

Universitatea "Dunarea de Jos" din Galati  
Facultatea de Mecanica  
Catedra Tehnologia Constructiilor de Masini  
Proiectul ID\_653-231/1.10.2007

# Raport in extenso pentru etapa unica 2008

## Cuprins

- A. Obiective, activitati si rezultate planificate**
- B. Prezentarea in extenso a activitatilor desfasurate**
- C. Prezentarea in extenso a rezultatelor obtinute**
  - a) Articole stiintifice publicate**
  - b) Inventii create si inregistrate**
  - c) Cursuri doctorale restructurate**

### **A. Obiective, activitati si rezultate planificate**

#### **Ob. 1. Conceperea unei metode de reconfigurare rapida a sistemului de comanda numerica al masinii**

##### **Activitati:**

- 1.1. Dezvoltarea unei metode de reconfigurare rapida a sistemelor de control numeric. Conceperea unui limbaj de nivel inalt pentru elaborarea programului masina.
- 1.2 Analiza metodei si simularea aplicarii acesteia. Realizarea unui interpretor pe baza metodei dezvoltate si aplicarea acestuia la masina prototip.

##### **Rezultate:**

- 1. Metoda de reconfigurare rapida a sistemelor de control numerice. 2. Interpretor pentru sistem de comanda numerica

#### **Ob. 2. Dezvoltarea unui sistem de programare a masinii bazat pe taskuri**

##### **Activitati:**

- 2.1. Conceperea unui algoritm de conversie a taskurilor in instructiuni pentru masina tehnologica. Dezvoltarea unui nou limbaj de nivel inalt bazat pe taskuri.
- 2.2 Analiza metodei prin simularea aplicarii acesteia in cazul taskurilor specifice proceselor de strunjire. Implementarea noului algoritm si a limbajului in arhitectura interpretorului masinii prototip.

##### **Rezultate:**

- 1. Algoritm de conversie a taskurilor. 2. Limbaj de nivel inalt bazat pe taskuri.

### **Ob. 3. Conceperea unei tehnici de prognoza si compensare online a erorilor de prelucrare**

#### **Activitati:**

3.1. Elaborarea unei metode de modelare online a relatiei dintre eroarea de prelucrare si marimile de stare ale masinii tehnologice. Cercetari experimentale privind aplicarea metodei de modelare in prognoza erorilor de prelucrare, in cazul prelucrării unui lot de piese.

3.2. Dezvoltarea unui sistem de prognoza si de compensare online a erorilor de prelucrare si aplicarea acesteia la masina prototip.

#### **Rezultate:**

1. Metoda de modelare online a relatiei eroare-parametri. 2. Sistem de prognoza si compensare.

## **B. Prezentarea in extenso a activitatilor desfasurate**

### **CAPITOLUL I**

## **Stadiul actual al cercetarilor cu privire la reconfigurarea masinilor unelte**

### **1. Premize stiintifice si tehnice, tehnologii si metodologii suport, abordari si paradigme**

În acest capitol se prezintă stadiul actual în domeniul cercetării, teorii, implementări industriale și diferite abordări. Întrucât subiectul cercetării este inter-disciplinar și multi-disciplinar, acesta se referă la cercetările din domeniul sistemelor reconfigurabile, sistemelor inteligente distribuite și sistemelor CAD/CAM/CAPP .

#### **1.1 Sisteme de fabricație reconfigurabile**

##### **1.1.1 Flexibilitatea sistemelor de manufacturare**

Globalizarea economiei a generat o cerere pentru manufacturieri pentru a produce o gamă largă de produse care trebuie să îndeplinească condiții de calitate deosebite și preț scăzut, și toate acestea într-un timp de fabricație cât mai scurt. Din acest motiv a apărut necesitatea unor noi sisteme de manufacturare, cum ar fi cele flexibile sau cele reconfigurabile.

Există în lume mai multe sisteme de manufacturare industriale, cum ar fi: sistemele de manufacturare dedicate, sistemele de manufacturare flexibile, sistemele de manufacturare



celulare, sistemele de manufacturare reconfigurabile, sistemele de manufacturare multitask. Fiecare dintre aceste sisteme corespunde unei etape de dezvoltare și prezintă diverse avantaje.

### **Sistemele de manufacturare dedicate**

Istoria sistemelor de manufacturare dedicate începe odată cu implementarea producției în masă, când era necesară producerea unor piese identice într-un număr foarte mare. Astfel, fiecare dintre mașinile industriale componente ale unei manufacturi prelucra o operație specifică sau producea o singură piesă. Sistemul acesta de manufacturare nu era unul flexibil și nu permitea introducerea unei alte piese spre producere decât cea proiectată inițial. În momentul în care era necesară introducerea altui produs, mașinile trebuiau schimbate, ceea ce înseamnă costuri mari pentru noile mașini și timp de înlocuire considerabil, care se traduce prin costuri importante.

### **Sistemele de manufacturare flexibile**

Un sistem de manufacturare flexibil este reprezentat în general de un număr de mașini comandate numeric și de un sistem de conducere asistat de unul sau mai multe calculatoare. Un sistem flexibil de fabricație este capabil să producă una sau mai multe familii de piese, în mod continuu fără intervenția umană. Sistemul este astfel flexibil pentru a schimba producția, fără a cumpăra alt echipament.

### **Sistemele de manufacturare celulare**

Sisteme de manufacturare celulare sunt acele sisteme care își propun să îmbunătățească productivitatea, prin intermediul unei grupări a mașinilor și a personalului, pentru a produce o clasă specifică de piese. Avantajele acestor sisteme sunt varietatea deosebită a produselor care sunt manufacturate în serie mică.

### **Sistemele de manufacturare reconfigurabile**

Centrul de cercetări ingineresti “Ann Arbor” de la Universitatea din Michigan, împreună cu mai mult de 30 de parteneri din industrie, lucrează la dezvoltarea unui nou sistem de manufacturare, care va satisface cererile consumatorilor, prin reconfigurarea sistemului de manufacturare însuși [Mehrabi 2000b]. Potențialul acestui sistem poate fi exploatat la maxim, în condițiile în care controlul prin intermediul CNC este combinat cu productivitatea mare a sistemelor dedicate, folosind o metodă de exploatare sistematică.

Reconfigurabilitatea se poate defini ca fiind abilitatea de a acorda capacitatea de producție la noi circumstanțe, prin rearanjarea sau schimbarea componentelor din sistem. Componentele pot fi componente mecanice, senzori sau controlere. Deosebim două clase de mașini și anume Adjustable Capacity RMT –mașina reconfigurabilă cu capacitate de ajustare și Adjustable Functionality RMT, care permite realizarea unor familii diverse de piese.

## 1.2 Ideea de sistem reconfigurabil de manufacturare

Conceptul de sistem reconfigurabil de manufacturare este un curent în domeniul mașinilor unelte, ce a atras atenția producătorilor, care au nevoie de un sistem ce este mai flexibil decât o linie dedicată de producție și mai rapid decât un complex de mașini CNC.

Mașinile folosite se numesc reconfigurabile datorita faptului că sunt compuse din module care, odată programate, pot realiza piese diferite, dar din aceeași familie de piese. Mașinile reconfigurabile fac astfel legătura între sistemele de mașini dedicate, care pot realiza pe scară mare un singur produs și sistemele de mașini comandate numeric (CNC), care permit o flexibilitate relativă, dar care au dezavantajul ca schimbarea necesară pentru producerea unei noi piese necesită timp considerabil.

## 1.3 Evoluția RMS-urilor

Istoria manufacturării se poate împărți în trei etape după Mehrabi, Ulsoy și Koren [Mehrabi 2000a] [Mehrabi 2000b] :

- 1) Epoca dinaintea controlului numeric;
- 2) Epoca controlului numeric;
- 3) Epoca cunoașterii.

În epoca pre-controlului numeric, s-a pus accentul pe creșterea productivității; cererea nu era foarte mare în ceea ce privește diversitatea produselor și piața era caracterizată prin competiție locală. În epoca CNC, obiectivele țintă erau costul redus de producție și calitatea îmbunătățită, deoarece mașinile CNC permiteau o varietate relativ mare a produselor și un mai bun control. În epoca cunoașterii (începând cu anii 1990) s-a pus accentul pe capacitatea de

schimbare rapidă a producției. Aceasta perioadă este caracterizată de o competiție acerbă, cauzată de globalizarea economiei. Au avut loc progrese deosebite în sistemele de management informatic. De aici putem concluziona că globalizarea și dezvoltarea domeniului informatic au dus la această etapă. Aceste condiții necesitau o manieră de răspuns la schimbarea producției, capabilă să convertească într-un termen foarte scurt producția pentru noi modele, să dimensioneze producția, să integreze noi tehnologii și să realizeze o diversitate de produse în cantitatea necunoscută inițial, adaptate la cerințele pieței.

Așa cum afirmau mai mulți autori din SUA care studiază sistemele de manufacturare [Mehrabi 2000a, Mehrabi 2001, Asl 2000], elementele componente și structura sistemului afectează în mod sensibil capacitatea de a fi reconfigurabil pentru o producție cu un cost redus. În studiul lor se arată că proiectarea modulară a mașinilor unelte reprezintă principalul obiectiv în reconfigurarea sistemelor deja existente. De asemenea, pe lângă reconfigurabilitatea realizată prin module interschimbabile este necesară realizarea de componente hardware și software care să îndeplinească condiția de reconfigurabilitate. Rezultatele studiilor arată că interesul producătorilor pentru sisteme de manufacturare de tip flexibil (FMS - Flexible Manufacturing System) a scăzut datorită complexității software, costurilor de investiție și costurilor de întreținere.

#### **1.4 Conceptul de sistem reconfigurabil**

Conceptul de sistem reconfigurabil a fost introdus pentru a satisface noile provocări în sistemele moderne de manufacturare. Un sistem de acest tip poate să se reintegreze la o nouă producție într-un timp foarte scurt, folosind module hardware și software. Reconfigurabilitatea permite adăugarea, excluderea sau modificarea unor unități de producție specifice, control, software sau modificarea structurii mașinii pentru o adaptare optimă la cerințele pieței. Pentru ca sistemul să dețină calitatea de reconfigurabilitate trebuie să îndeplinească anumite condiții. Acestea includ: modularitatea pentru componentele hardware, cât și pentru componentele software, integrabilitatea (proiectarea sistemului și a componentelor atât pentru integrarea rapidă cât și pentru introducerea noilor tehnologii), diagnosticabilitatea (capacitatea de identificare rapidă a problemelor de calitate și defectare din sistem), personalizarea (proiectarea pentru adaptarea la producția unui anumit produs prin intermediul componentelor hardware și software) și convertibilitatea.

Sistemele de manufacturare configurabile (Reconfigurable Machining System – RMS ) sunt proiectate pentru a îndeplini următoarele cerințe [Koren 2006] :

- să reducă timpul de start al producției pentru o nouă piesa sau familie de piese;
- să fie suficient de flexibil pentru adaptarea la schimbările de pe piață;
- să permită reconfigurabilitatea sistemului de manufacturare în acord cu produsul ce trebuie executat;
- să permită noilor tehnologii software să fie implementate în sistemele existente.

Spre deosebire de sistemele flexibile, sistemele reconfigurabile prezintă avantajul că nu există capital stagnant în timpul funcționării lor, prin aceea că nu există module care nu sunt folosite pentru producția curentă. În momentul când se trece la fabricarea altei familii de piese, se achiziționează module corespunzătoare.

### **Caracteristicile RMS**

Arhitectura sistemelor de fabricație trebuie schimbată pentru a face față acestor noi schimbări. Modalitățile prin care se pot opera schimbări în arhitectura sistemului sunt prin intermediul conceptului de sistem flexibil și sistem modular. Conceptul de sistem flexibil se bazează pe ideea utilizării de componente cu o flexibilitate înaltă. Conceptul de sistem modular implică dezvoltarea unei arhitecturi hardware care să poată fi modificată prin asamblarea diferitelor module. Parametrii corespunzători ansamblului se numesc parametri dinamici. De asemenea, acest concept înseamnă că topologia sistemului poate fi schimbată prin adăugarea sau scoaterea modulelor, așa încât multitudinea de task-uri pe care sistemul poate să îl execute crește către infinit. Un exemplu tipic ar fi un sistem robotic modular, care este construit pe baza conceptului de sistem modular.

Un sistem de manufacturare reconfigurabil este proiectat pentru a permite schimbări rapide în ceea ce privește componentele hardware și software, pentru a ajusta capacitatea de producție și funcționalitatea familiei de piese, pentru a răspunde la schimbările bruște de pe piață sau a legislației [Koren 1999]. Din punctul de vedere a sistemului modular, un RMS constă în componente modulare. Arhitectura este deschisă -“open”, în sensul că este capabilă să își reducă sau să crească numărul sau tipurile de module. De asemenea, sistemul este capabil să selecteze un set de module și să le asambleze în diferite configurații. Fiecare configurație este capabilă să îndeplinească cerințele pentru un anumit task în mod optim. Din punctul de vedere al sistemelor

flexibile, unele din modulele sistemului au componente ajustabile, cum ar fi axele de translatare a CNC-ului sau actuatoarele unui robot. Prin urmare, un RMS integrează componente ajustabile bazate pe o arhitectura modulară, rezultând maximizarea capacităților sistemului. În comparație cu sistemele de producție în masă, un RMS prezintă o flexibilitate în producție variabilă, în comparație cu sistemele de manufacturare flexibilă, un RMS are flexibilitate în capacitățile de producție. Un RMS este o paradigmă ideală pentru manufacturieri care permite variația producției în volume mici și cu un cost mic.

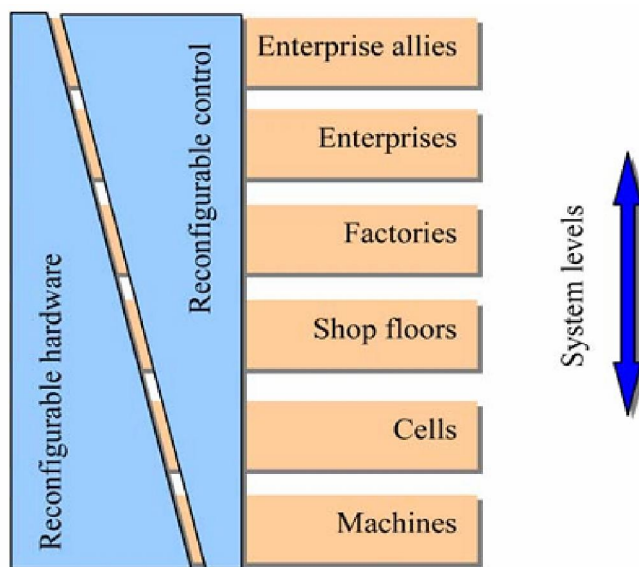


Fig. 1 Organizarea sistemului reconfigurabil [Mehrabi 2000a]

Așa cum se arată în figura 2, un RMS posedă o serie de caracteristici cheie [Mehrabi 2000a, Mehrabi 2000b], cum ar fi ‘modularitatea’, ‘scalabilitatea’, ‘integrabilitatea’, ‘convertibilitatea’ și ‘diagnosabilitatea’.

Modularitatea implică atât nivelul hardware și nivelul software a elementelor componente.

Scalabilitatea înseamnă că sistemul este capabil să își modifice volumul de producție, în funcție de necesitățile de pe piață.

Integrabilitatea înseamnă că, componentele sistemului sunt proiectate astfel încât să fie integrate în arhitecturile viitoare ale noilor tehnologii.

Convertibilitatea permite schimbări rapide în ceea ce privește schimbarea producției.

Diagnosabilitatea definește capacitatea de a identifica problemele de calitate și fiabilitate. Influența acestor caracteristici asupra schimbărilor și necunoscutelor au fost discutate și ilustrate de Bietal [ Bietal 2005].

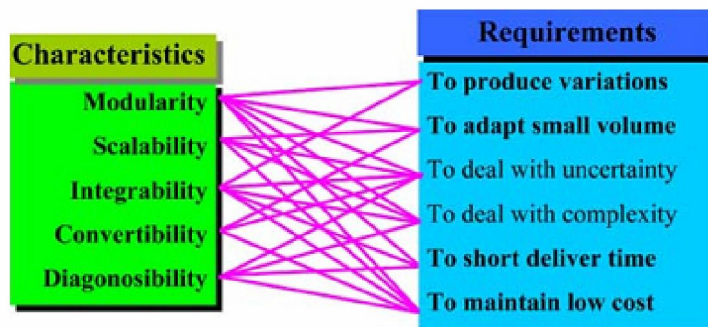


Fig. 2 Caracteristici atribuite sistemelor reconfigurabile [Mehrabi 2000]

Reconfigurabilitatea sistemelor, privită de la nivelul mașinii până la nivelul întregii corporației, poate fi clasificată în ceea ce privește nivele de acțiune luate în considerare. Așa cum se arată în Fig.4, la nivelele inferioare reconfigurabilitatea este realizată prin schimbarea resurselor hardware, iar reconfigurabilitatea la nivele mai înalte este realizată de resursele software. Pentru a atinge nivele de performanță dorite, este necesar să se îndeplinească atât reconfigurabilitatea la nivel software cât și la cel hardware.

## Dezvoltări ale RMS-urilor

Un exemplu de sistem de manufacturare reconfigurabil este arătat în figura de mai jos. Sistemul constă în mai multe mașini reconfigurabile reprezentate de mașini unelte reconfigurabile, sisteme de asamblare, sisteme de inspecție și calibrare și sisteme de manipulare.

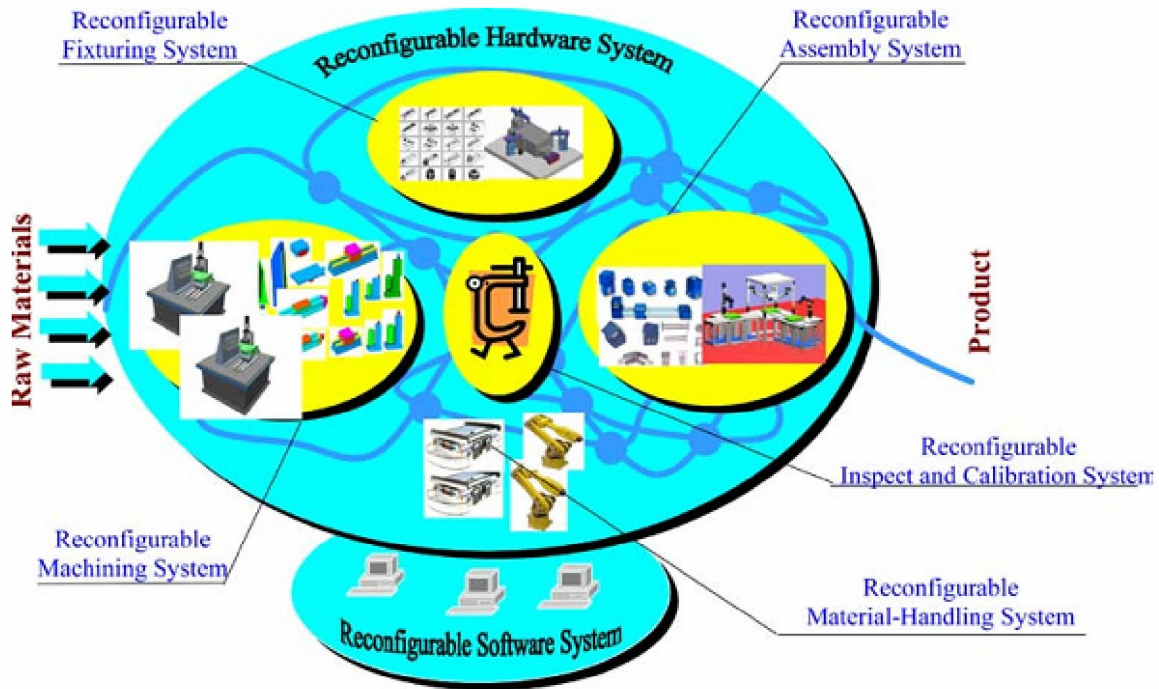
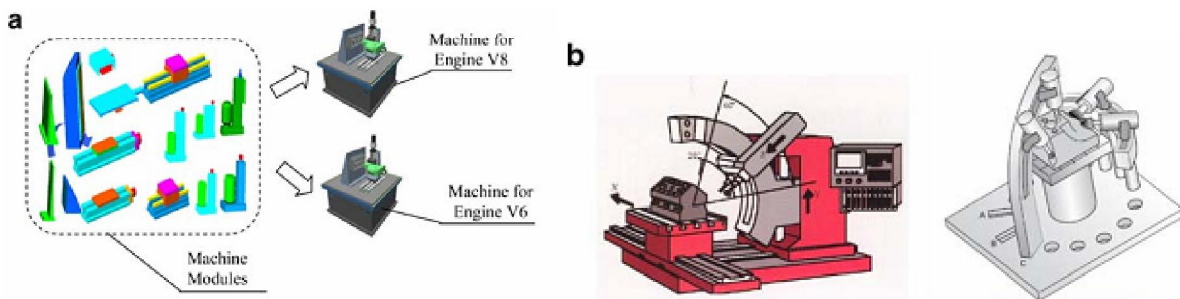


Fig. 3 Exemplu de aplicare a unui sistem RMS [The 2000]

Proiectul (MOSYN) a fost propus pentru a studia personalizarea configurațiilor hardware a mașinilor unelte modulare [The 2000]. În prezent, mașinile unelte sunt privite modular, pentru a crește numărul de versiuni a unei anumite mașini de către producători, end-userii folosesc în final o configurație anumită, dar mașina suferă noi reconfigurații după instalare. O nouă clasă de mașini unelte reconfigurabile a fost studiată la Universitatea din Michigan. Așa cum se arată în figura 4 a, noile mașini unelte reconfigurabile au o arhitectura modulară, diferitele configurații ale sistemului pot duce la producerea de diferite familii de produse. Sistemul se așteaptă să îndeplinească condițiile de modularitate, integrabilitate, personalizare, convertibilitate și diagnozabilitate [Koren 1999] . Așa cum se arată în figura 4b, o încercare a fost făcută pentru dezvoltarea unui RMT cu axe non-ortogonale, numărul de orientări ale arborelui principal putând fi schimbat pentru a satisface cerințele unui anumit produs [ Katz 2002]. Cercetarea va fi extinsă prin încorporarea mai multor arbori pe o mașină unealtă ortogonală. [Koren 2005].



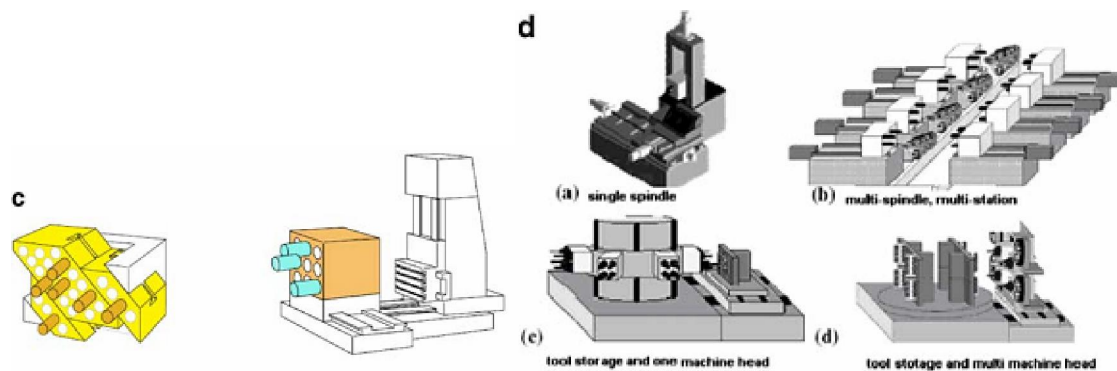


Fig. 4 Diferite studii de mașini RMT de la universitatea din Michigan

În industria aerospațială, matrițele reconfigurabile au fost dezvoltate pentru table din metal sau materiale compozite [Papazian 2002, Vailavec 1999]. O matriță reconfigurabilă constă dintr-un matrice de pini. Fiecare pin din matriță este un simplu actuator prevăzut cu un solenoid comandat numeric, căruia i se controlează poziția verticală. Odată ce poziția pinilor a fost stabilită, întreaga matriță este așezată pe o parte rigidă. Shin [Shin BS2003] propune o nouă tehnologie folosind o combinație de procesare cu viteză înaltă și tehnică flexibilă de fixare. Noua tehnologie este văzută ca o alternativă la procesarea cu viteză înaltă.

Parallel kinematic machines (PKMs) sunt alte tipuri de mașini reconfigurabile [Fassi I 2000]. Un PKM reconfigurabil a fost dezvoltată la NRC-IMTI. PKM permite mișcarea pe 3 axe de libertate. PKM este reconfigurabilă și unele module, ca legăturile binare și platformele pot fi personalizate în funcție de cerințe. Sistemul suport ajustabil și masa reglabilă permite multe configurații pe mașina de prelucrat cu diferite cerințe. Sistemul permite o reconfigurare rapidă, schimbarea mașinii de pe verticală pe orizontală sau la diferite unghiuri, dacă e necesar. Există o reconfigurare echivalentă în sistemul control, care permite diferite mișcări ale mașinii reconfigurabile. Un concept similar a fost adoptat de Li și al. [Huang 2005] și Huang și al. [Lin 2004]. PKM-urile sunt construite pornind de la elemente standardizate. Trebuie precizat că teoriile și metodologiile pentru implementarea PKM-urilor sunt încă în stadiu de dezvoltare.

Conceptul de interschimbabilitate și fixare modulară a fost introdus încă din anii '45. Sistemele modulare de fixare au fost folosite pe cale largă în anii '60 și sunt folosite alături de mașinile unelte NC. Chan și Lin [Chan 1996] au dezvoltat sisteme modulare de fixare, constând în module standard care ofereau proprietățile de fixare, poziționare și prindere. Modulul e reprezentat de patru gheare cu opt grade de libertate pentru a se putea adapta la orice suprafață arbitrară a piesei. Așa cum se arată în figura 5, General Motors [Mehrabi 2000a] a dezvoltat un



sistem reconfigurabil de fixare. Sistemul constă în plasarea și montarea modulelor care pot fi aranjate pe un batiu magnetic. Modulele sunt stocate în depozitul de scule iar când este necesar acestea sunt selectate pentru a produce familii variate de piese. Un prototip a fost fabricat și validat pentru sistemul de fixare și procesare, cercetările fiind făcute la Universitatea din Michigan. Mașina de alezat este capabilă să prelucreze diferite tipuri de motoare și cilindri.

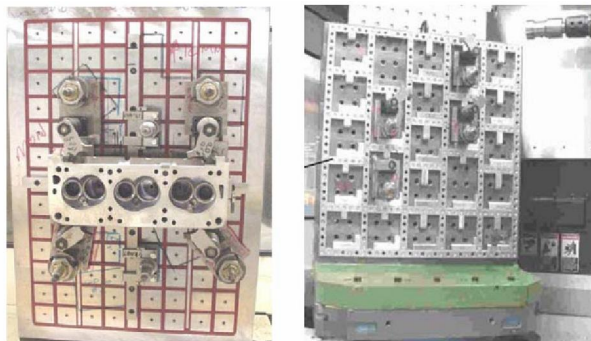


Fig. 5 Sistem de fixare reconfigurabil proiectat pentru Ford

Există mai multe abordări în sprijinul ideii de folosire a roboților la sistemele automate de fixare [Giusti 1994, Yuguang 2008].

Timpul de inițiere a producției (ramp-up time) și diagnosticabilitatea sunt alte probleme ale proiectării sistemelor de fabricație reconfigurabile. Arai [Arai 2002] folosește în cercetările sale roboți pentru a calibra sistemul de fabricației în mod automat, pentru a reduce timpul de inițiere a producției. Mehrabi și Kannatey-Asibu [Mehrabi 2001] folosește un sistem de monitorizare multi-senzor pentru a crește diagnosticabilitatea sistemului. Așa cum se arată în figura 6, un sistem de inspecție a mașinii reconfigurabile a fost dezvoltat, care constă într-o matrice de camere web pentru inspecția automată cu vedere artificială. Matricea poate fi configurată pentru a atinge diferite nivele de performanță, pentru aplicațiile de inspecție.

O nouă metodă bi-dimensională pentru calibrarea matricei de camere este propus, prin care se unesc imaginile achiziționate de la camere pentru a forma o imagine de înaltă rezoluție. Mașina reconfigurabilă realizată la Universitatea Michigan a fost proiectată pentru a permite flexibilitatea, în ceea ce privește fabricația cilindrilor pentru motoare V6 și V8 [Jaspreet 2007].

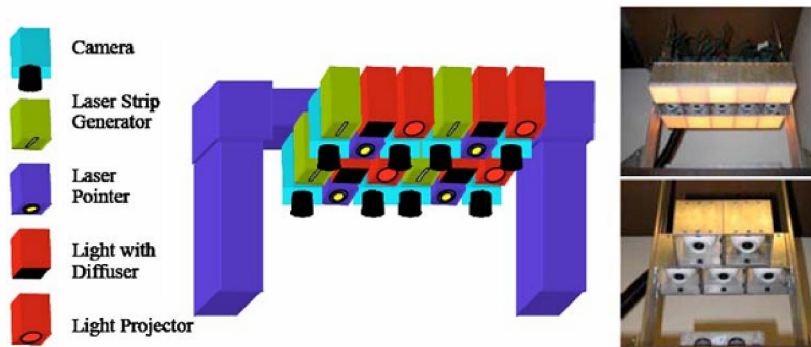


Fig.6 Matrice de camere folosite pentru RMT

Dezvoltarea sistemelor hardware pentru RMT-uri s-a diversificat și se poate sumariza precum urmează: a) majoritatea sistemelor sunt prototipuri și există foarte puține sisteme implementate în mediul industrial; b) sistemele existente au fost proiectate fără o metodologie sau standardizare; c) reconfigurabilitatea sistemelor este slabă, în general, de multe ori este imposibil să se identifice o diferență între sistemele flexibile și sistemele reconfigurabile.

### **Metodologii de proiectare a sistemelor de fabricație reconfigurabile**

Conform lui Z. M. Bi & Sherman, proiectarea sistemelor reconfigurabile include trei faze.

În prima fază, sistemul există ca un set de module în depozit. Fiecare modul are o anumită funcție, cum ar fi mișcarea de translatare a unui actuator linear sau funcția de mutare a unui robot. Modulul oferă, de asemenea, interfețe prin care modulul se poate asambla cu altele externe.

În a doua fază, sistemul este într-o configurație concretă. Sunt selectate variabilele reconfigurării, cum ar fi selectarea modulelor și selecția acestora. Configurația sistemului este optimizată pentru anumite cerințe.

În a treia fază descrisă, configurația sistemului este în funcțiune. Variabilele de control a unor componente reglabile sunt manipulate și sistemul funcționează pentru îndeplinirea sarcinii curente. Când sarcina este terminată, sistemul se dezassemblează și modulele sunt gata pentru a fi folosite pentru noi sarcini.

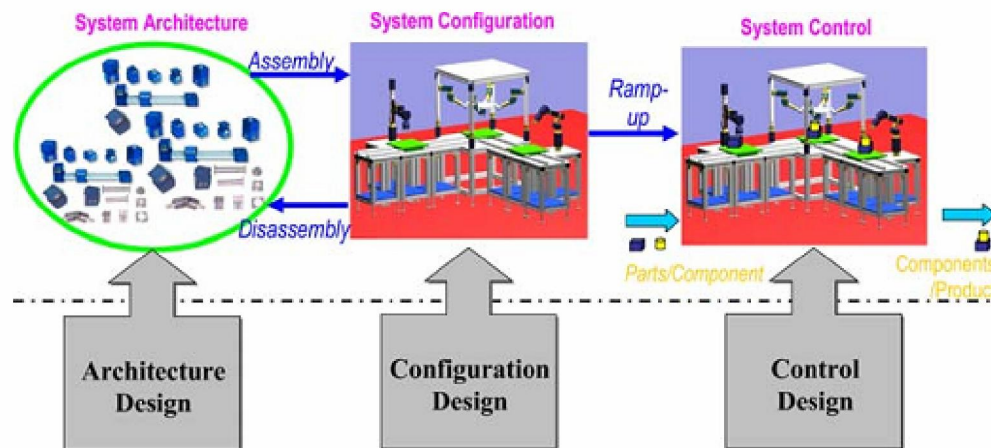


Fig. 7 Sistem reconfigurabil si problemele de proiectare [Chen 2001]

### Probleme de proiectare a sistemelor de fabricație reconfigurabilă

Problemele de proiectare pentru o mașină unealtă reconfigurabilă sunt conform Z. M. Bi & Sherman: proiectarea arhitecturii, proiectarea configurației și controlul proiectării în ceea ce privește ciclul de viață.

Proiectarea arhitecturii determină componentele sistemului și interacțiunile dintre module. Arhitectura sistemului trebuie să fie proiectată de așa manieră, astfel încât să producă cât mai multe variante posibile, în așa fel încât sistemul să poată face față schimbărilor și cu neprevăzutul eficienței costurilor. Proiectarea arhitecturii se are în vedere în faza de proiectare a sistemului.

Proiectarea configurației determină configurația sistemului pentru o sarcină specifică. O configurație este un ansamblu de module selectate. Proiectarea configurației se are în vedere în faza de utilizare a sistemului pentru o anumită sarcină. Proiectarea controlului determină variabilele de control ale procesului, în așa fel încât configurația curentă să poată fi folosită pentru îndeplinirea sarcinii curente.

### Metodologii pentru proiectarea arhitecturii

Proiectarea arhitecturii ia în considerare constrângerile derivate din aplicația particulară pe care trebuie să o opereze RMT-ul. Complexitatea proiectării depinde de nivelul de reconfigurabilitate și de cerințele în ceea ce privește schimbările și necunoscutele. Multe lucrări au tratat subiectul proiectării arhitecturii sistemelor de manufacturare și foarte puține cu privire la manufacturarea modulară [Benjaafar 2002, Tsukune 2000]. Majoritatea cercetărilor au abordat

abordări intuitive , cum ar fi studiul de piața [Asl 2000, Katz 2002, Koren 1999, Mehrabi 2002a, Zhao 2000]. Unele metodologii sunt noi, precum Chen și alții [Chen 2001, Chen L 2005] care folosește proiectarea axiomatică pentru a defini arhitectura sistemelor de roboți reconfigurabili. Kuhnle [Kuhnle 2001] prezintă un model stare de timp pentru a descrie relația între cerințele proiectării și schimbările organizaționale. Asl și alții [Asl 2000] au studiat stabilitatea RMS-urilor prin analogia cu un fluid dinamic. Adolfsson și alții [Adolfsson 2002] aplică simularea pentru a proiecta sisteme de manufacturare bazate pe componente. Metodologii în plină dezvoltare, cum ar fi evoluționismul computațional, auto-organizarea, învățarea supervizată, sisteme multiagent. Narita și alții [Narata 2004] propune un concept al mașinii ”future oriented machine tools” - (FOMT), care constă din patru blocuri funcție (management, predicție, observare și strategie) iar procesele de manufacturare inteligente sunt realizate prin utilizarea acelor blocuri funcție. Aceste funcții sunt analog funcțiilor pe care le are un operator, când trebuie să îndeplinească o sarcină de manufacturare. Abele și alții [Abele 2005] au propus să dezvolte o mașină unealtă reconfigurabilă multi-tehnologică, care se bazează pe înalta productivitate și durată de viață îndelungată.

### **Metodologii pentru proiectarea configurației.**

Metodele pentru proiectarea configurației depind de complexitatea sistemului reconfigurabil. În ceea ce privește natura cuplării variabilelor de proiectare, care să cuprindă cerințele de proiectare, un sistem reconfigurabil poate fi, de asemeni, clasificat în: sistem individual, sistem cuplat liber sau un sistem cuplat puternic. Într-un sistem individual, ca de exemplu un sistem calculator, fiecare modul corespunde unei cerințe individuale. O configurație este stabilă când toate componentele sale sunt selectate. Într-un sistem cuplat liber, ca de exemplu un sistem de fixare, fiecare componentă corespunde unei cerințe ( componenta de strângere este responsabilă cu cerința de strângere), dar câteva din cerințele sistemului, ca de exemplu toleranța și deformația sunt îndeplinite de toate componentele. Toate modulele sistemului trebuie luate în ansamblu pentru a evalua capabilitatea sistemului de a îndeplini cerințele. Un sistem ajutat de calculator pentru planificarea producției (CAAP) a fost dezvoltat pentru a determina caracteristicile modulelor componente, pentru simularea sistemului de ansamblu al proiectării, pentru simularea tridimensională a roboților, pentru proiectarea fiecărui ansamblu și a celulelor de control. La Universitatea Nottingham s-a dezvoltat un sistem robot asamblat pentru nituire ([Books B 2005]). Pentru un sistem individual sau un sistem cuplat liber, o componentă sistem poate fi determinată individual, bazându-se pe cerințele lor corespondente.

Pentru a îndeplini câteva din cerințele sistemului, componentele individuale au nevoie de câteva reglări. Proiectarea configurației a unui sistem individual sau un sistem cuplat liber este similară cu determinarea unui produs modular. Pentru un sistem cuplat puternic, variabilele de proiectare trebuie considerate împreună, pentru a justifica dacă configurația îndeplinește sau nu cerințele. Luând un exemplu de sistem robot reconfigurabil, variabilele de proiectare sunt selecțiile și ansamblurile modulelor iar cerințele de proiectare sunt caracteristicile cinematice și dinamice ale unui robot, incluzând traiectoria, timpul și sarcina.

### **Metodologii de control**

Controlul RMS poate fi generalizat și prin cerințele de proiectare sunt prezentate mai jos. Sistemul control trebuie să fie autonom deoarece un obiectiv la nivel de sistem este descompus în obiective la nivel de modul. Fiecare modul are nevoie de un controler integrat, pentru a îndeplini obiectivele sale. Sistemul de control trebuie să fie capabil să integreze și să coordoneze modulele pentru a implementa obiectivul la nivel de sistem;

- (i) sistemul de control trebuie să fie distributiv și modular, deoarece componentele de sistem sunt descentralizate și distribuite;
- (ii) sistemul de control trebuie să fie deschis astfel încât poate fi actualizat, controlând componentele. Controlul componentelor poate fi dezvoltat în operații heterogene;
- (iii) sistemul de control trebuie să fie accesibil și actualizabil deoarece adăugarea/înlăturarea/actualizarea componentelor hardware sunt necesare atunci când au fost schimbate tehnologiile de funcționare, capacitate sau de posibilitate.
- (iv) sistemul de control trebuie să fie el însuși reconfigurabil deoarece configurațiile de sistem pot fi schimbate de la o configurație la alta în mod frecvent. Sistemul de control corespunzător trebuie să fie de asemenea el însuși reconfigurabil rapid.

Conceptele paradigmelor de control, cum ar fi fabricarea holonică, fabricarea bionică [Okino 1998] [Hoda 2008] și companii fractale [Dong 2005], sunt propuse pentru sistemele viitoare de fabricație. Marik și alții [Marik 2002], Tian și alții. [Tian 2002] și Tommila și alții [Tommila 2001] au verificat situația tehnologiilor de fabricare a agenților bază; Balasubramanian și alții [Balasubramanian 2001], Bongaerts și alții [Bongaerts 2000], Heikkila și alții [Hsieh 2003], Langer și Alting [Langer 2000], Zaremba și Morel [Zaremba 2003], Zhang și alții [Zhang

2000] au propus arhitecturi variate de control pentru fabricarea sistemelor control; Nirav și Duncan au studiat o abordare pentru controlul reconfigurabil al operațiilor [Nirav 2008].

Totuși, metodele eficiente încă lipsesc pentru a susține implementarea la scară industrială a conceptului de control holonic. S-a propus un concept al unei mașini unelte orientată -single machining system [Shu 2000, Wang 2002] sau pentru un sistem reconfigurabil simplificat [Zhang 2000]. Jungtae [Jungtae 2006] demonstrează capacitățile unui sistem software auto-reconfigurabil cu ajutorul agenților software pentru a reconfigura controlul unei mașini. Ahmed și al [Ahmed 2007] prezintă o nouă abordare cu privire la planificarea într-un sistem de manufacturare reconfigurabil iar Reuven [Reuven 2007] studiază principiile de proiectare pentru mașina reconfigurabilă. De asemenea, Manfredi și al [Manfredi 2006] investighează problemele ridicate de managementul operațiilor într-un sistem de fabricație reconfigurabil.

Open architecture control (OAC)- (Controlul Arhitectural Deschis) oferă infrastructura pentru a implementa controlul RMS. Realizări în dezvoltarea OAC au fost efectuate de către Feraz [Ferraz 2005 ], Erol și al. [Erol 2000], Zhou și al. [Zhou 2004], Katz și al. [Katz 2002] și Pritschow și al. [Pritschow 2001]. Structurile ierarhice, sunt folosite considerabil în producția de masă și în manufacturarea asistată de calculator (CIM), pot fi de asemenea folosite. Monfared și Weston [Monfared 1997] și Weston [Weston 1999] au propus o abordare a modelului condus bazându-se pe CIM-OSA; Park et al. [Park 2000] au dezvoltat un model de lucru de control pentru sistemele flexibile modulare de fabricare; Kalita și Khargonekar [Kalita 2002] au dezvoltat un controler logic pentru RMT. Reconfigurabilitatea unui sistem de control depinde de deschiderea arhitecturii de control a componentelor sale. Orban și al. [Orban 2005] au evaluat câteva arhitecturi de control obișnuite în termenii potrivirii și cerințelor de reconfigurare.

O noua arhitectura pentru un controler modular în timp real a RMT urilor a fost dezvoltat și testat. Mașina inteligentă este reprezentată de procedura de calcul eficientă care combină una sau mai multe tehnici și criteriul expert cu unul sau mai multe nivele de decizie înaltă (ierarhică), care la bază, manipulează condițiile mașinii ( viteza axială, rata de alimentare, adâncimea cuțitului) și poziția sculei monitor și calitatea suprafeței finale, la creșterea productivității [Katz 2003]. Un studiu a fost condus de Manfredi [Manfredi 2007] pentru dezvoltarea unui sistem de control pentru o celula de fabricație la Department of Manufacturing, Production and Management Engineering a Universitatii din Palermo. O schemă modulară multi-nivel de implementare a procesului de monitorizare integrată, diagnostic și control este propusă. Un PC cu baza hardware integrată cu o structură soft bazată pe obiect este folosită pentru

a manevra o serie de parametri ai mașinii în timpul detecției on-line a variabilelor mașinii prin procesare prin mijloace de procesare digitala a semnalului. Softul reconfigurable este o cerință importantă pentru sistemele automate de control a mașinii unelte pentru costurile scăzute și timpul scurt de implementare. Wang și Shin [Wang 2002] au propus o arhitectură de soft bazată pe combinația de modele a obiectelor orientate și specificațiile formale de execuție. Softul mașinii de control este privit ca o integrare a unui set de componente de soft, fiecare având un set de interfețe externe pentru definițiile funcționale, un control logic derivat pentru specificațiile de execuție sau de funcționare și un set de protocoale service pentru adaptarea platformei. Conceptele noii mașini RMS impune funcționalități de control mai mare împreună cu scule avansate și metode pentru proiectarea lor. În timpul procesului de reconfigurare nu există posibilitatea de a testa complet sistemul fără a exista riscul de a solicita sau chiar strica mașina. În plus, structura mașinii reconfigurable este adesea consumatoare de timp și resurse financiare. Pritschow și al. [Pritschow 2005] prezintă un mod de testare virtuală a structurii mașinii reconfigurable, folosind un model dinamic de mașină unealtă în timp real, în combinație cu algoritmi de detecție capabili de coliziune în timp real, în așa numitul "Hardware in the Loop Simulation" ( Hardware cu bucla de simulare).

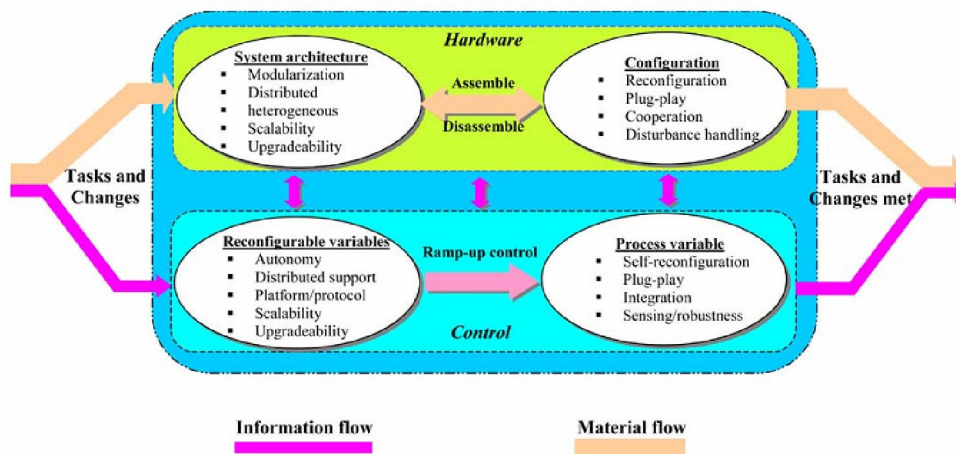


Fig. 8 Necesitățile unei mașini RMT

## 1.2. Sistemele de manufacturare holonice

### 1.2.1. Conceptul de holon

#### Ideea de holon

Ideea de ierarhie și a părților constituente, ca parte din aceasta au fost tratate în mod diferit. Diferiți filozofi au propus sisteme abstracte pentru a explica fenomenul social. În Grecia pre-socratică Leucid și Deocrit au dezvoltat conceptul de atom și au dezvoltat o filozofie pentru a explica evenimentele sociale observate. Aristotel a folosit ierarhia ca o metodologie pentru acumularea și interconectarea cunoștințelor umane. Ierarhia a fost un punct de vedere dominant cu privire la interconectarea din natură. În secolul al 17-lea, Leibnitz propune “monadul” ca fiind o unitate capabilă să explice lumea materială. În 1967, Arthur Koestler propune termenul de “holon” în cartea sa - “Sufletul din mașină”. Arthur Koestler a participat la numeroase evenimente politice și sociale din timpul său. Ideea de holon ocupă o poziție importantă în gândirea autorului în ceea ce privește condiția umană. El a dezvoltat construcția în ceea ce privește trei probleme importante în perioada de după război. În primul rând, a văzut necesitatea unui model care trebuie să unească și să integreze viziunea reduționistă și mecanistă cu cea holistică și umanistă a filozofilor freudiană, rogeriană și gestaltă. În al doilea rând, a recunoscut importanța și relevanța științelor sociale și a dorit să construiască o teorie. În al treilea rând, a dorit să dezvolte un model al sistemelor sociale pentru a descrie atât la nivel micro, la nivel de individ, cât și la nivelul macro, la cel al colectivității. În acest sens a dorit un model de bază capabil să explice activitatea umană în ansamblul ei. Koestler recunoaște că “holonul” are de fapt o îndelungată existență în filozofia Europei de Vest. Mai mulți filozofi cum ar fi Leibniz și Hegel au atras atenția asupra importanței conceptului de ierarhie și a nivelelor componente. Teoria holonică a fost încercarea lui Koestler de a integra filozofia și credea ca teoria holonică va duce spre o viziune științifică holistică. El afirma “Ierarhia relațiilor ...va fi poate principala idee a viitorului”. Koestler a crezut în principiile holonice ca o încercare de a explica existența umană. Cuvântul “holon” este o combinație a cuvântului grecesc “holos” care înseamnă tot, cu sufixul “on”, care înseamnă particulă sau parte.

#### Holonul și holarhia

Koestler consideră că în orice sistem, de la sisteme chimice la celule biologice și până la cele sociale, entități independente, care nu interacționează cu altele, nu există. Mai mult decât



atât, entitățile există într-o relație holarhică una cu cealaltă. El a numit aceste sisteme „Sisteme cu Ierarhie deschisă” - Open Hierarchical Systems (OHS) și prin urmare au fost denumite holarhii.

Fiecare unitate a unei organizații, cum ar fi o celulă dintr-un animal sau o familie dintr-o societate, este compusă din mai multe unități bazice (nuclee, părinți și copii), în același timp făcând parte dintr-o unitate de organizare mai mare (cum ar fi un țesut muscular pentru celulă, sau comunitate economică pentru o familie). Un holon, așa cum este definit de Koestler, este o parte identificabilă dintr-un sistem care are o identitate unică, dar în același timp este compusă din părți subordonate și în schimb este componentă a unui întreg mai mare. Holonii, definiți de Koestler nu sunt neapărat entități, dar modalități sistematice de a relaționa structuri teoretice. Prin aceasta, holonii sunt puncte arbitrare pentru a interpreta realitatea. Koestler afirma “ Oricare ar fi natura organizării ierarhice, holonii constituenți sunt definiți prin reguli stricte și strategii flexibile”. Deoarece fiecare holon este definit prin propria structură ierarhică, fiecare holon poate fi privit ca o serie de sub-ierarhii, definind holonii sub-constituenți. Holonii sunt în același timp și părți și întregi, deoarece sunt întotdeauna părți a unei ierarhii mai mari și întotdeauna conțin sub-ierarhii. Nu în ultimul rând, Koestler afirma că holonii sunt etape ale dezvoltării sau noduri structurale care definesc dezvoltarea ierarhiei. Prin urmare, holonii reflectă stadiul de dezvoltare în diferite stadii. Koestler pleacă de la două observații. Prima este atribuită lui H. Simon și constă în aceea că sistemele complexe se dezvoltă din sisteme simple, mai rapid, dacă există niște forme intermediare stabile, iar sistemele complexe rezultate sunt niște ierarhii (în sens general). A doua observație, făcută de Koestler în analiza ierarhiilor și a formelor intermediare stabile, este că, deși părțile și “sub-întregii” se pot diviza în “întregi” și “părți” nu există nicăieri în sens absolut.

Conceptul de holon indică faptul că fiecare “sub-întreg” acționează conform principiului lui Ianus: el cooperează cu alte elemente pentru alcătuirea unui întreg mai mare (sau pentru rezolvarea unei probleme mai complexe) și, în același timp, acționează pentru realizarea țelului propriu, tratând situațiile apărute mai sus. Holonul apare astfel ca o formă intermediară, caracterizată prin stabilitate proprie și, în același timp, prin tendința de combinare. Celor două fațete le corespund atributele de autonomie și respectiv cooperare.

Structura organizațională a societății holonice sau holarhie oferă avantajele pe care structura monolitică nu o are: sunt robuste în a interacționa la perturbații interne și externe, sunt eficiente în folosirea resurselor și se pot adapta la schimbările de mediu. Ideea lui Koestler a fost aplicată în domeniul sistemelor de manufacturare, unde caracteristicile holarhiilor și anume: stabilitate, adaptabilitate, flexibilitate și eficiența motivează o proiectare a structurii pentru procesele de manufacturare.

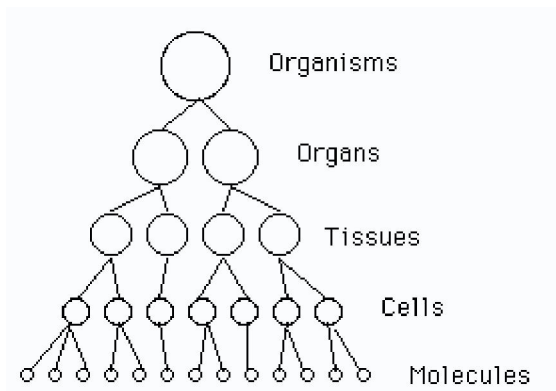


Fig. 9 Holarhia organism

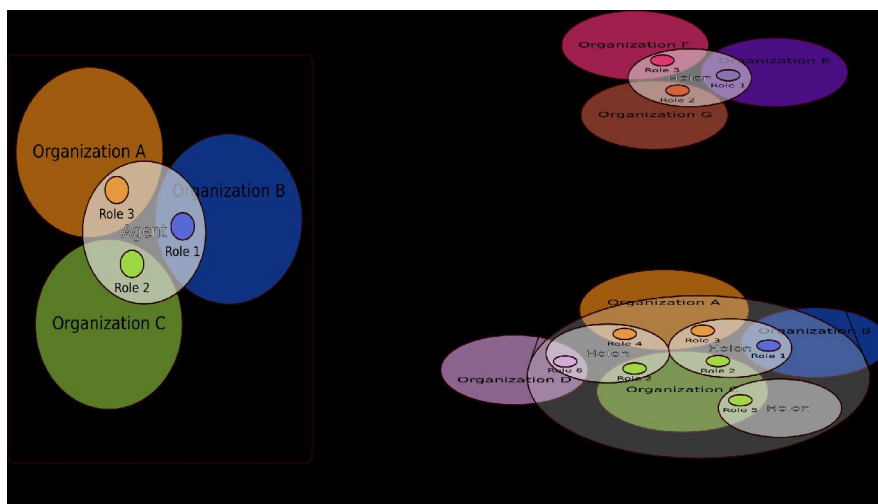


Fig.10 Sistem de organizare holonic [ASPECS 2008]

### 1.2.2 Sisteme de fabricație holonice

Sistemele de manufacturare holonice (Holonc Manufacturing Systems – HMS) sunt caracterizate de atributele holonice: autonomie, cooperare, planificare, autoidentificare. Într-un sistem de manufacturare holonic, holonul este reprezentat de o parte de procesare, uneori și de o parte fizică, care este responsabilă pentru transformarea, transportarea, stocarea și validarea

informațiilor, cât și a obiectelor fizice. Holonii din sistemele de manufacturare pot fi construiți în mod recursiv din alți holoni. Agenții holoni îi putem defini folosind principiul bazat pe sistemele multi-agent, ca fiind o entitate compusă atât din elemente informaționale cât și din elemente hardware.

Partea informațională din holon, referindu-ne strict la sisteme de manufacturare holonice, este reprezentată de un agent. Un sistem multi-agent este reprezentat de o colecție de agenți, independenți, fiecare dintre ei având un anumit grad de autonomie cu privire la acțiunile sale și percepție a mediului. Domeniul sistemelor multi-agent este parte din ramura inteligenței artificiale distribuite, ceea ce înseamnă că acest sistem rezolvă problema, împărțind-o în mai multe taskuri, care urmează a fi îndeplinite de mai multi agenți.

Conform ideii lui Parsons, un agent este o entitate care are un scop și manifestă o comportare proprie. Comportarea este abilitatea de a schimba starea mediului, care este perceput de agent conform propriilor reguli și definește situația în care se află.

Bratman își fundamentează descrierea agentului bazându-se pe analiza comportării umane, raționale, având în vedere trei categorii mentale: convingere, dorință și intenție, interconectate prin diferite cerințe. Dezvoltând aceste concepte, Cohen și Levesque, Rao și Georgeff au formulat o teorie a convingerii, dorinței și intenției (în literatură găsim termenul numit teoria BDI – Belief, Desire and Intention), care asociază aceste noțiuni mentale cu agenții. Shohan caracterizează termenul agent - “o entitate a cărui stare este văzută ca fiind constituită din componente mentale, cum ar fi convingeri, capabilități, alegeri și previziuni”. El propune o schemă computațională pentru programarea orientată pe agent, care extinde paradigma programării orientate pe obiecte cu aceste noțiuni mentale. Russell și Norvig [Stuart 1998] definesc un agent ca fiind “orice care poate fi observat ca percepe mediul prin intermediul senzorilor și acționează în acesta, prin intermediul efectorilor”. Lange oferă o definiție mai pragmatică, care este orientată pentru a satisface necesitățile din industrie. El definește un agent ca fiind “ un obiect software care are următoarele proprietăți: reactivitate și autonomie, cu privire la acțiunile proprii”. Opțional, un agent poate fi comunicativ și capabil să învețe.

Wooldridge și Jennings caracterizează un agent cu următoarele proprietăți:

- **autonomie**, în legătură cu stările și acțiunile sale;
- **sociabilitate**: agenții comunică cu alți agenți prin intermediul unui limbaj comun;
- **reactivitate**: agenții răspund la schimbările de mediu;

- **pro-activitate:** agenții dezvoltă o comportare bazată pe atingerea telului pe lângă reacția directă la mediu.

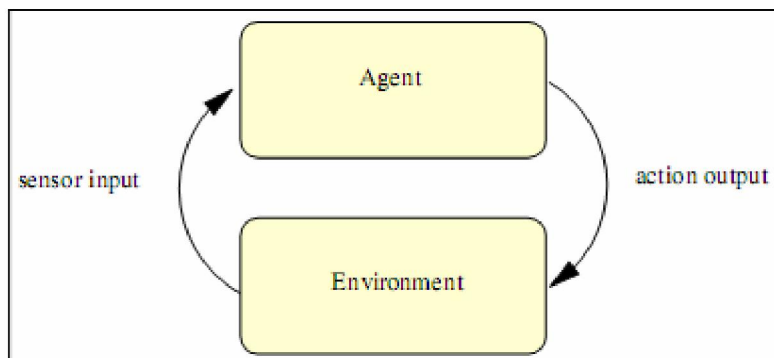


Fig. 11 Interacțiunea unui agent cu mediul

Este universal acceptat că inteligența distribuită, ca proprietatea de baza a agenților este autonomia lor.

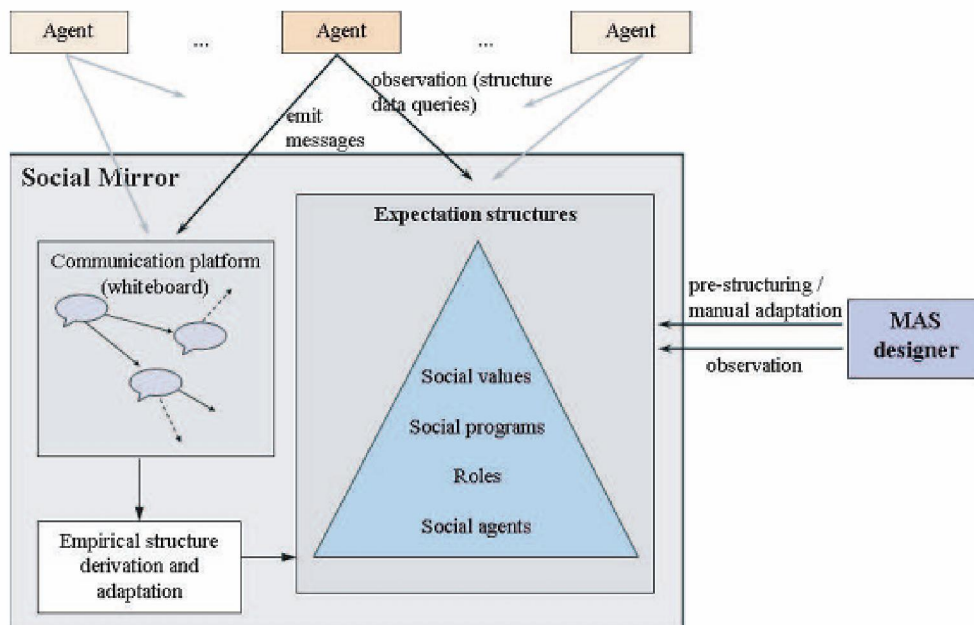


Fig.12 Sistem multi-agent

Sistemul de fabricație hologic (Holonc Manufacturing System – HMS) păstrează stabilitatea ierarhiilor pure și exploatează flexibilitatea dinamică a sistemelor heterarhice. HMS este o holarhie care integrează întreaga gamă de activități privind fabricația, incluzând acceptarea

comenzilor, proiectarea, producția și activitățile de marketing, în scopul de a realiza o întreprindere de fabricație agilă.

În toate sistemele multi-agent trebuie să existe un limbaj și un protocol care sunt utilizate de agenți în momentul interacțiunii. Printre multe altele, protocoalele existente sunt: KIF (Knowledge Interchange Format) pentru conținut și este utilizat pentru transmiterea mesajelor, KQML (Knowlegde Query and Manipulation Language) pentru formatul mesajelor și COOL (COOrdination Language) pentru coordonare (acțiunile agenților sunt interdependente și pentru atingerea unui scop comun acestea trebuie coordonate). Odată cu adăugarea comunicării ca o capacitate a agenților, este posibil să considerăm aceste abilitate ca o acțiune, care nu este diferită de alta. Când un agent transmite informații unui alt agent are un efect similar oricărei alte acțiuni transmise. Scopul sistemelor de manufacturare holonic este de a proiecta sisteme de manufacturare modulare și standardizate, concepute din părți interschimbabile, pentru a permite sistemelor de producție să fie reconfigurabile și cu capacități de autoorganizare. Așa cum am arătat mai sus, domeniul inteligenței artificiale distribuite a dovedit că teoria sistemelor multi-agent este potrivită pentru implementarea conceptelor holonice.

### 1.2.3 Proiectarea sistemului holonic

Un holon este o entitate autonomă, fiind considerat un tot care poate include sub-holonii, având caracteristici înrudite și, în același timp, să fie parte a unui holon mai întins. Bazându-se pe considerațiile lui Koestler și OEH, agregarea holonilor și relațiile dintre ei cu structură holonică poate fi exemplificată ca în figura 13, unde entitatea de bază se adresează la holonul de referință. Aceasta structură permite o distincție clară între toate entitățile incluzând arhitectura.

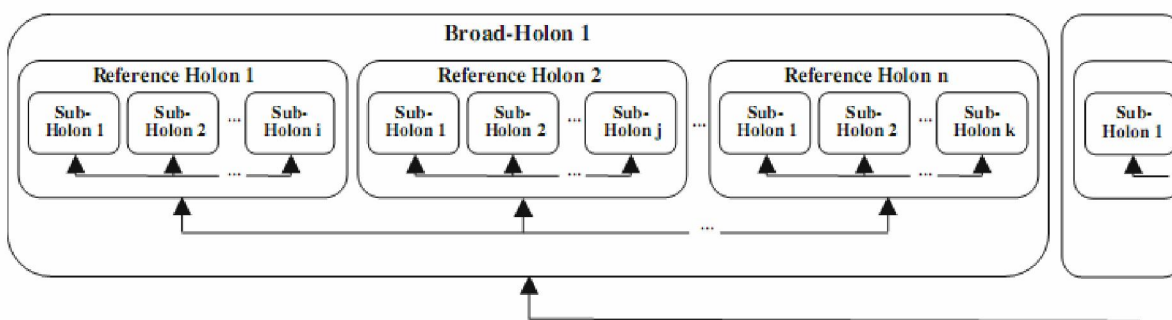
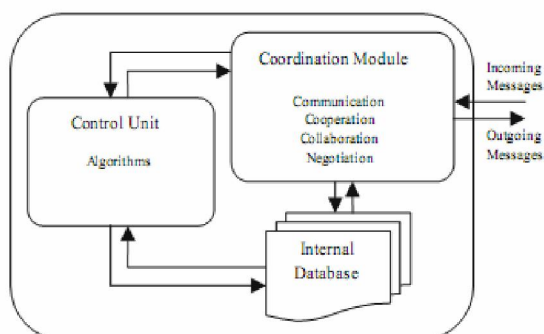


Fig. 13 Sistem de holoni

Pentru a proiecta arhitectura de control a sistemelor holonice, două tipuri de standarde sunt propuse în literatura de specialitate [Christensen 2003]. Pentru nivelul de control minim (LLC), arhitectura care se referă la funcțiile de automatizare, se propune seria de standard International Electrotechnical Commission (IEC) 61499, pentru utilizarea grupului de funcții în automatizarea industrial și sistemele de control. În proiectul IMS, un progres semnificativ a fost realizat pentru proiectarea arhitecturii holonice LLC folosind IEC 61499. Aceasta alegere a fost realizată datorită capabilităților blocurilor de funcții menționate mai sus, în termenii de "flexibilitate cerută în planificarea evenimentelor și, în special, în cazul controlului în timp real" [Marik 2001]. Arhitectura de controlul de nivel înalt (HLC) se referă la interacțiunile dintre holoni și integrarea funcțiilor de automatizare în arhitectura holonică. Colecția de standarde arhitecturale pentru sistemul de agenți soft, dezvoltat în cadrul Foundation for Intelligent Physical Agents (FIPA) sunt propuse în câteva lucrări ca soluție pentru a fi folosită în proiectarea arhitecturii HLC a sistemelor holonice [Marik 2003]. Christensen [Christensen 1994] a dezvoltat un model întins al holonului care include și o unitate umană funcționând ca o resursă la fel ca și unitatea de procesare fizică, dar în același timp, schimbă informații cu mediul și poate acționa în unitatea de procesare fizică ca și unitatea de control soft. O privire detaliată a dezvoltării holonului sub programul de consorțiu HSM este prezentată de Fletcher și al. [Fletcher 2001].

Unitatea de control soft, numită și sistem de control inteligent (ICS) este mai departe detaliată pentru a include toate blocurile de construcție, cum ar fi controlerele și interfețele de comunicare cu alte componente ale holonului. Structura în straturi din blocul de funcții IEC 61499 procura holonilor din arhitectura caracterul portabil al softului, configurabilitatea și interoperabilitatea necesară pentru a acționa ca entități autonome și cooperative. Aceeași abordare a utilizării blocului de funcții în arhitectura LLC a sistemului holonic apare în câteva alte lucrări, cum ar fi Wang și alții [Wang 1998], Balasubramanian și alții [Balasubramanian 2000], Christensen [Christensen 2003]), Deen [Deen 2003], Neligwa și Fletcher [Neligwa 2003].

### Arhitectura internă a holonilor



Așa cum s-a discutat mai sus, toți holonii au o unitate de control, care e responsabilă pentru ghidarea holonilor, pentru a îndeplini obiectivele

individuale sau de grup. Bazându-se pe informație și pe algoritmi incluși în unitatea de control, un holon trebuie să fie capabil să evalueze situația sa, să reacționeze la schimbările din mediu și să decidă acțiunile cele mai apropiate care trebuie realizate și care implică sistemul de măsurare performant intern și să direcționeze holonul aproape de obiectivul său. O bază de date internă este folosită pentru a stoca cunoștințele în legătură cu arhitectura holonică, sarcini de îndeplinit și mediu de fabricație, necesar pentru a evalua corect și a executa sarcinile potențiale. O prezentare schematică a arhitecturii interne a unui holon este prezentată în figura de mai jos.

Fig. 14 Structura internă a unui holon

### **Autonomie și cooperare**

Definiția consorțiului HMS consideră autonomia și cooperarea, două caracteristici cele mai importante ale holonilor. Glanzer și al. [Glanzer 2001] au stabilit că " atunci când considerăm partea inteligentă și cooperativă a unui holon, găsim proprietăți similare cu softul agenților", astfel unitatea de baza cuprinzând MS este o alegere bună pentru a fi folosită în proiectarea sistemelor holonice. De altfel, Ulieru și al. [Ulieru 2001] au notat că, " o descompunere de sistem și analiză, bazată pe principiile holonilor propune o implementare de soft repartizată, cu entități cooperative cu executare autonomă, cum ar fi blocurile constructive". Autonomia le permite holonilor să decidă acțiunile necesare pe care trebuie să le ia, cum ar fi obiectivele individuale de executat fără consultarea altei entități supraveghetoare. Cooperarea este caracteristica care permite holonilor să se înțeleagă asupra planurilor comune și să le execute în mod reciproc. De asemenea, îi ajută pe holoni să caute ajutor în cazul unei proaste funcționări, apărută după începerea executării unui plan comun.

## Relații între entitățile din sistemul holonic

Holonii care formează arhitectura holonică au nevoie de protocoale și metode de schimb a informațiilor și coordonării acțiunilor, pentru a îndeplini obiectivele individuale sau ale sistemului deschis. O serie de termeni sunt definiți în literatura MAS, în legătură cu potențialul relațiilor între entități în arhitecturile pe baza de agent, dintre care cei mai utilizați sunt: coordonare, comunicare, cooperare, colaborare și negociere. În figura 15 se arată relațiile și caracteristicile de suprapunere ale acestor arhitecturi pe baza de holon. Definițiile și caracteristicile acestor relații prezentate mai jos sunt dezvoltate după o examinare vastă a literaturii disponibile.

*Coordonare.* Chiar și un obiectiv optimal global nu poate fi atins într-o structură descentralizată, ar fi câteva constrângeri care trebuie satisfăcute, în ordine pentru ca sistemul să găsească o soluție convenabilă. Mișcările coordonate de nivel înalt deplasează sistemul satisfăcând aceste constrângeri.

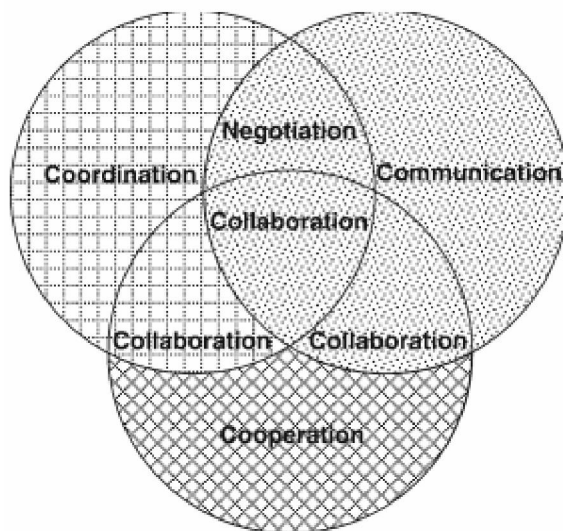


Fig. 15 Diagrama care arată relația între entități într-un sistem holonic

*Comunicare.* Contrar descentralizării arhitecturii sistemelor holonice, entitățile care cuprind arhitectura au nevoie să efectueze un schimb de informații, pentru a satisface



constrângerile sistemului și de a atinge scopurile sistemului. Comunicare este mijlocul principal pentru schimbul de informații în MAS și în mare parte implică date. Comunicarea face posibilă coordonarea și cooperarea, deși ambele procese se pot petrece fără comunicare și este necesară în procesul de negociere. Deoarece MAS este unealta prin care se execută sistemele holonice, comunicarea dintre entități în sistemele holonice este bazată pe metodele de comunicare agent și protocoalele utilizate în MAS. Metodele de comunicare din MAS includ mesaje sau un plan de transmitere, schimb de informație printr-un repertoriu de date împărțite sau o comunicare de nivel înalt [Shen 2001].

Metoda de transmitere a mesajului este bazată pe schimbul de mesaje de-a lungul entităților din arhitectură și este cea mai utilizată abordare pentru comunicarea în MAS. Transmiterea mesajului, cea mai cunoscută metodă este Contract Net Protocol (CNP) dezvoltată de Smith [Smith 1980]. CNP oferă procedurile pentru majoritatea nevoilor de comunicare în arhitectura agenților distribuiți, cum ar fi anunțarea sarcinii și primirea, mecanismul de ordin, decernarea și procesarea contractului și negocierea [McFarlane 2000].

*Cooperarea.* Cooperarea este procesul, voluntar sau nu, care rezultă din acțiuni comune care mișcă entitățile implicate în acest proces mai aproape de scopul comun. Doran și al. [Doran 1997] declarau că în MAS cooperarea înseamnă "a acționa cu altul sau alții pentru un scop comun sau pentru beneficii comune." Uneltele pentru atingerea cooperării, prezentate în literatura DAI, includ coaliția agenților și adunarea lor, comunicarea, împărțirea sarcinilor și a resurselor și rezolvarea conflictului prin negociere [Shen 2001]. Când există o intenție voluntară de schimb de date, cu scopul atingerii scopului comun, cooperarea se referă uneori la colaborare, în literatura. Dar, de fapt, colaborarea este o formă a cooperării, în care agenții din MAS schimbă în mod voluntar informațiile pentru atingerea scopului comun.

Talukdar [Talukdar 1999] prezintă o serie de reguli de colaborare între agenții soft autonomi, unde colaborarea este definită ca "schimb de date între agenții care procesează informațiile, fără deosebire ce schimb este productiv sau nu" și o serie de linii de ghidare despre cum aceste reguli pot fi extinse în sistemele din lumea reală, în timp real.

*Negocierea.* După cum spune și numele, negocierea este procesul de stabilire al unui set aprobat de acțiuni care înaintează sistemul sau o parte din el, dintr-o situație de conflict către un

scop comun. În funcție de arhitectura și obiectivul MAS, procesul de negociere poate fi necesar între orice tip de entitate din arhitectura. În literatura sistemelor holonice, negocierea este în unele cazuri un termen asociat cu sarcina de alocare. În această abordare, negocierea se referă strict la rezolvarea conflictului, deci protocoalele de negociere apar atunci când e ceva de negociat. Conflictele dintre holoni pot rezulta din câteva motive, cum ar fi: obiective diferite, cai diferite de a realiza acțiuni specifice, sau evaluări incorecte ale capabilitatilor resurselor de fabricație.

Tehnicile de rezolvare a conflictelor folosite pentru sistemele holonice sunt acelea folosite în MAS și includ o negociere compromisă, unde o soluție este în final acceptată prin schimbarea valorilor de-a lungul unor dimensiuni până când un punct comun este atins, negocierea integrată, unde o soluție este găsită prin identificarea obiectivelor comune cele mai importante ale tuturor agenților și teoria jocului bazată pe negocieri [Shen 2001].

### **Aplicațiile conceptului holonic**

Câteva încercări de a aplica principiile holonice în sistemele de fabricație existente, cum ar fi sistemele de fabricație flexibile (FMS), pentru a le îmbunătăți sensibilitatea la evenimente neprevăzute și atingerea lipsei de toleranță sunt prezente în literatură. Overmars și Toncich [Overmars 1996] au sugerat o metoda de a aplica abordarea holonică în FMS prin detectarea dinamică a resurselor de fabricație pentru orice piesă dată care intră în sistem. Aceeași idee, aplicând conceptul holonic pentru planificarea FMS este gândită de către Cheung și alții [Cheng 2001] și de Lun și Chen [Lun 2000]. Jarvis și alții [Jarvis 2003] au prezentat un proces de migrație dintr-un sistem de control existent într-o stare intermediară pentru fabricarea unor motoare auto și componente ale motorului. Fu-Shiung Hsieh [Fu-Shiung 2008 a] analizează capacitatea sistemelor holonice de a face față erorilor prin intermediul rețelelor Petri. Același autor [Fu-Shiung2 2008 b] propune o arhitectură și o metodă de optimizare pentru sistemele de manufacturare. Sunt autori [Seilonen 2008] care propun proiectarea sistemului de automatizare bazat pe sisteme multi-agent. Se propune o platformă agent pentru automatizarea procesului folosind extensii specifice a platformei FIPA.

În stadiul intermediar, cadrul de muncă holonic și conceptul orientat pe părți coexistă cu infrastructura existentă. Rezultatele obținute până acum în implementarea stadiului intermediar

arată că este nevoie de o cercetare mai amănunțită pentru ca toate sculele să aibă nevoie de migrație la un sistem holonic real, obiectivul final al cercetării. Alte strategii de migrare în sistemele existente către sistemele holonice sunt considerate ca soluție primă și simplă de implementare. Strategiile includ utilizarea capabilităților de diagnostic și reconfigurare limitată asociată cu sistemele existente [Gayed 1998], tranzițiile sistemelor CIM existente la sisteme holonice, utilizând aplicația holonilor la arhitectura CIM existentă [Chirn 2000], holonizarea resurselor existente prin incorporarea unităților de control pentru fiecare resursă [Monostori 2003] sau tranziții ale celulelor de fabricație existente la celulele holonice [Chirn 2000] (figura.17). Paolo [Paulo 2007] a prezentat o abordare holonică la planificarea manufacturării dinamice, pentru a obține o optimizare globală .

Același autor, alături de Restivo și Leitao [Leitao 2006, Leitao 2005] au contribuit la dezvoltarea proiectului Adaptive Holonic Control Architecture (ADACOR) pentru sisteme de manufacturare distributive care combină capacitățile fiecărui holon pentru a atinge condiția de responsabilitate la schimbarea sistemelor de fabricație. Bazându-se pe caracteristicile holonului Fan-tien și alții [Fan-Tien 2004] propun soluția bazată pe conceptul de holarhie de organizare la nivel de fabrică (fig.16) Mert și Majid [Mert Bal 2008] sugerează o metodologie bazată pe VR (realitate virtuală) pentru a proiecta și a implementa un sistem de control holonic la nivel de fabrică.

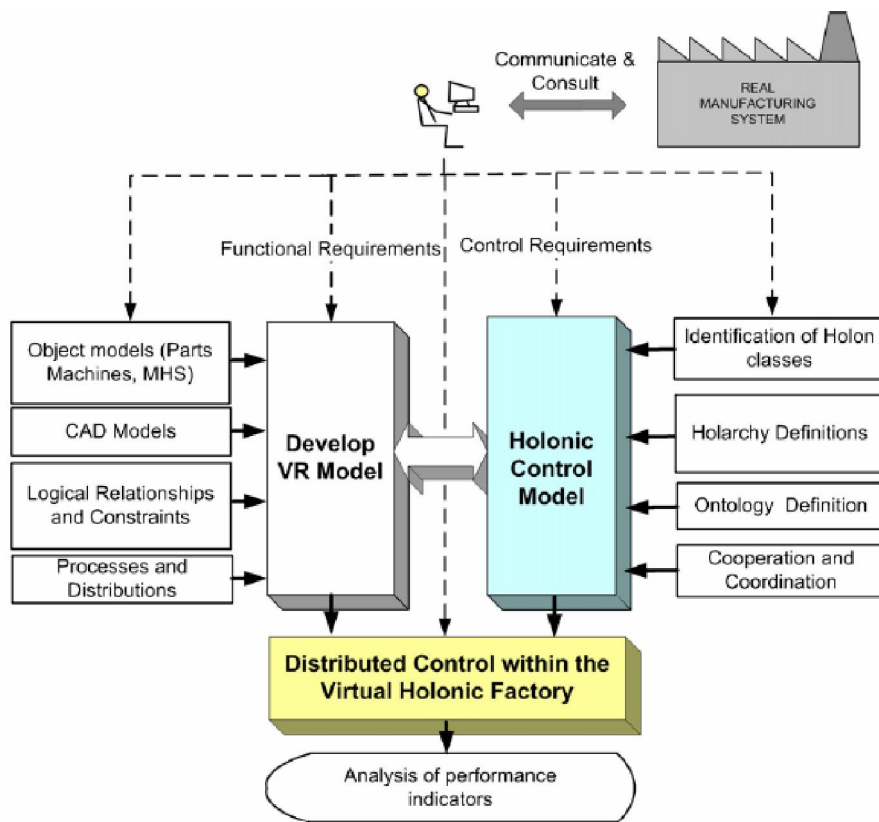


Fig. 16 Metodologia de control

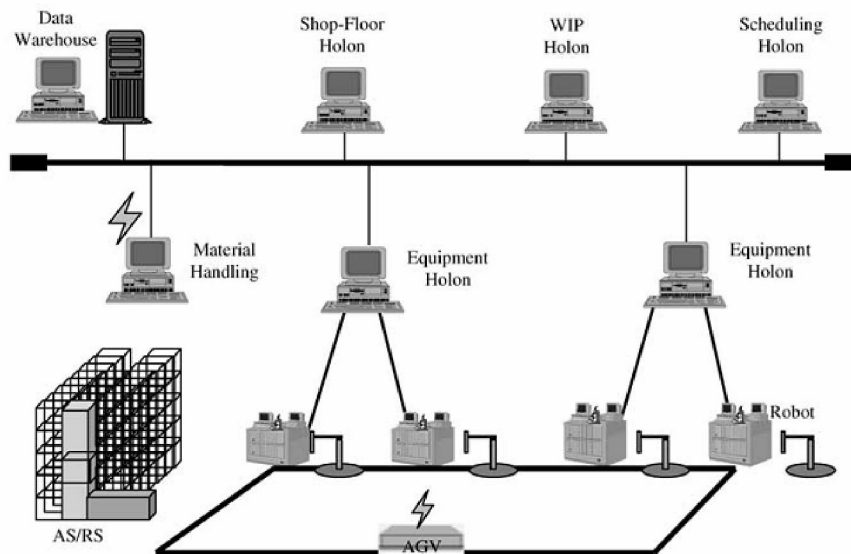


Fig. 17 Sistem holonic aplicat la conducerea unui atelier

## **Aplicațiile industriale ale sistemelor holonice**

În prezent, aplicarea industrială a sistemelor holonice este relativ scăzută. Există câteva implementări a sistemelor holonice. Sistemul holonic 'shot-blasting', prezentat de Heikkila [Heikkila 2003] este o demonstrație despre cum roboți separați pot acționa autonom și coopera, unul cu altul, pentru a îndeplini sarcinile. Proiectul Holomobiles, dezvoltat pentru sistemele existente de asamblare ale motoare din industria auto au oferit putere și sistemului [Busmann 2001]. Alte modele de implementare industrială holonică au fost relatate în literatura de specialitate. Unul este vorba despre modelul de diagnoză pe bază de holoni, dezvoltat pentru părțile de asamblare ale unui motor auto [Jarvis 2003] și al doilea este un sistem industrial automat de înmagazinare, dezvoltat de către Heragu [Heragu 2002], la care o planificare inteligentă holonică și un cadru de lucru de control sunt aplicate pentru conducerea selecției și reprovizionării. Planificarea holonică a operațiilor de producție a fost studiată de mai mulți autori [Verstraete 2006, Verstraete 2007, Valckenaers 2005, Paolo 2004]. Jose și alții [Jose 2006] prezintă tehnicile implementate în proiectul ABAS, finanțat de National Technology Agency – Finlanda și diferite companii, de simulare cu ajutorul holonilor a proiectării sistemelor de fabricație. De asemenea, Vladimir și alții [Vladimir 2007] face o trecere în revistă a problemelor ce trebuie luate în considerare pentru implementarea industrială a conceptului de inteligență distributivă. Mai mulți autori au tratat ideea de conducere bazată pe inteligența distributivă a sistemelor de fabricație [Jason 2004, Martyn 2004, Scott 2004, Teppo 2004, Francisco 2004a, Francisco 2004 b, José 2004, Chun 2004, Mohammad 2004, Misbah 2004, Pascal 2008].

### **1.3 Limbaje de comunicare între holoni**

Termenul de agenți, care se referă întotdeauna la agenții software se referă la o paradigmă pentru dezvoltarea softului, într-o lume a sistemelor de rețele, distribuite și omogene; subliniind calitatea de autonomie, adaptabilitatea și cooperabilitatea. Aceasta transformare a afectat inevitabil uneltele și metodologiile utilizate pentru dezvoltarea softului agent.

O tema importantă de-a lungul evoluției agenților a fost abilitatea lor de a interacționa (comunica) unul cu altul, astfel încât să fie capabili să lucreze colectiv pentru rezolvarea problemelor, pe care un singur agent nu poate, individual. Pentru o mare parte a comunității de

agenți, rolul de agenți dotați cu abilitatea de a comunica a fost posibil datorită Agent Communication Language (ACL)= Limbajul de Comunicare Agent. Knowledge Query și Manipulation Language (KQML), - concept apărut la începutul anilor 90 care definește gradual conceptul ACL. KQML scoate la iveală munca Knowledge Sharing Efort (KSE), lansat de cercetători, care au dorit să satisfacă ideea de interoperabilitate.

Inițial KQML nu avea nimic în comun cu noțiunea de agenți, ci era parte integrantă din problema interopeabilității. KQML putea fi sumarizat ca o colecție de mesaje care imita limbajul uman, scris în șiruri ASCII, care sunt transportate prin intermediul conexiunii TCP/IP, cu scopul de a schimba informații între sisteme software.

Specificațiile și discuțiile despre KQML la acel timp, manifestate sub influența gândirii AI, în spate stând aspectul și considerațiile, care erau semnificative. După ce un număr mare de cercetători a devenit parte din comunitatea KQML, KQML a fost disociată din KSE și noi idei au ieșit la iveală. Multe grupuri diferite au proiectat și construit sisteme multi-agent, care foloseau KQML pentru comunicarea inter-agent și o mare parte din eforturile lor s-au constituit în jurul construirii infrastructurii necesare pentru a trimite și primi corect mesaje KQML de-a lungul rețelei, dezvoltând scheme pentru numirea agenților și mecanisme de distribuție.

Al doilea ACL discutat este FIPA ACL, un limbaj dezvoltat de Foundation for Intelligent Physical Agents, primul efort organizat a constat în dezvoltarea standardelor în arie largă a agenților. În evaluarea noastră comparativă a KQML și FIPA ACL, s-a argumentat că dezvoltarea este neînsemnată la diferențele de strat semantic. Conceptul ACL, ca o sculă agent de dezvoltare s-a îmbunătățit într-un mod care trece dincolo de semantici, iar conceptul include acum noi abordări. După prezentarea problemelor de cercetare de interes, se examinează munca curentă care le este adresată.

### **Originile conceptelor de limbaj de comunicare pentru agenți**

Pentru a înțelege evoluția conceptului Limbajului de Comunicare Agent este necesar înțelegerea contextului care a dat naștere la KQML. KQML a fost mai întâi introdus ca unul dintre rezultatele KSE (Knowledge Sharing Efort) [Ramesh 1997], care a influențat eforturile curente în abordările comunicării inter-agent. KSE a început ca o cercetare în jurul anilor '90, cu sprijinul agențiilor guvernamentale ale S.U.A. ( în special DARPA). KSE a fost activ, apoi cinci ani și s-a bucurat de participarea a multor cercetători din universitate și industrie; cercetătorii reprezentau ramuri variate din comunitatea AI. Scopul său era să dezvolte tehnici, metodologii și unelte software pentru agenți, în special agenții inteligenți, sunt un exemplu important de astfel

de sisteme bazate pe cunoaștere (knowledge-based) (alte exemple sunt de tipul sisteme expert sau baze de date). Atitudinile propoziționale sunt trei părți cu legături între ele:

- un agent,
- un conținut, care are o propoziție ( de exemplu: afară plouă) și
- un limbaj

Se folosește abrevierea ACL pentru a se referi la toate aceste trei părți dar și la comunitatea ACL. Un agent poate avea un set finit de atitudini propoziționale în legătură cu propoziția ( de exemplu: a crede, a afirma, a se teme, a se întreba, a spera, etc.).

Modelul KSE include trei straturi de reprezentare:

- 1- specificarea atitudinilor propoziționale;
- 2- specificarea propozițiilor - de obicei se numește stratul conținut (propozițional) și
- 3- specificarea ontologiei acestor propoziții.

În concordanță, KSE include o componentă ( cu limbajul asociat) pentru fiecare din acestea: Knowledge Query and Manipulation Language (KQML) - pentru atitudini propoziționale, Knowledge Interchange Format (KIF) [FIPA 1997] (Format de Cunoaștere Interschimbabil) - pentru propoziții și limbajul ontologic. În cadrul abordării KSE, cele trei straturi sunt privite independent unul de altul.

### **KQML: Conceptele ACL**

Actualele ACL sunt KQML, sunt multe dialecte și variante, și FIPA și ACL. KQML ilustrează conceptele de bază ale acestora. Cu excepția lui ACL, varianta KQML care atribuie lui KIF ca limbaj de conținut, toate dialectele KQML și FIPA ACL urmăresc conceptele de bază ale KQML, care au fost abordate aici. KQML este un limbaj de comunicare cu mesaj orientat și protocol, de nivel înalt, pentru schimbarea independentă a informațiilor sintaxei contextului și a ontologiei potrivite. Astfel, KQML este independent de mecanismul de transport (TCP/IP, SMTP, IOP, etc.), independent de limbajul de conținut (KIF, SQL).

Conceptual, se pot identifica trei straturi într-un mesaj KQML: conținut, comunicare și mesaj:

- Stratul de conținut cuprinde conținutul mesajului actual în limbajul propriu de reprezentare al programului. KQML poate produce orice limbaj de reprezentare, incluzând limbajele exprimate ca șiruri ASCII și cele exprimate utilizând notația

binară. Fiecare implementare KQML ignoră mesajul de conținut fragmentat, exceptând determinarea sfârșitului mesajului.

- Stratul de comunicare codează o serie de caracteristici către mesajul care descrie parametrii de comunicare de nivel mic, ca de exemplu identitatea expeditorului și destinatarul și o identificare unică asociată cu comunicarea.
- Stratul de mesaj, care codează un mesaj pe care o aplicație îl transmite alteia, este centrul (inima) KQML. Acest strat determină tipurile de interacțiuni care pot exista la un agent KQML. Funcția stratului de mesaj este de a identifica actul de vorbire sau ceea ce expeditorul atașează la conținut.

### **Semantica**

La începuturile sale de utilizare, KQML a existat doar cu o descriere semantică informală.

Criticii au identificat una din greșelile sale [Philip 1995]. În ultimii ani, cercetătorii au pus bazele pentru a elabora o semantica formală. În alte lucrări [Yannis 1996] [Rafael 2006], s-a studiat semantica KQML în termenii condițiilor preliminare, finale și condițiilor de completare pentru fiecare criteriu de performanță..

### **The Foundation for Intelligent Physical Agents (FIPA)**

The Foundation for Intelligent Physical Agents (FIPA) este o fundație nonprofit care își propune să promoveze succesul aplicațiilor bazate pe agenți și serviciile. Scopul fundației FIPA este de a oferi specificațiile care măresc inter-operabilitatea de-a lungul sistemelor bazate pe agenți. După cum sugerează descrierea, FIPA este o organizație de standarde în cazul agenților soft. Organizația a inclus la început cuvântul "Physical" în denumirea sa, pentru a cuprinde varietatea de roboți agenți. Ulterior, prezența adjectivului a servit ca un memento, prin care agenții umani și interacțiunea cu ei sunt parte din scopul asociației. FIPA realizează colaborări internaționale cu membrii organizației, care sunt companii și universități active în domeniu.

Companiile de tehnologie europene și din Orientul Îndepărtat au fost cei mai activi participanți, incluzând Alcatel, British Telecom, France Telecom, Deutsche Telecom, Hitachi, NEC, NHK, NTT, Nortel, Siemens, și Telia.

### **FIPA ACL**

Limbajul de comunicare al agenților FIPA, cum ar fi KQML, formează teoria actului de vorbire: mesajele sunt acțiuni sau acte comunicative iar intenția lor este de a realiza o acțiune



prin trimitere virtuală. Specificarea FIPA ACL constă dintr-un set de mesaje și descrierea lor pragmatică, care are în vedere efectele atitudinilor mentale ale agenților expeditor și destinatar. Specificația descrie fiecare act de comunicare cu ambele forme, narativa și semantica, bazate pe o logica modală. Mai prevede și descrierea normativă a setului de protocoale de interacțiune de nivel înalt, incluzând cerința de acțiune și alte tipuri de acțiune. FIPA ACL este superficial similară cu KQML. Sintaxa sa este identică cu KQML. Astfel, păstrează abordarea KQML a separării limbajului exterior de limbajul intern. Limbajul extern definește semnificația mesajului destinat; limbajul intern sau conținutul, denota expresia prin care interlocutorii își exprimă convingerea, dorința și intenția, așa cum e descris în semnificația primitivă de comunicare. În FIPA ACL, comunicările primitive sunt denumite acte de comunicare. În ciuda diferenței în denumire, criteriul de performanță KQML și actele de comunicare FIPA ACL sunt același lucru. Vladimir și alții [Vladimir 2007] face o trecere în revistă a limbajelor de comunicare între agenți și comunicarea într-un sistem de manufacturare condus de controlere PLC.

#### **1.4 Sistemele CAD/CAPP/CAM actuale**

Odată cu invenția mașinilor CNC din anii 1950, s-au realizat dezvoltări enorme în cazul capacităților, preciziei și vitezei mașinilor. Astăzi fabricile care produc mașini cu 5 axe sunt capabile să prelucraze cu precizie părți complexe într-un timp foarte scurt, față de timpul necesar pe mașinile anterioare. În ciuda acestor progrese, în fabricile de mașini limbajul de programare utilizat este neschimbat, același din anii 1960. Aceste limbaje de programare bazate pe coduri G&M, reprezentate de standardul ISO 6983 sunt folosite pentru a defini mișcările sculei și operații simple de schimbare, pentru programarea de nivel mic a controlerelor CNC. O realizare la nivel internațional este efectuată în direcția dezvoltării unui nou model și a unei noi abordări pentru programarea mașinilor CNC, care deschid calea cercetării posibilităților lor avansate cu o mare ușurință și eficiență. Aceasta platformă este reprezentată de limbajul STEP-NC.

STEP-NC înlocuiește tradiționalele coduri G&M folosite la programarea mașinilor cu o structură de date ierarhică, care conține geometria produsului și pașii de lucru necesari pentru procesare. În timp ce programele compatibile ISO 6983 conțineau informații despre construirea pe părți, conținutul noii structuri de date indică ceea ce e necesar de efectuat pentru ca produsul să fie fabricat. Conform standardului STEP-NC, planul de lucru principal pentru fiecare piesă este compus din câțiva pași de lucru. Pentru a atinge performanța maximă în STEP-NC, este

necesar să definim pașii de lucru existenți cuprinși în modelul de date ierarhice, în ordinea optimă. Una din funcțiile importante ale sistemului de planificare a procesului este de a detecta conflictele și de a planifica eficient interacțiunile dintre pașii de lucru și de a obține ordinea optimă. Astfel este de dorit să existe un sistem automat capabil să planifice procesul de fabricare a fiecărei părți în mod optim.

În ISO 6983, standardul curent pentru controlul numeric, mișcările mașinii sunt definite în codurile G și instrucțiunile de schimbări simple sunt rezolvate folosind codurile G. Această metodă de programare a mașinii, cauzează pierderea informațiilor inițiale, care descriu produsul de-a lungul procesului de fabricare. Geometria produsului, desenată cu ajutorul softului CAD, este trecută în softul CAPP și CAM, instrucțiunile de traiectorie a sculei și schimbările specifice unei mașini individuale, sunt generate pentru a optimiza efortul de fabricare. Ieșirea în cazul sistemului CAM constă doar din descrierea de nivel inferior a traiectoriei sculei, cu toate caracteristicile geometrice și toleranțe. Există totuși un număr de probleme inerente la acest proces tradițional, una dintre ele fiind fluxul de date unidirecțional [Xu 2004]. Aici, informația generată în sistemul CAD este trecută în sistemul CAPP și apoi în sistemul CAM și în final, la controlerul mașinii pentru fabricare. Ca rezultat, la setul de date unidirecțional, schimbările efectuate în partea finală a programului generate de sistemul CAM în atelier nu sunt reflectate în produsul model existent în sistemele CAD/CAM. STEP-NC permite un flux bidirecțional a datelor. Deoarece caracteristicile și geometria pieselor nu sunt pierdute în procesul de fabricație, schimbările în atelier sunt imediat reflectate în modelele CAD/CAM, în figura 18 este prezentată diferența fundamentală.

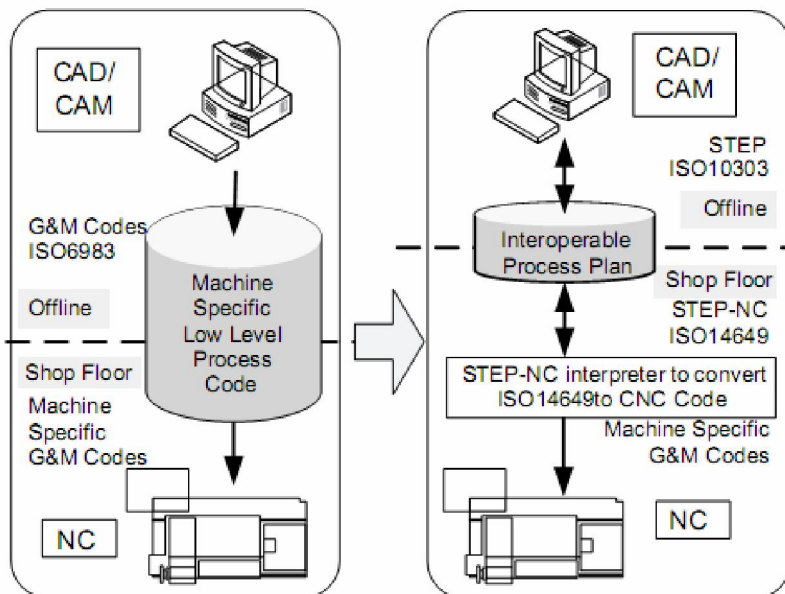


Fig. 18 Circulația informației în sistemul STEP-NC [Nasehi 2005]

### Stadiul actual al integrării CAD/CAM/CNC

CIM (Computer Integrated Manufacturing este de obicei folosit pentru a se referi la orice sistem tehnologic bazat pe calculator și utilizat în industrii variate. CIM include proiectarea asistată de calculator – computer aided design (CAD), fabricarea asistată de calculator - computer-aided manufacturing (CAM), fabricarea integrată pe calculator-computer-integrated manufacturing (CIM), controlul numeric pe calculator - computer numerical control (CNC), automated material handling (AMH), automated storage and retrieval system (AS/RS); and automated guided vehicles systems (AGVS).

În plus față de sculele mașinii de proiectare și fabricare, CIM include tehnici asistate de calculator pentru managementul de fabrică, cum ar fi sistemul de informații de management (MIS), planificarea procesului asistat de calculator (CAPP), planificarea necesarului de material (MRP), inteligența artificială (AI), etc. Starea curentă de cerințe este că CIM va determina o creștere industrială a întregii lumi în ultimele decade. Computer-aided design (CAD), computer-aided manufacturing (CAM), flexible manufacturing systems (FMS), robotii, împreună cu sistemele de cunoaștere și cele bazate pe informații și rețelele de comunicații se dorește să atingă o stare matură pentru a răspunde eficient la cerințele de management ale fabricilor. Așa cum arată Petros [Petros 2006] efectul folosirii mediului CAD/CAM în dezvoltarea firmelor este unul deosebit sub aspectul performanțelor. De asemenea, Sev și Grier [Sev 2008] subliniază importanța conceptului de CIM.

În mod curent, pentru o firmă de producție, a fabrica un produs pe mașini diferite cu controlere diferite și configurații de scule, fișierele CAD sunt trimise sucursalelor companiei. Fișierele sunt apoi interpretate de către ingineri iar planurile de proces sunt generate în concordanță cu configurația particulară [ISO 1982, Hardwick 2001]. În figura 19 este prezentat un lanț tipic de integrare CAD/CAPP/CAM/CNC, folosit în mod curent. În acest lanț, partea de proiectare este calculată folosind un soft CAD. Desenul CAD este apoi trecut pe softul CAPP/CAM, folosind unul din standardele din industrie, de exemplu IGES, DXF sau STEP. Softul CAPP/CAM determină apoi traiectoria sculei necesară pentru a fabrica piesa bazată pe o mașină predefinită, configurația controlerului și a sculei. Un inginer de producție urmărește procesul de generare al traiectoriei sculei și apoi verifică instrucțiunile generate, trecându-le apoi printr-un post procesor, care realizează optimizarea instrucțiunilor. Rezultatul este un fișier de instrucțiuni, care este executat de controller. Piesa este apoi fabricată prin executare secvențială a instrucțiunilor. Este de notat că pentru fiecare configurație a mașinii, inginerul de producție trebuie să urmărească și să verifice generarea traiectoriei sculei.

În timp ce această categorie de soluții poate fi practică în unele cazuri, sunt multe situații unde este nevoie să transmită câteva instrucțiuni specifice de fabricație împreună cu informația de geometrie a piesei, care nu este posibilă prin modelele CAD. În plus, interpretarea locală a modelelor CAD cu facilități diferite poate rezulta în planuri de proces diferite pentru o piesă. Yuan [Yuan 2008] propune un sistem de modelare a mediului integrat CAD/CAM bazat pe constrângeri.

Standardul STEP a apărut ca o platformă comună pentru transferul de date de inginerie și de fabricație. STEP-NC [Muller 2001] propune o structura de date ierarhice pentru informația de fabricație. Lanțul de integrare bazat pe planurile de proces STEP-NC a fost propus de către cercetători [Weck 2001]. Un lanț tipic de integrare se arată în figura de mai jos .

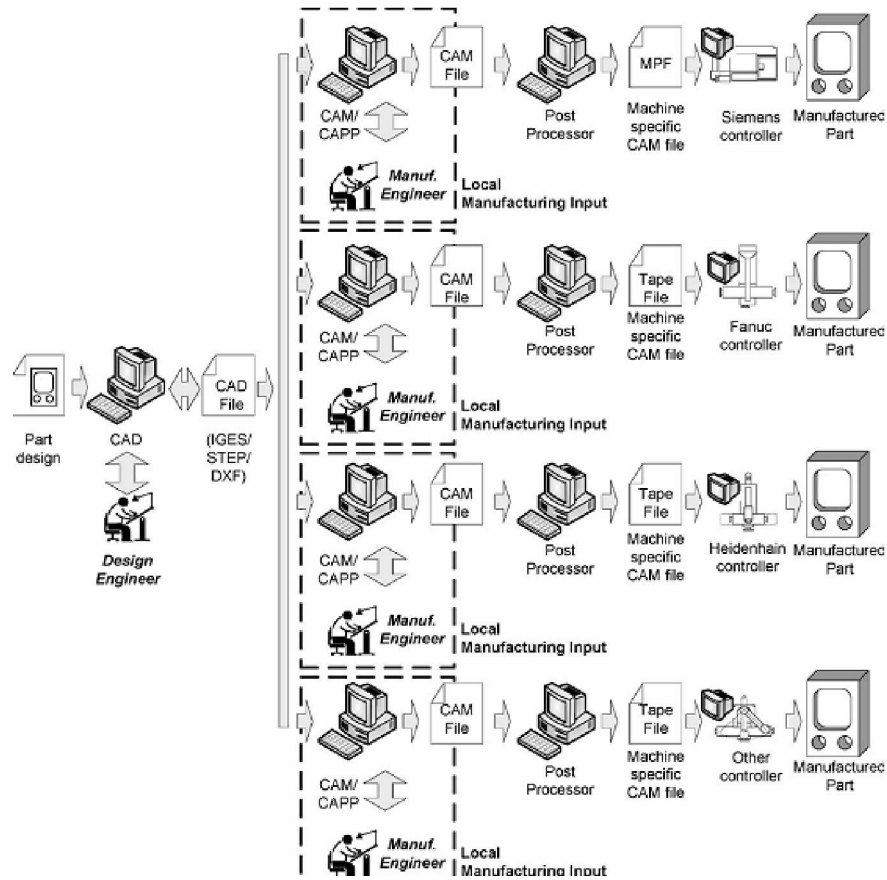


Fig. 19 Lanț de integrare CAD/CAM

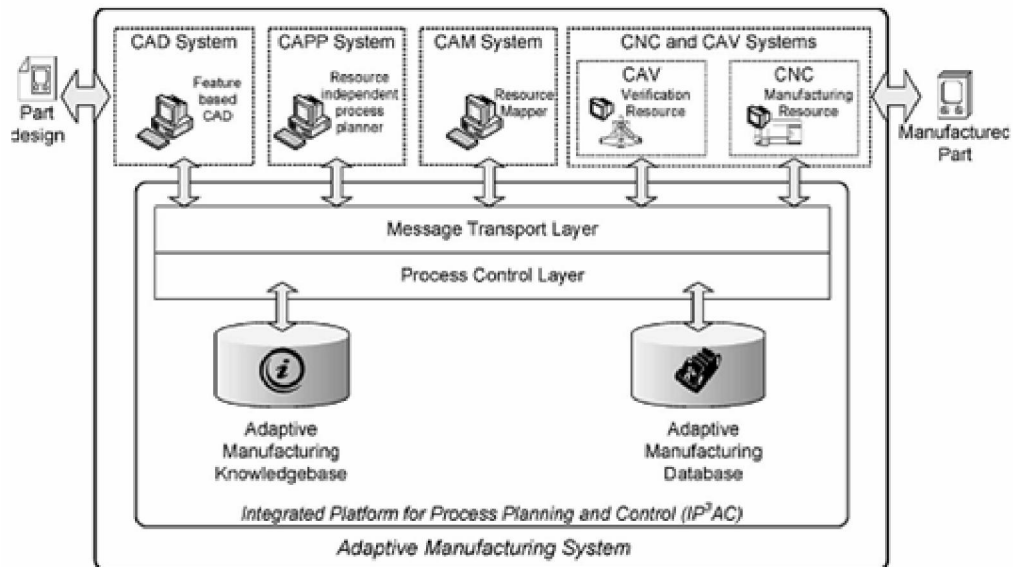


Fig. 20 Sistem adaptiv de manufacturare

În lanțul de fabricație STEP-NC, proiectarea piesei este calculată folosind un sistem CAD unde geometria piesei este construită folosind caracteristici individuale din seturi de caracteristici

bazate pe definițiile din STEP. Aceste fișiere CAD sunt apoi trecute în planificatorul de proces STEP-NC, unde un plan de proces interoperabil STEP-NC este generat [Scarcelli 2001, ISO 2003]. Acest plan este apoi trecut în interpretorul STEP-NC, unde instrucțiunile mașinii specifice sunt generate în concordanță cu conținuturile planului de proces interoperabil. În timpul utilizării planului de proces interoperabil, inginerul de producție trebuie să urmărească generarea planului de lucru pentru realizarea unei componente și apoi resursele ingineresti în exces vor fi eliminate.

Există diverse încercări de dezvoltare a STEP-NC, Suk-Hwan și alții [Suk-Hwan 2006 ] prezintă un sistem STEP-NC pentru strung (numit TurnSTEP), incluzând un model de date STEP-NC, filozofia de proiectare din spatele TurnSTEP. Modelul folosit a fost dezvoltat de o echipă de cercetare de la National Research Laboratory din POSTECH, Coreea de Sud și ISW Stuttgart University, Germania și formalizat ca ISO 14649 Partea 12 și Partea 121. Se arată mai jos informația reprezentată de program, în noul standard propus.

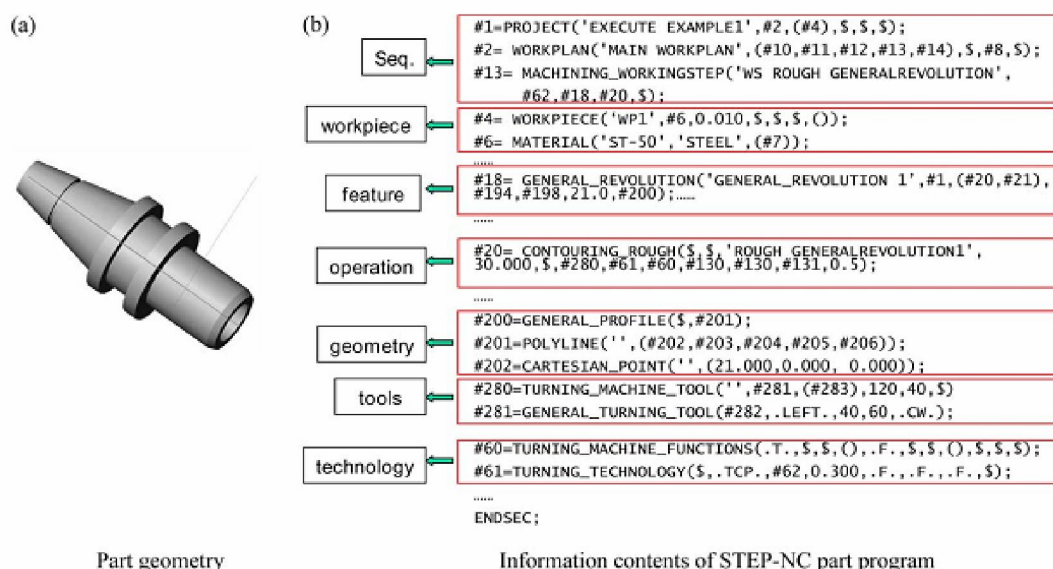


Fig. 21 Exemplu de program piesă în STEP-NC

De asemenea. Xu[Xu 2004] concluzionează că prin intermediul folosirii STEP-NC, toate informațiile din CAD/CAM și cele descriind CNC-ul pot fi stocate unitar și fiecare controler NC are acces la aceste date, iar programarea și controlul NC-ului fiind mai facil. în comparație cu limbajul G-code folosit actual, așa cum se arată în figura 22.

Diferiți autori studiază îmbunătățiri ale standardului STEP-NC, cum ar a lui Rameshbabu V. și Shunmugam M.S [Rameshbabu 2007], care au dezvoltat un sistem hibrid de recunoaștere a modelului CAD. Teoria grafurilor este folosită pentru dezvoltarea algoritmului propriu de

recunoaștere dezvoltat în limbajul C++. Există și abordări care presupun o nouă arhitectură a controlerelor pentru a implementa STEP-NC [Minhat 2008].

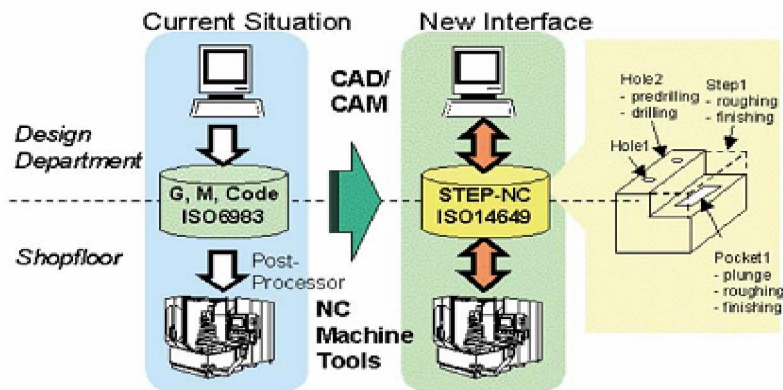


Fig . 22 Comparație programare G-code față de STEP-NC

Nassehi [Nassehi 2006] introduce conceptul de mulți agent în programare, cu ajutorul STEP-NC construiește o platforma numită MASCAPP. Astfel fiecare agent are responsabilitatea de a identifica cerințele de fabricație pentru o anumită caracteristică a produsului.

## 1. 5 Concluzii

Prezenta cercetare își propune să studieze domeniul sistemelor de fabricație reconfigurabile, având în vedere următoarele idei cheie:

- mașina de manufacturare reconfigurabilă este alcătuită din module autonome corespunzătoare pentru fiecare grad de libertate, comandate holarhic.
- geometria sculei care generează suprafața piesei prelucrate să fie periodic identificată, pe baza abordării holonice a scenei reprezentată de imaginea sculei.
- poziționarea sculei generatoare în traiectoria pe care aceasta o parcurge în scopul înfășurării suprafeței generate să fie stabilită prin poziționarea optimă și să fie determinată pe baza modelării holonice a cinematicii procesului.

Obiectivul general este ca, pe baza ideilor de mai sus, să se atingă următoarele ținte:

- dezvoltarea unei noi concepții privind dezvoltarea unei concept de control pentru sistemele de fabricație reconfigurabilă;

- dezvoltarea unei noi metode de modelare a cinematicii;
- verificarea experimentală a metodelor și conceptelor dezvoltate și conceperea unei clase de mașini de unelte reconfigurabile care să integreze rezultatele cercetărilor teoretice întreprinse în cadrul lucrării.

## Bibliografie

- Abele 2005 Abele E, Worn A, Stroh C, Elzenheimer (2005) Multi machining technology integration in RMS. Proceedings of the 3rd International CIRP Conference on Reconfigurable Manufacturing. Ann Arbor, USA, M-09, May 10–12, 2005
- 1
- Adolfsson 2002 Adolfsson J, Ng A, Olofsgard P, Moore P, Pu J, Wong C-B (2002) Design and simulation of component-based manufacturing machine systems. Mechatronics 12:1239–1258
- 2
- Adolfsson 2002 Adolfsson J, Ng A, Olofsgard P, Moore P, Pu J, Wong C-B (2002) Design and simulation of component-based manufacturing machine systems. Mechatronics 12:1239–1258
- 3
- Ahmed 2007 Ahmed M. Deif . Waguhi ElMaraghy Investigating optimal capacity scalability scheduling in a reconfigurable manufacturing system nt J Adv Manuf Technol (2007)
- 4
- Arai 2002 Arai T, Maeda Y, Kikuchi H, Sugi M (2002) Automated calibration of robot coordinates for reconfigurable assembly systems. Ann CIRP 51(1):5–8
- 5
- Asl 2000 Asl FM, Ulsoy AG, Koren Y (2000) Dynamic modeling and stability of the reconfiguration of manufacturing systems. Proceedings of the Japan-USA Symposium on Flexible Automation, Ann Arbor, Michigan
- 6
- 7 ASPECS 2008 ASPECS Laboratoire Systems et Transport France 2008, www.set.utbm.fr
- Balasubramanian 2001 Balasubramanian S, Brennan RW, Norrie D (2001) An architecture for metamorphic control of holonic manufacturing systems. Comput Ind 46:13–31
- 8
- Balasubramanian 2000 Balasubramanian, S., Zhang, X. and Norrie, D. H. (2000) Intelligent control for holonic manufacturing systems. Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers B, 214, 953–961.
- 9
- Benjaafar 2002 Benjaafar S, Heragu SS, Irani S (2002) Next-generation factory layouts: research challenges and recent progress. Interfaces 32 (6):58–76
- 10
- Bongaerts 2000 Bongaerts L, Monostori L, McFarlane D, Kadar B (2000) Hierarchy in distributed shop floor control. Comput Ind 43:123–137
- 11



- Books B 2005 Books B (2005) Assembly in aerospace features at IEE seminar.  
 12 Assem Autom 25(2):108–111
- Bussmann 2001 Bussmann, S. and Sieverding, J. (2001) Holonic control of an engine assembly plant—an industrial evaluation. Proceedings of the 2001 IEEE Systems, Man,  
 13 and Cybernetics Conference, Tucson, AZ
- Chan 1996, Chan and C. S. Lin, Development of a Computer Numerical Control (CNC) Modular  
 14 Fixture - Machine Design of a Standard Multifinger Module, Int J Adv Manuf Technol, Chan 1996
- Chen 2001 Chen L, Xi JF, Wolf A (2001) Modularization in reconfiguration design theory and methodology. CIRP 1st International Confer-  
 15 ence on Reconfigurable Manufacturing, Ann Arbor, Michigan
- Chen L 2005 Chen L, Xi F, Macwan A (2005) Optimal module selection for preliminary design of reconfigurable machine tools. Trans  
 16 ASME: J Manuf Syst Eng 127:104–115
- Cheng 2001 Cheng, F.-T., Wu, S.-L. and Chang, C.-F. (2001) Systematic approach for developing holonic manufacturing execution systems. Proceedings of the 27th  
 17 Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 261–266.
- Chirn 2000 Chirn, J.-L. and McFarlane, D. C. (2000a) A holonic component-based approach to reconfigurable  
 18 manufacturing control architecture. Proceedings of the 11th International Workshop on Database and Expert Systems Applications, 219–223
- Christensen 1994 Christensen, J. H. (1994) Holonic manufacturing systems: initial architecture and standards directions.  
 19 Proceedings of First Conference on Holonic Manufacturing Systems, Hanover, Germany.
- Christensen 2003 Christensen, J. H. (2003) HMS/FB Architecture and its implementation, in Agent-Based Manufacturing: Advances in the Holonic Approach, S. M. Deen  
 20 (ed.), Springer-Verlag, Berlin, 53–87.
- Chun 2004 Chun Wang, Hamada Ghenniwa, Weiming Shen, Yue Zhang, AGENT-BASED DISTRIBUTED COLLABORATIVE MONITORING AND MAINTENANCE IN MANUFACTURING, IFIP TC 5 / WG 5.5 Sixth IFIP International Conference on  
 Information Technology for Balanced Automation Systems in Manufacturing and Services  
 21 27–29 September 2004, Vienna
- Deen 2003 Deen, S. M. (2003) An investigation into a computational model for HMS, Agent-Based Manufacturing: Advances in the Holonic Approach, S. M. Deen  
 22 (ed.), Springer-Verlag, Berlin, pp. 147–161.

- Dong 2005 Dong Hongzhao · Liu Dongxu · Zhao Yanwei · Chen Ying  
A novel approach of networked manufacturing collaboration: fractal web-based  
23 extended enterprise, *Int J Adv Manuf Technol* (2005) 26: 1436–1442
- Doran 1997 Doran, J. E., Franklin, S., Jennings, N. R. and Norman,  
T. J. (1997) On cooperation in multi-agent systems.  
24 *Knowledge Engineering Review*, 12(3), 309–314
- Erol 2000 Erol NA, Altintas Y, Ito MR (2000) Open system architecture  
modular tool kit for motion and machining process control.  
25 *IEEE/ASME Trans Mechatron* 5(3):281–291
- Fan-Tien 2004 Fan-Tien Cheng, Chich Feng Shang Shan Lung Wu, Development of holonic  
26 manufacturing execution systems, *Journal of Intelligent Manufacturing* (2004)
- Fassi I 2000 Fassi I, Wiens GJ (2000) Multiaxis machining: PKMs and  
27 traditional machining centers. *J Manuf Processes* 2(1):1–13
- Ferraz 2005 F. Ferraz Jr · R.T. Coelho, Data acquisition and monitoring in machine tools  
28 with CNC of open architecture using internet, *Int J Adv Manuf Technol* (2005) 26: 90–97
- FIPA 1997 FIPA. FIPA 97 specification part 2: Agent communication language. Technical  
29 report, FIPA - Foundation for Intelligent Physical Agents, October 1997.
- Fletcher 2001 Fletcher, M., Brennan, R. W. and Norrie, D. H. (2001) Deadline control in  
holonic manufacturing using  
mobile agents. *Proceedings of the 12th International Workshop on Database and Expert*  
30 *Systems Applications*, 623–627
- Francisco 2004 b Francisco Maturana, Raymond Staron, Fred Discenzo, Kenwood Hall, Pavel  
Tichý, Petr Šlechta, David Scheidt,  
Michael Pekala, John Bracy, INTEGRATING MULTI-AGENT SYSTEMS: A CASE STUDY, IFIP TC 5 /  
WG 5.5 Sixth IFIP International Conference on  
Information Technology for Balanced Automation Systems in  
Manufacturing and Services  
31 27–29 September 2004, Vienna
- Francisco 2004a Francisco P. Maturana, Raymond Staron, Kenwood Hall, AN INTELLIGENT  
AGENT VALIDATION ARCHITECTURE FOR DISTRIBUTED MANUFACTURING ORGANIZATIONS, IFIP  
TC 5 / WG 5.5 Sixth IFIP International Conference on  
Information Technology for Balanced Automation Systems in  
Manufacturing and Services  
32 27–29 September 2004, Vienna
- Fu-Shiung 2008 a Fu-Shiung Hsieh, Robustness analysis of holonic assembly/disassembly  
processes  
33 with Petri nets, *Automatica* 44 (2008) 2538–2548, 2008
- Fu-Shiung 2008 b Fu-Shiung Hsieh, Holarchy formation and optimization in holonic  
manufacturing systems with  
34 contract net, *Automatica* 44 (2008) 959 – 970, 2008

- Gayed 1998 Gayed, N., Jarvis, D. H. and Jarvis, J. H. (1998) A strategy for the migration of existing manufacturing systems to holonic systems. Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 1, 319–324.
- 35 Giusti 1994 Giusti, Sanochi, Ariotti Reconfigurable assembly cell for mechanical products, Int  
36 Prod. Eng. Res, 1994
- Glanzer 2001 Glanzer, K., Hammerle, A. and Geurts, R. (2001) The application of ZEUS agents in manufacturing environments. Proceedings of the 12th International Workshop on Database and Expert Systems Applica-  
37 tions, 628–632.
- GM 2008 GM Inc., C-Flex Tooling for Welding, [http://www.automationworld.com/cds\\_photos.html?rec\\_id=769](http://www.automationworld.com/cds_photos.html?rec_id=769)
- 38 Hardwick 2001 Hardwick, M. Digital manufacturing using STEP-NC, AUTOTECH 2001 Conference & Exhibition, AIAG, August 28–30,  
39 2001, Detroit's Cobo Centre, USA.
- Heikkila 2003 Heikkila, T., Rannanjarvi, L., Sallinen, M. and Rintala, M. (2003) A holonic shot-blasting system, in Agent-Based Manufacturing: Advances in the Holonic Approach, S. M. Deen (ed.), Springer-Verlag,  
40 Berlin, 255–302.
- Heragu 2002 Heragu, S. S., Graves, R. J., Kim, B.-I. and St. Onge, A. (2002) Intelligent agent based framework for manufacturing systems control. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and  
41 Humans, 32(5), 560–573.
- Hoda 2008, Hoda ElMaraghy, Tarek AlGeddawy, Ahmed Azab, Modelling evolution in manufacturing: A biological analogy, CIRP Annals - Manufacturing Technology 57 (2008) 467–  
42 472, 2008
- Hsieh 2003 Hsieh S-J (2003) Re-configurable dual-robot assembly system design, development and future directions. Ind Rob 30(3):250–  
43 257
- Huang 2005 Huang T, Li M, Zhao XM, Mei JP, Chetwynd DG, Hu SJ (2005) Conceptual design and dimensional synthesis for a 3-DOF module of the triVariant—A novel 5-DOF reconfigurable hybrid  
44 robot. IEEE Trans Robot 21(3):449–456
- ISO 1982 ISO 6983-1 Numeric control of machines—Program format and definition of address  
45 words—Part 1: Data format for positioning, line motion and contouring control systems, 1982.
- ISO 2003 ISO 14649-10:2003 Industrial automation systems and integration—Physical device control—Data model for computerized numerical controllers—Part 10: General process data,  
46 ISO TC 184/SC 1, May 23, 2003

- 47 Jarvis 2003 Jarvis, D. H. and Jarvis, J. H. (2003) Holonic diagnosis for an automotive assembly line, in Agent-Based Manufacturing: Advances in the Holonic Approach, S. M. Deen (ed.), Springer-Verlag, Berlin, 193–206.
- 48 Jarvis 2003 Jarvis, J., Jarvis, D. and McFarlane, D. (2003) Achieving holonic control—an incremental approach. Computers in Industry, 51, 211–223.
- 49 Jason 2004, Jason J. Scarlett, Robert W. Brennan<sup>1</sup>, Francisco Maturana, Ken Hall, Vladimir Marik<sup>3</sup> and Douglas H. Norrie, IMPLEMENTATION ISSUES WITH HOLONIC CONTROL DEVICE COMMUNICATION INTERFACES, IFIP TC 5 / WG 5.5 Sixth IFIP International Conference on Information Technology for Balanced Automation Systems in Manufacturing and Services 27–29 September 2004, Vienna
- 50 Jaspreet 2007 Jaspreet Dhupia , Bartosz Powalka, Reuven Katz, A. Galip Ulsoy, Dynamics of the arch-type reconfigurable machine tool, International Journal of Machine Tools & Manufacture 47 (2007) 326–334
- 51 José 2004 José Barata , L. M. Camarinha-Matos, A METHODOLOGY FOR SHOP FLOOR REENGINEERING BASED ON MULTIAGENTS, IFIP TC 5 / WG 5.5 Sixth IFIP International Conference on Information Technology for Balanced Automation Systems in Manufacturing and Services 27–29 September 2004, Vienna
- 52 Jose 2006 Jose L. Martinez Lastraa, , Armando W. Colombo, Engineering framework for agent-based manufacturing control, Engineering Applications of Artificial Intelligence 19 (2006) 625–640
- 53 Jungtae 2006 Jungtae Mun a , Kwangyeol Ryu b , Mooyoung Jung a,,Self-reconfigurable software architecture: Design and implementation, Computers & Industrial Engineering 51 (2006) 163–173
- 54 Kalita 2002 Kalita D, Khargonekar PP (2002) Formal verification for analysis and design of logic controllers for reconfigurable machining systems. IEEE Trans Robot Autom 18(4):463–474
- 55 Kalita 2002 Kalita D, Khargonekar PP (2002) Formal verification for analysis and design of logic controllers for reconfigurable machining systems. IEEE Trans Robot Autom 18(4):463–474
- 56 Katz 2002 Katz R, Li Z, Pierrot F (2002) Engineering research center for reconfigurable machining systems: conceptual design of a high-speed drilling machine (HSDM) based on PKM module, ERC/RMS Report #37, College of Engineering, The University of Michigan, Ann Arbor, MI, March

- Katz 2002 Katz R, Li Z, Pierrot F (2002) Engineering research center for reconfigurable machining systems: conceptual design of a high-speed drilling machine (HSDM) based on PKM module, ERC/RMS Report #37, College of Engineering, The University of Michigan, Ann Arbor, MI, March
- 57 Katz 2002 Katz R, Li Z, Pierrot F (2002) Engineering research center for reconfigurable machining systems: conceptual design of a high-speed drilling machine (HSDM) based on PKM module, ERC/RMS Report #37, College of Engineering, The University of Michigan, Ann Arbor, MI, March
- 58 Katz 2003 Katz Z, van Niekerk T (2003) Implementation aspects of intelligent machining. Proc Inst Mech Eng, B J Eng Manuf
- 59 217:601–613
- Koren 1999 Koren Y, Heisel U, Joveane F, Morwaki T, Pritschow G, Ulsoy G, Van Brussel H (1999) Reconfigurable manufacturing systems. Ann CIRP 48(2):527–541
- 60 Koren 1999 Koren Y, Heisel U, Joveane F, Morwaki T, Pritschow G, Ulsoy G, Van Brussel H (1999) Reconfigurable manufacturing systems. Ann CIRP 48(2):527–541
- 61 Koren 1999 Koren Y, Heisel U, Joveane F, Morwaki T, Pritschow G, Ulsoy G, Van Brussel H (1999) Reconfigurable manufacturing systems. Ann CIRP 48(2):527–541
- 62 Koren 2005 Koren Y (2005) What are the differences between FMS & RMS [http://eclipse.engin.umich.edu/CIRP05/results/panel1/panel1\\_koren.pdf](http://eclipse.engin.umich.edu/CIRP05/results/panel1/panel1_koren.pdf)
- 63 Koren 2006 Y. Koren, General RMS Characteristics. Comparison with Dedicated and Flexible Systems, Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories 2006
- 64 Kuhnle 2001 Kuhnle H (2001) A state-time model to measure the reconfigurability of manufacturing areas - key to performance. Integr Manuf Syst 12(7):493–499
- 65 Langer 2000 Langer G, Alting L (2000) An architecture for agile shop floor control systems. J Manuf Syst 19(4):267–280
- 66 Leitao 2005 Leitao P, Restivo F. Experimental validation of ADACOR holonic control system. In: Marik V, Brennan R, Pechoucek M, editors. Holonic and multi-agent systems for manufacturing, LNAI 3593. Springer; 2005. p. 121–32
- 67 Leitao 2006 Leitao P, Restivo F. ADACOR: a holonic architecture for agile and adaptive manufacturing control. Comput Ind 2006;57(2):121–30.
- 68 Lin 2004 Lin Y-T (2004) An innovative CNC reconfigurable fixture system for agile manufacturing. IMTS 2004, Chicago, IL, USA, September 8–10, 2004. Session 214, #3210
- 69

- Lun 2000 Lun, M. and Chen, F. F. (2000) Holonic concept based methodology for part routing on flexible manufacturing systems. The International Journal of  
70 Advanced Manufacturing Technology, 16, 483–490.
- Manfredi 2006 Manfredi Bruccoleri a, , Zbigniew J. Pasekb , Yoram Korenb, Operation management in reconfigurable manufacturing systems: Reconfiguration for error handling, Int.  
71 J. Production Economics 100 (2006) 87–100
- Manfredi 2007 Manfredi Bruccoleri, Reconfigurable control of robotized manufacturing cells, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 23 (2007) 94–106  
72
- Marik 2001 Marik, V. and Pechoucek, M. (2001) Holons and agents: recent developments and mutual impacts. Proceedings of the Twelfth International Workshop on Database and Expert Systems Applications,  
73 IEEE Computer Society, 605–607.
- Marik 2002 Marik V, Fletcher M, Pechoucek M (2002) Holons & agents: recent developments and mutual impacts. In: Marik V, Stepankova O, Krautwurmova H, Luck M (eds) Multi-agent systems and applications II. Springer, Berlin Heidelberg New York, pp  
74 233–267
- Marik 2003 Marik, V., Pechoucek, M., Vrba, P. and Hrdonka, V.(2003) FIPA standards and Holonic Manufacturing, in Agent-Based Manufacturing: Advances in the  
75 Holonic Approach, S. M. Deen (ed.), Springer-Verlag, Berlin, 89–119
- Martin 2004 Martin Reháč1  
, Petr Charvát, AGENT SYSTEM APPLICATION  
IN HIGH-VOLUME  
PRODUCTION MANAGEMENT, IFIP TC 5 / WG 5.5 Sixth IFIP International Conference on  
Information Technology for Balanced Automation Systems in  
Manufacturing and Services  
76 27–29 September 2004, Vienna
- Martyn 2004 Martyn Fletcher, Michal P.MAKING A PERFECT ‘GIN  
AND TONIC’: MASS-CUSTOMISATION  
USING HOLONS, IFIP TC 5 / WG 5.5 Sixth IFIP International Conference on  
Information Technology for Balanced Automation Systems in  
Manufacturing and Services  
77 27–29 September 2004, Vienna
- McFarlane 2000 McFarlane, D. C. and Bussmann. S. (2000) Developments in holonic production planning and control.  
78 International Journal of Production Planning and Control, 11(6), 522–536.
- Mehrabi 2000a Mehrabi MG, Ulsoy AG, Koren Y (2000a) Reconfigurable manufacturing systems and their enabling technologies. Int J  
79 Manuf Technol Manage 1(1):113–130

- Mehrabi 2000b Mehrabi MG, Ulsoy AG, Koren Y (2000b) Reconfigurable manufacturing systems: key to future manufacturing. J Intell  
80 Manuf 11:403–419
- Mehrabi 2001 Mehrabi MG, Kannatey-Asibu E (2001) Mapping theory: a new approach to design of multi-sensor monitoring of reconfigurable  
81 machining system (RMS). J Manuf Syst 20(5):297–303
- Mekid2008 Mekid S., Pruschek P., Hernandez J., Beyond intelligent manufacturing: A new generation of flexible intelligent NC machines, Mechanism and Machine Theory 44 (2009) 466–  
82 476, 2008
- Mert Bal 2008, Mert Bal , Majid Hashemipour, Virtual factory approach for implementation of holonic control in industrial applications: A case study in die-casting industry, Robotics and Computer-Integrated  
83 Manufacturing, 2008
- Minhat 2008, Minhat , Vyatkin V., , Xua X., Wong S., Al-Bayaa Z., A novel open CNC architecture based on STEP-NC data model and IEC 61499 function blocks, Robotics and  
84 Computer-Integrated Manufacturing, 2008
- Misbah 2004 S. Misbah Deen Rashid Jayousi, PREFERENCE BASED SCHEDULING FOR AN HMS ENVIRONMENT, IFIP TC 5 / WG 5.5 Sixth IFIP International Conference on Information Technology for Balanced Automation Systems in Manufacturing and Services  
85 27–29 September 2004, Vienna
- Mohammad 2004 Mohammad R. Gholamian, Seyyed M. T. Fatemi Ghomi, AN EMPIRICAL RESEARCH IN INTELLIGENT MANUFACTURING: A FRAME BASED REPRESENTATION OF AI USAGES IN MANUFACTURING ASPECTS, IFIP TC 5 / WG 5.5 Sixth IFIP International Conference on Information Technology for Balanced Automation Systems in Manufacturing and Services  
86 27–29 September 2004, Vienna
- Monfared 1997 Monfared RP, Weston RH (1997) The re-engineering and reconfiguration of manufacturing cell control systems and reuse  
87 of their components. Proc Inst Mech Eng 211(Part B):495–508
- Monostori 2003 Monostori, L. (2003) AI and machine learning techniques for managing complexity, changes and uncertainties in manufacturing. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 16, 277–291.  
88
- Muller 2001 Muller, P. NC—Controllers, STEP-NC + Status of Standardisation ISO 14649, EMO Hannover, September 2001.  
89
- Narita 2004 Narita H, Shirase K, Arai E, Nakamoto K, Chen L-I, Fujimoto H (2004) Proposal of a concept of future-oriented machine tools for advanced manufacturing systems. Int J Prod Res 42(17):3657–  
90 3673

- Nassehi2006 Nassehi , S.T. Newmanb, R.D. Allen, The application of multi-agent systems for STEP-NC computer aided process planning of prismatic components, International Journal of  
91 Machine Tools & Manufacture 46 (2006) 559–574
- Neligwa 2003 Neligwa, T. and Fletcher, M. (2003) An HMS operational model, in Agent-Based  
Manufacturing:  
92 Advances in the Holonic Approach, S. M. Deen(ed.), Springer-Verlag, Berlin, 163–191.
- Nirav 2008 Nirav Chokshi · Duncan McFarlane, A distributed architecture for reconfigurable  
93 control of continuous process operations J Intell Manuf (2008) 19:215–232
- 94 Okino 1998 Okino, Bionic Manufacturing system, CIRP, Slovenia 1998
- Orban 2005 Orban PE, Atta-Konadu R, Lang SYT, Verner M, Zhang C  
(2005) Java-based distributed control system for reconfigurable  
manufacturing. Proceedings of the 3rd International CIRP  
Conference on Reconfigurable Manufacturing, May 10–12,  
95 2005, Ann Arbor, MI, , C-08
- Overmars 1996 Overmars, A. H. and Toncich, D. J. (1996) Hybrid FMS  
Control Architectures Based on Holonic Principles.  
The International Journal of Flexible Manufacturing  
96 Systems, 8, 263–278.
- Paolo 2004 Paolo Jorge Pinto Leitao An agile and Adaptive Holonic Architecture for  
97 Manufacturing Control, 2004, PhD thesis
- Papazian 2002 Papazian JM, Anagnostou EL, Chrisy RJ, Hoitsma D, Ogilvie P,  
Schwarz RC (2002) Tooling for rapid sheet metal parts  
production. [http://www.galaxyscientific.com/agingaircraft2002/  
SESSIONS/7/7B4\\_PAPAZIAN\\_DOC.PDF](http://www.galaxyscientific.com/agingaircraft2002/SESSIONS/7/7B4_PAPAZIAN_DOC.PDF)  
98 102.
- Paris 2005 H. Paris · D. Brissaud, Process planning strategy based on fixturing indicator  
99 evaluation, Int J Adv Manuf Technol (2005) 25: 913–922
- Park 2000 Park J, Park J, Kim J (2000) A generic event control framework  
for modular flexible manufacturing systems. Comput Ind Eng  
100 38:107–123
- Pascal 2008 Pascal Blanc, Isabel Demongodin, Pierre Castagna, A holonic approach for  
manufacturing execution system design:  
An industrial application, Engineering Applications of Artificial Intelligence 21 (2008) 315–330,  
101 2008
- Paulo 2007 Paulo Leita oa, , Francisco Restivo, A holonic approach to dynamic manufacturing  
102 scheduling, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing(2007)
- Petros 2008 PetrosTheodorou, Giannoula Florou, Manufacturing strategies and financial  
performance—The effect of  
103 advanced information technology: CAD/CAM systems, Omega 36 (2008) 107 – 121, 2008
- Philip 1995 Philip R. Cohen and H.J. Levesque. Communicative actions for artificial agents. In  
Proceedings of the 1st International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS'95).  
104 AAAI Press, June 1995.



- 105 Pritschow 2001 Pritschow G, Altintas Y, Jovane F, Koren Y, Mitsuishi M, Takata S, van Brussel H, Weck M, Yamazaki K (2001) Open controller architecture: past, present and future. Ann CIRP 50(2):463–470
- 106 Pritschow 2005 Pritschow G, Kremer M, Rock S (2005) Virtual setup of reconfigurable manufacturing systems using hardware in the loop simulation. Proceedings of the 3rd International CIRP Conference on Reconfigurable Manufacturing, May 10–12, 2005, Ann Arbor, S-20
- 107 Rafael 2006 Rafael H. Bordini · Michael Fisher · Willem Visser · Michael Wooldridge, Verifying multi-agent programs by model checking, Auton Agent Multi-Agent Sys (2006) 12: 239–256
- 108 Ramesh 1997 Ramesh S. Patil, Richard E. Fikes, Peter F. Patel-Schneider, Don McKay, Tim Finin, Thomas Gruber, and Robert Neches. The darpa knowledge sharing effort: Progress report. In Michael Huhns and Munindar Singh, editors, Readings in Agents. Morgan Kaufmann Publishers, 1997. (reprint of KR-92 paper).
- 109 Rameshbabu 2007, Rameshbabu V., Shunmugam M.S., Hybrid feature cognition method for setup planning from STEP AP-203, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 25(2009)393–408, 2007
- 110 Reuven 2007 Reuven Katz Design principles of reconfigurable machines, Int J Adv Manuf Technol (2007) 34: 430–439
- 111 Richardsson 2006 Johan Richardsson Martin Fa, Modeling the control of a flexible manufacturing cell for automatic verification and control program generation , Int J Flex Manuf Syst (2006) 18:191–208
- 112 Saldner 2003 Saldner H, Paraller picker 3D, the solution of picking of randomly placed parts, Assem Autom 223, 2003
- 113 Scarcelli 2001 Scarcelli A. Prototype implementation of STEP-NC in CATIA V5, EMO Hannover, September 2001
- 114 Scott 2004 Scott Olsen, Jason J. Scarlett, Robert W. Brennan, and Douglas H. Norrie, CONTINGENCIES-BASED RECONFIGURATION OF HOLONIC CONTROL DEVICES, IFIP TC 5 / WG 5.5 Sixth IFIP International Conference on Information Technology for Balanced Automation Systems in Manufacturing and Services 27–29 September 2004, Vienna
- 115 Seilonen 2008, Seilonen I. ,Pirttioja T., Koskinen K., Extending process automation systems with multi-agent techniques, Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2008
- 116 Sela 2007 M. N. Sela\*, O. Gaudryt, E. Dombret and B. Benhabib, A Reconfigurable Modular Fixturing System for Thin-Walled Flexible Objects, Int J Adv Manuf Technol 2007
- 117 Sev 2008, Sev V. Nagalingam , Grier C.I. Lin, CIM—still the solution for manufacturing industry, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 24 (2008) 332–344, 2008

- Shen 2001 Shen, W., Norrie, D. H. and Barthes, J.-P. A. (2001) Multi-Agent Systems for Concurrent Intelligent Design and  
118 Manufacturing, Taylor & Francis Inc., London.
- Shin BS2003 Shin BS, Yang DY, Choi DS, Lee ES, Je TJ, Whang KH (2003)  
119 A new rapid manufacturing process for multi-face high-speed  
machining. Int J Adv Manuf Technol 22:68–74
- Shu 2000 Shu S, Wilkes M, Kawamura K (2000) Development of reusable,  
configurable, extensible holonic manufacturing system. Proceed-  
ings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and  
120 Cybernetics, Piscataway, NJ, pp 1679–1684
- Smith 1980 Smith, R. G. (1980) The Contract Net Protocol: HighLevel Communication and  
Control in a Distributed  
121 Problem Solver. IEEE Transactions on Computers, C-29(12), 1104–1113.
- Stuart 1998 Stuart J. Russell , Peter Norvig, Artificial Intelligence: A Modern Approach, Int J  
122 Adv Manuf Technol (1998) 26: 90–97
- Suk-Hwan 2006 Suk-Hwan Suh , Dae-Hyuck Chung , Byeong-Eon Lee  
, Seungjun Shin , Injun Choi , Kwang-Myung Kim, STEP-compliant CNC system for turning: Data  
123 model, architecture, and implementation , Computer-Aided Design 38 (2006) 677–688
- Talukdar 1999 Talukdar, S. N. (1999) Collaboration rules for auton-  
omous software agents. Decision Support Systems,  
124 24, 269–278.
- Teppo 2004 Teppo Pirttioja, Ilkka Seilonen, Pekka Appelqvist, Aarne Halme, Kari Koskinen2,  
AGENT-BASED ARCHITECTURE FOR INFORMATION HANDLING IN AUTOMATION SYSTEMS, IFIP  
TC 5 / WG 5.5 Sixth IFIP International Conference on  
Information Technology for Balanced Automation Systems in  
Manufacturing and Services  
125 27–29 September 2004, Vienna
- The 2000 Thematic Network (2000) “MOSYN: Modular Synthesis of  
Advanced Machine Tools”, [http://www.cecimo.be/TEAMS/  
126 Projects/mosyn/TEAMSUpdate-MOSYN.pdf](http://www.cecimo.be/TEAMS/Projects/mosyn/TEAMSUpdate-MOSYN.pdf)
- Tian 2002 Tian G, Yin G, Taylor D (2002) Internet-based manufacturing: a  
review and a new infrastructure for distributed intelligent  
127 manufacturing. J Intell Manuf 13:323–338
- Tommila 2001 Tommila T, Venta O, Koskinen K (2001) Next-generation  
industrial automation: needs and opportunities. Autom Technol  
128 Rev 34–41
- Toshiya 2004 Toshiya Kaihara\* and Susumu Fujii, MULTI-AGENT BASED ROBUST  
SCHEDULING FOR AGILE MANUFACTURING, IFIP TC 5 / WG 5.5 Sixth IFIP International  
Conference on  
Information Technology for Balanced Automation Systems in  
Manufacturing and Services  
129 27–29 September 2004, Vienna
- Tsukune 2000 Tsukune H, Tsukamoto M, Matsushita T, Tomita F, Okada K,  
Ogasawara T, Takase K, Tuba T (2000) Modular manufacturing.  
130 J Intell Manuf 4:163–181

- Ulieru 2001 Ulieru, M., Walker, S. S. and Brennan, R. W. (2001) The holonic enterprise as a collaborative information ecosystem. Proceedings of the Workshop on Holons: Autonomous and Cooperating Agents for Industry, Montreal, Canada.
- 131
- Vailavec 1999 Vailavec M, Hardt DE (1999) Closed-loop shape control of the stretch forming process over a reconfigurable tool: precision
- 132 airframe skin fabrication. *Manuf Sci Eng* 10:909–919, MED
- Valckenaers 2005 Valckenaers, P., VanBrussel, H., 2005. Holonic manufacturing execution systems. *CIRP Annals—Manufacturing Technology* 54 (1),
- 133 427–432
- Verstraete 2006 Verstraete, P., Valckenaers, P., Van Brussel, H., Hadeli, K., Germain, B.S., 2006b. Multi-agent coordination and control tested for planning and scheduling strategies. In: *AAMAS '06 of the Fifth International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*.
- 134 ACM Press, New York, NY, USA, pp. 1451–1452.
- Verstraete 2007 Verstraete, P., Valckenaers, P., Van Brussel, H., Saint Germain, B., Hadeli, K., Van Belle, J., 2007. On the performance of a holonic manufacturing execution system in case of an unfeasible planning due to machine breakdown. In: *CIRP Seminars*. Submitted for
- 135 publication
- Vladimir 2007 Vladimir Marci, Lazansky Industrial applications of agent technologies ,*Control Engineering Practice* 15 (2007) 1364–1380
- 136
- Wang 1998 Wang, L., Balasubramanian, S. and Norrie, D. H., (1998b) Agent-based intelligent control system design for real-time distributed manufacturing environments. *Proceedings of the Agent-based Manufacturing Workshop—Autonomous Agents '98*,
- 137 152–159.
- Wang 2002 Wang S, Shin KG (2002) Constructing reconfigurable software for
- 138 machine control systems. *IEEE Trans Robot Autom* 18(4):475–486
- Wang 2002 Wang S, Shin KG (2002) Constructing reconfigurable software for
- 139 machine control systems. *IEEE Trans Robot Autom* 18(4):475–486
- Weck 2001 Weck M, Wolf J, Kiritsis D. STEP-NC—The STEP compliant NC programming interface, 2001 IMS Project Forum, October
- 140 2001. Monte Verit" a Conference Resort, Ascona, Switzerland.
- Weston 1999 Weston R (1999) Model-driven, component-based approach to reconfiguring manufacturing software systems. *Int J Oper Prod*
- 141 *Manage* 19(8):834–855
- Xu 2004 X.W. Xu\*, Q. He, Striving for a total integration of CAD, CAPP, CAM and CNC, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 20 (2004) 101–109
- 142
- Yannis 1996 Yannis Labrou and Tim Finin. A semantics approach for KQML—a general purpose communication language for software agents. In *3rd International Conference on Information and Knowledge Management*, November 1994
- 143
- Yuan 2008, Yuan-Lung Lai, A constraint-based system for product design and manufacturing,
- 144 *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 25(2009)246–258, 2008

- Yuguang 2008 Yuguang Wu, Shuming Gao, Zichen Chen, Automated modular fixture planning based on linkage mechanism theory, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing archive  
145 Volume 24 , Issue 1 (February 2008) Pages 38-49
- Zaremba 2003 Zaremba MB, Morel G (2003) Integration and control of  
146 intelligence in distributed manufacturing. J IntellManuf 14:25–42
- Zhang 2000 Zhang X, Baiasubramanian S, Brennan RW, Norrie D (2000)  
Design and implementation of a real-time holonic control system  
147 for manufacturing. Inf Sci 127:23–44
- Zhao 2000 Zhao X, Wang K, Luo Z (2000) A stochastic model of a  
reconfigurable manufacturing system part I, a framework. Int J  
148 Prod Res 38(10):2273–2285
- Zhou 2004 Z. D. Zhou Æ J. M. Xie Æ Y. P. Chen Æ B. Chen, Z. M. Qiu Æ Y. S. Wong Æ Y. F.  
Zhang  
The development of a fieldbus-based open-CNC system, Int J Adv Manuf Technol (2004) 23:  
149 507–513

## **CAPITOLUL II**

### **CONCEPEREA UNE METODE DE RECONFIGURARE RAPIDA A SISTEMULU DE COMANDA NUMERICA AL MASINII. DEZVOLTAREA UNUI SISTEM DE PROGRAMARE A MASINII BAZAT PE TASKURI**

## **2. O noua concepție privind conducerea sistemelor tehnologice reconfigurabile – conducerea bazata pe planificare reactivă**

### **2.1. Formularea problemei**

Procesul tehnologic cuprinde o succesiune de operații, fiecare operație presupunând ca un anumit sistem tehnologic să parcurgă un anumit ciclu de lucru. La rândul lui, ciclul de lucru al sistemului tehnologic presupune parcurgerea unui număr de subcicluri care, în cazul unei mașini cu comandă numerică, reprezintă incursiuni de prelucrare ale sculei.

În cazul mașinilor CNC clasice, fiecare ciclu de lucru era comandat de un program-piesa, în care se descrie separat fiecare subciclu component. În figura 1 se prezintă forma inițială și finală a semifabricatului unei roți dinate, precum și schitele celor trei subcicluri, ce compun operația de strunjire a acesteia.

Specific pentru fiecare subciclu este faptul că scula parcurge un anumit traseu, pornind mereu dintr-o anumită poziție și revenind întotdeauna în exact aceeași poziție.

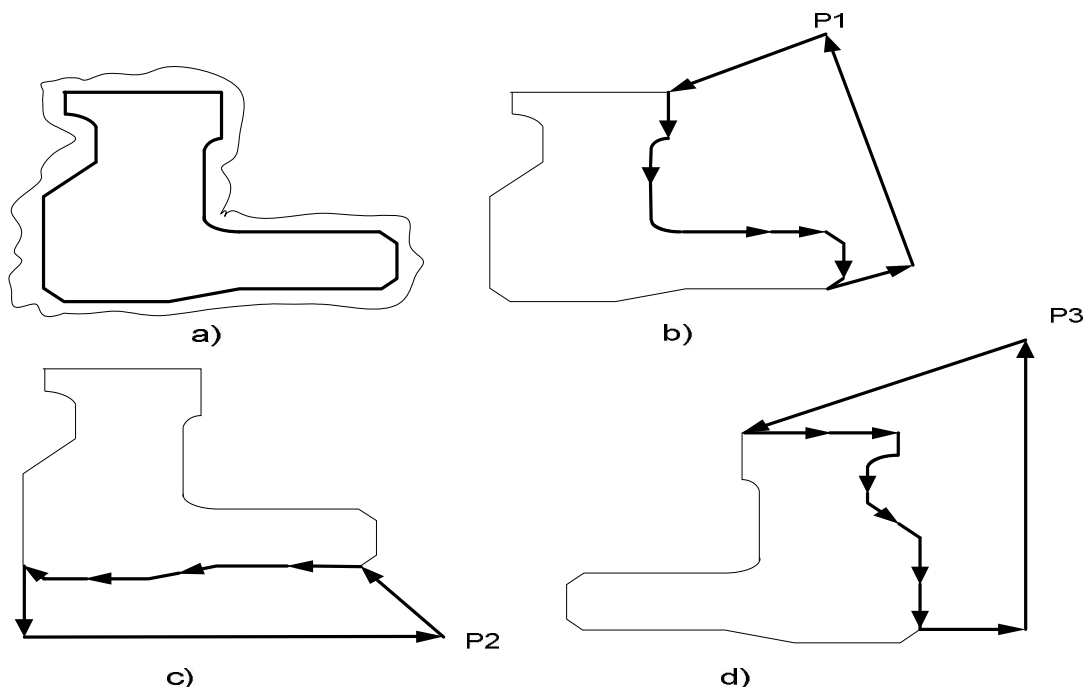


Fig. 1 Reprezentarea subciclurilor necesare pentru operatia de strunjire a unei roti dintate;

a) forma initiala si finala a semifabricatului;

b), c), d), cele trei subcicluri ce compun operatia de strunjire

În figura 2 se prezinta schema unui subciclu, in care are loc strunjirea unui grup de suprafete. La inițializarea ciclului de lucru al mașinii, scula pleacă din punctul de referință al masinii RP si se deplasează în poziția de start a sculelor SP. După selectarea sculei curente, capul revolver se deplasează pentru prelucrarea grupului de suprafețe, asa cum sub-ciclu a fost descris in programul piesa. Sarcina de prelucrare constă în prelucrarea grupului de suprafețe având profilul definit de punctele 1...6, cu scopul de a satisface exigențele cu privire la precizie și rugozitate. Pentru respectarea acestor exigențe, programatorul alege parametrii tehnologici adecvati, pentru fiecare secvență a traseului, și precizează aceasta în programul-piesa. Astfel, dacă, de exemplu pentru secvența 1-3, sunt prevăzute anumite valori pentru precizie și rugozitate, diferite față de valorile prevăzute pentru secvența 3-5, atunci parametrii tehnologici aleși pentru cele două secvențe vor avea valori diferite.

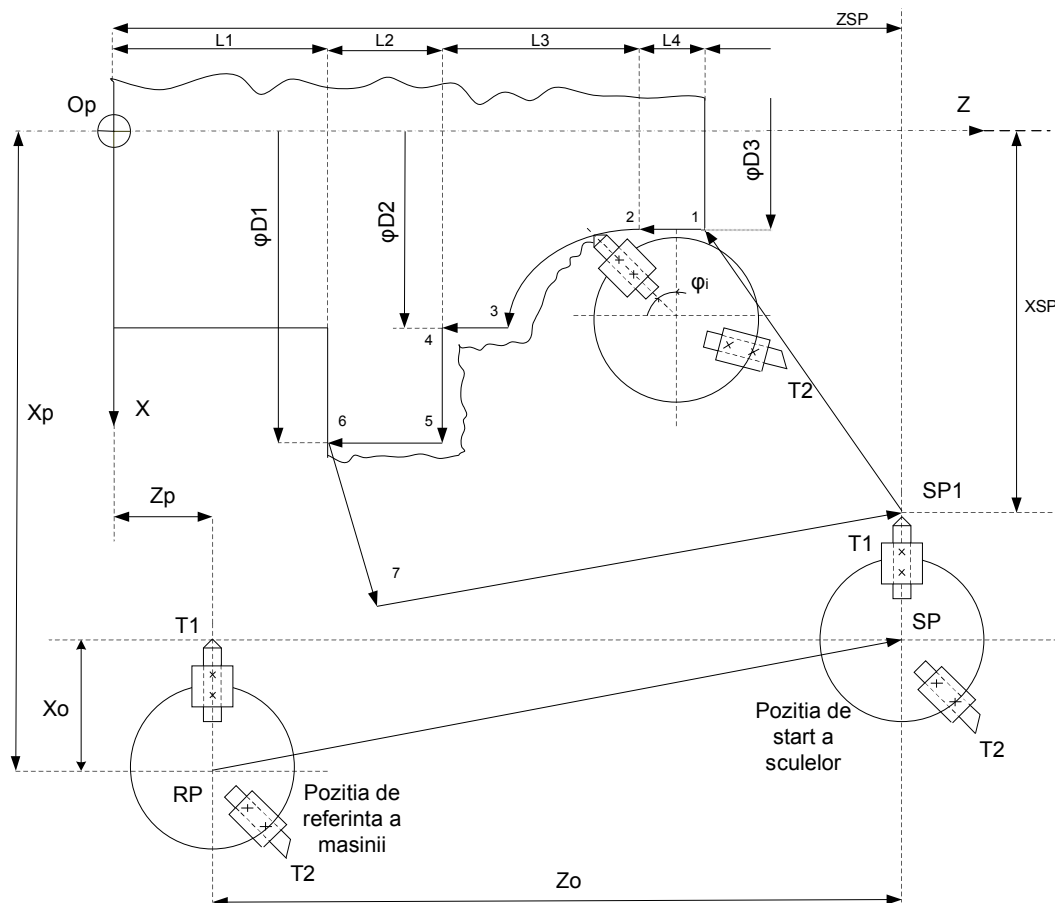


Fig. 2. Schema unui subciclu, tipic pentru procesele de strunjire

Proiectarea operației ce urmează a fi executată se finalizează cu elaborarea următoarelor trei documente:

- un desen care prezintă pozițiile sculelor în capul revolver;
- un desen care prezintă poziția piesei în raport cu sistemul de referință al mașinii;
- programul-piesa, scris în limbajul ISO G-code.

Programul-piesa este citit și interpretat de un interpretor, specific mașinii unelte respective, iar datele obținute de interpretor sunt transmise unui sistem de comandă, de asemenea specific.

În cazul sistemelor de prelucrare reconfigurabile, o asemenea abordare ar fi nepotrivită întrucât la acestea apare necesitatea ca, înainte de executarea operației tehnologice, să aibă loc operația de reconfigurare a sistemului în acord cu sub-ciclurile de lucru ce compun respectiva operație tehnologică.

Reconfigurarea sistemului tehnologic cuprinde reconfigurarea hardware (amplasarea modulelor hardware), reconfigurarea controlului și reconfigurarea software, acțiuni care nu sunt descrise în setul de documente prezentate mai sus, pe de o parte, și, pe de alta parte, aceste acțiuni sunt mari

consumatoare de timp, ceea ce face prohibitiva utilizarea sistemelor tehnologice reconfigurabile in cazul unor serii mici de fabricatie. In plus, dacă am utiliza tehnologia actuală a CNC-urilor ar însemna că, practic, la o noua configurație hardware este necesară o nouă concepție a mașinii, din punct de vedere al controlului și al software-ului. Intr-adevar, așa cum arătam mai jos, atât partea de control cât și cea software a mașinii sunt nepotrivite pentru sistemele de prelucrare reconfigurabile.

În ceea ce privește *controlul*, în cazul clasic acesta se realizează prin intermediul mai multor controlere, de obicei PLC-uri, care sunt programate în funcție de configurația mașinii. Acestea, la rândul lor, transmit comenzi către variatoarele motoarelor sau primesc date de la senzorii instalati pe masina tehnologica. În cazul RMT-urilor, fiecare configurație cinematică a mașinii ar determina noi parametri stocați în PLC-uri, cum ar fi limitele curselor, rotația maximă a motoarelor etc., ceea ce ar presupune o reprogramare a PLC-urilor la fiecare nouă configurație. Cantitatea de legături fizice între senzori, PLC-uri, variatoare, etc. este un alt impediment, întrucât ar necesita timp considerabil pentru constituirea configurației de control.

În ceea ce privește *software-ul*, în cazul sistemelor CNC clasice, un interpretor realizează translatarea programului scris de operator în limbajul ISO G-code în comenzi codificate către PLC. Aceste comenzi se încarcă în PLC și apoi rulează în acesta, conform unei corespondențe între codurile comenzii și acțiunea programată în controler. În cazul RMT, la o noua configurație, numărul de axe, caracteristicile acestora se modifică, ceea ce face ca, daca se mentine aceeasi structura a sistemului de control, interpretorul ar trebui să fie reconfigurabil în așa fel încât să se adapteze la noua structura de control a mașinii. Reconfigurarea interpretorului este inasa o operatiune costisitoare intrucat dureaza relativ mult timp si trebuie executata de un personal specializat, operatorul de la masina neputand sa execute aceasta operatie.

Un alt aspect software specific sistemelor tehnologice controlate numeric este continutul programului piesa si limbajul in care acesta este elaborat. Actualul continut al programului-piesa si actualul limbaj de programare a masinilor CNC ( ISO G-code) prezintă următoarele dezavantaje:

a) Intervenția operatorului în conducerea procesului, ca urmare a monitorizării, poate consta doar în modificarea parametrilor procesului sau a constantelor programului; după modificare, atât parametrii cât și constantele rămân fixe în continuare pe tot parcursul executării respectivei fraze. De exemplu, în cazul unei fraze ce comandă strunjirea unei suprafețe cilindrice, modificarea corecției de sculă implică modificarea diametrului pe toată lungimea acesteia; ca urmare, o eroare manifestată prin conicitatea suprafeței cilindrice nu poate fi corectată. De



asemenea, valoarea avansului la prelucrarea acestei suprafețe va fi întotdeauna constantă, deși adaosul de prelucrare variază în lungul axei suprafeței.

b) Programul piesă cuprinde prezentarea acțiunilor ce trebuie comandate pentru ca, parametrii de calitate și eficiență ai produsului să fie cei impuși. Aceasta înseamnă că programatorul trebuie să cunoască cu precizie relația dintre argumentele funcțiilor programate și parametrii de calitate ai produsului; orice eroare a programatorului este subiect de corecție online aplicata de operator.

c) Modificarea programului piesă este determinată de variația mărimilor de stare, sesizată în cursul monitorizării, dar variația în timp și spațiu a comportării sistemului de manufacturare nu determina vreo modificare a programului piesă; altfel spus, conducerea nu este adaptivă, întrucât nu implică reconstrucția periodică a modelului matematic care leagă acțiunea de modificare a programului cu variația monitorizata a variabilelor de stare.

Problema care trebuie rezolvata este de a proiecta o arhitectură de control și software nouă, în așa fel încât implementarea sistemelor de prelucrare reconfigurabile să fie rationala, indiferent de marimea seriei de fabricatie.

Scopul cercetărilor este acela de a dezvolta tehnici pentru a conduce o mașina unalta CNC reconfigurabilă, astfel încât efortul de programare să fie diminuat, pe de o parte, iar pe de altă parte, conducerea să fie optimală, în sensul că, în condițiile satisfacerii unui set de restricții, productivitatea procesului să fie maxima iar costul minim, dar și adaptivă în sensul ca să țină cont de evoluția în timp și spațiu a comportării sistemului și a caracteristicilor semifabricatului.

## **2.2. Conceptul de conducere bazata pe planificare reactiva**

In scopul rezolvarii problemei prezentate la punctul precedent, propunem abordarea conducerii masinii unelte CNC reconfigurabila pe baza unui nou concept, pe care l-am denumit conducere bazata pe planificare reactiva.

La nivel conceptual, conducerea bazată pe planificare reactivă se bazeaza pe realizarea și exploatarea unui produs software, specific cuplului sistem tehnologic - operație de prelucrare, ce este compus din doua module. Primul modul va fi numit *Modulul software de planificare reactiva a ciclului de lucru*, iar al doilea va fi numit *Modulul software de evaluare a parametrilor modelului cuplului operatie tehnologica - sistem tehnologic*.

Primul modul are la intrare caracteristicile semifabricatului, ale piesei finite și ale sistemului tehnologic, iar la ieșire furnizează succesiunea stărilor prin care trebuie să treacă sistemul tehnologic, pentru ca semifabricatul să fie transformat în piesa finită. Această succesiune

a stărilor reprezintă descrierea discretă a ciclului de lucru al sistemului tehnologic, corespunzător respectivei operații de prelucrare.

Fiecare variabila de stare descrie starea unuia dintre modulele componente ale sistemului de prelucrare reconfigurabil. Spre exemplu, coordonatele X și Z ale unui sistem tehnologic de strunjire sunt variabilele de stare ale modulelor ce asigură deplasarea longitudinală și deplasarea transversală a sculei în cursul procesului de strunjire. Starea la un moment dat a sistemului tehnologic în ansamblul său este descrisă de setul valorilor momentane ale variabilelor de stare corespunzătoare tuturor modulelor componente. În acord cu conceptul de conducere bazată pe planificare reactivă, produsul software, specific ansamblului sistem tehnologic – operație de prelucrare, furnizează la ieșire seturile succesive de valori momentane ale variabilelor de stare, corespunzătoare tuturor modulelor componente ale sistemului tehnologic.

Pe de altă parte, aceste valori momentane ale variabilelor de stare reprezintă valorile de referință ale buclelor interne de control, care asigură controlul modulelor componente. În acest fel, comanda oricărui dintre modulele componente constă doar în simpla modificare online a valorii de referință.

O unitate de control logică transmite buclelor de control ale modulelor valorile variabilelor de referință, rezultate la ieșirea din produsul software specific. Fiecare set de valori ale variabilelor de referință reprezintă un punct în traiectoria pe care variabilele de stare ale sistemului tehnologic o parcurge în cursul derulării complete a unui ciclu de lucru, în cursul căruia are loc prelucrarea completă a unui exemplar din lot.

Dacă, atât caracteristicile semifabricatului, cât și cele ale sistemului tehnologic, nu ar varia în cursul prelucrării întregului lot de piese și dacă valorile acestora ar fi perfect cunoscute încă de la început, atunci succesiunea stărilor prin care trebuie să treacă sistemul tehnologic, pentru ca semifabricatul să fie transformat în piesa finită, ar rămâne constant pe tot parcursul prelucrării lotului de piese.

Cum, în realitate, aceste lucruri nu se confirmă, apare necesitatea ca, în cursul derulării procesului de prelucrare, sistemul tehnologic să fie monitorizat, folosind un ansamblu de senzori adecvați, iar datele astfel obținute să fie folosite pentru evaluarea periodică a unora dintre caracteristicile semifabricatului și/sau ale sistemului tehnologic, caracteristici care au funcția de parametri ai modelului cuplului operație tehnologică - sistem tehnologic. Această evaluare este realizată de cel de-al doilea modul al produsului software, specific cuplului sistem tehnologic -

operație de prelucrare, numit *Modulul software de evaluare a parametrilor modelului cuplului operatie tehnologica - sistem tehnologic*.

Dacă valorile actualizate ale parametrilor diferă față de valorile inițiale, atunci *Modulul software de planificare reactiva a ciclului de lucru* este rulat din nou, având la intrare valorile actualizate ale acestor caracteristici. Va rezulta o nouă planificare a stărilor succesive prin care trebuie să treacă sistemul tehnologic pentru a prelucra unul dintre exemplarele din lot. În continuare, unitatea de control logic va furniza buclelor de control ale modulelor componente noi serii de valori ale variabilelor de referință.

Această modificare permanentă a planificării, ca reacție la evoluția caracteristicilor semifabricatului, piesei și sistemului tehnologic, reprezintă esența conceptului de conducere bazată pe planificare reactivă.

În figura 3 se prezintă schema conceptuală a conducerii bazată pe planificarea reactivă. Caracteristicile definitorii ale semifabricatului, alături de valorile actuale ale parametrilor modelului, sunt introduse în *Modulul software de evaluare a parametrilor modelului cuplului operatie tehnologica - sistem tehnologic*, ce ofera la ieșire valorile actualizate ale variabilelor de control ale sistemului, valori care sunt apoi transmise la *Unitatea de control logic*. În continuare, *Unitatea de control logic* realizează transmiterea de comenzi către modulele hardware.

Sistemul de monitorizare, care poate cuprinde o gamă adecvata de senzori pentru forță, accelerație, etc., transmite informația citită spre a fi folosită pentru evaluarea valorilor actualizate ale parametrilor modelului cuplului operatie tehnologica - sistem tehnologic.

Așa cum s-a arătat mai sus, ori de câte ori valorile parametrilor acestui model se schimbă, variabilele de control sunt actualizate în consecință.

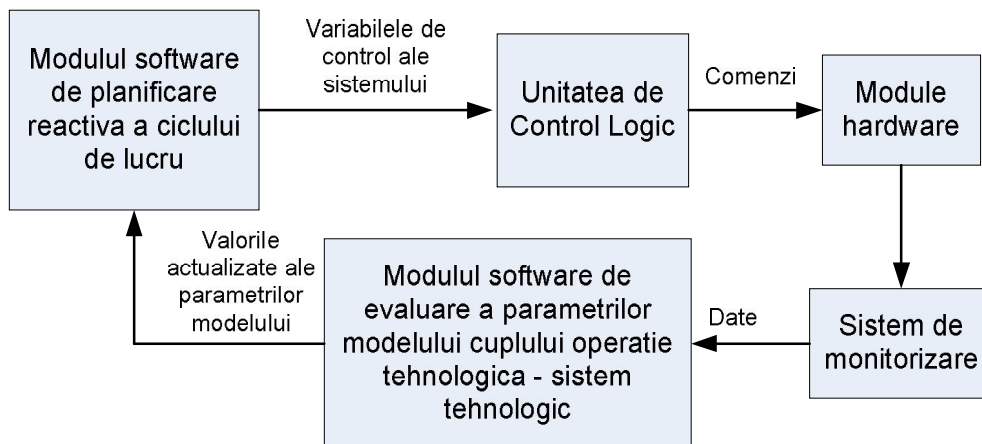


Fig.3 Schema conceptuală a conducerii bazată pe planificarea reactivă

Afirmăm că arhitectura de control propusă se potrivește conducerii sistemelor de prelucrare reconfigurabile, bazându-ne pe următoarele argumente:

- unitățile componente ale sistemului de control nu se modifică în niciun fel la o nouă arhitectură sau la procesarea unei noi familii de piese.
- arhitectura modulară care presupune controlerul încorporat pe modulul hardware răspunzător de bucla de control ,close loop' permite controlarea acestuia în orice configurație.
- modulul software de control numit *Modulul software de planificare reactivă a ciclului de lucru* permite controlul arhitecturii hardware indiferent de arhitectura hardware.

Deosebim avantajele acestui concept de conducere după cum urmează.

- Planificarea este supusă unor criterii astfel încât traiectoria stărilor succesive ale sistemului să fie optimă ( de exemplu, din punct de vedere al productivității sau al preciziei). Într-adevar, conceptul de conducere are caracteristicile de conducere optimă, pentru că sistemul nu se conduce după o traiectorie a marimilor de stare precizată de programator (asa cum este cazul in prezent), ci se conduce pe baza rezultatelor obtinute in urma rularii unui modul software care asigura ca o anumită funcție obiectiv să fie extremizată.

- De asemenea, tipic pentru această manieră nu se planifică modul în care să decurgă procesul ci se planifică rezultatele dorite (de exemplu, valorile rugozității). Astfel se urmează ideea de a conduce sistemul prin afirmația "nu cum trebuie condus procesul, ci ce trebuie să rezulte în urma procesului".

Concluzionăm că, potrivit acestui concept, conducerea are: a) *caracter optimal* – întrucât se urmărește maximizarea funcției obiectiv; b) *caracter adaptiv* – întrucât se modifică online modelul sistemului pe baza caruia acesta este condus.

### 2.3. Controlul individual al fiecărui modul

Sistemul de prelucrare are structura unui robot cu mai multe brațe; de exemplu, un braț ține și rotește piesa, alt braț ține piesa și al treilea braț ține scula sau măsoară dispozitivul. Fiecare grad de libertate este dat de un modul. De exemplu, un modul hardware cinematic este descris în figura 4. Acest modul hardware realizează un grad de libertate care constă într-o mișcare de translație. Are un actuator, pentru executarea mișcării de translație, un efector, senzori pentru monitorizarea variabilelor de stare ale modulului hardware ( de exemplu, poziția efectorului).

Un modul hardware, așa cum se arată în figura 9, este compus din efector, senzori și motor, care sunt controlate de un controller încorporat pe modulul hardware, răspunzător de controlarea poziției modului. Spre deosebire de actuala arhitectură hardware CNC, unde controllerul PLC gestionează simultan comanda motoarelor și a diferiților senzori din sistem, controllerul încorporat nu are decât o funcție și anume de a gestiona poziția efectorului printr-o bucla de control închisă Acest controller comunică printr-o magistrală de comunicație cu PC-ul.

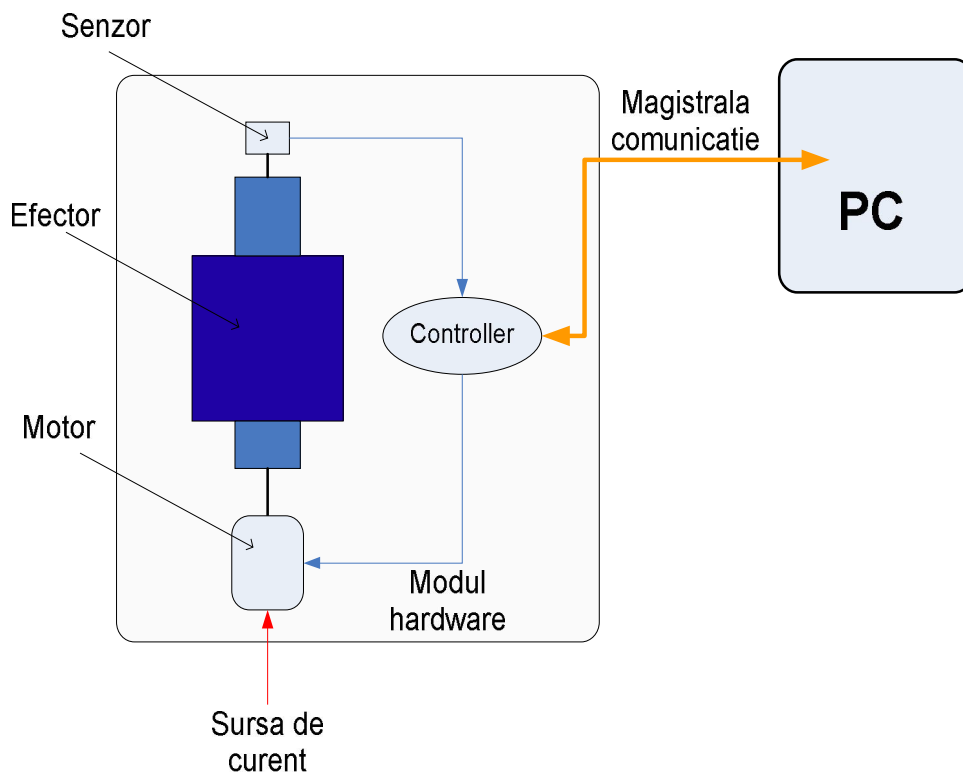


Fig.4 Modulul hardware generic

La nivelul fiecărui modul se face comanda independent, fără ca un modul să 'cunoască' poziția altui modul.

Viteza cu care se poziționează în punctul curent comandat depinde de mărimea diferenței distanței. În funcție de sensul și mărimea diferenței, se comandă motorul, cu o viteză mai mică, sau mare, în funcție de mărimea diferenței, așa cum se arată în figura 5, spre deosebire de alte sisteme de control, pentru care legea de variație pentru viteză e dată.

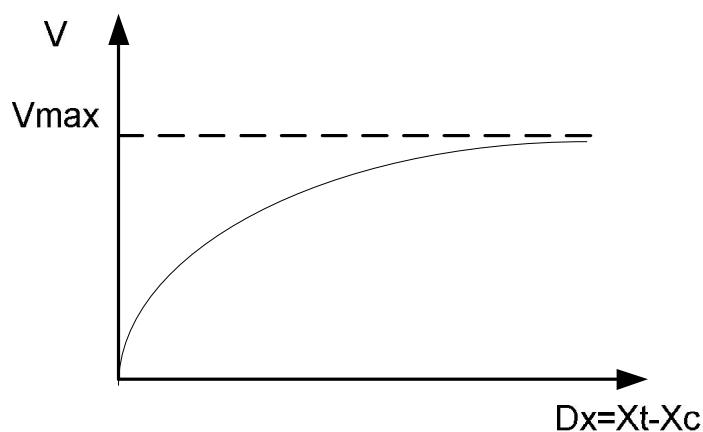


Fig. 5 Legea de control a vitezei:  $X_t$  – poziția comandată a modulului;  $X_c$  este poziția curentă a modulului și  $V$  este viteza de deplasare din poziția curentă în poziția de referință

#### 2.4. Comanda structurii modulare în ansamblul ei

Așa cum am arătat mai sus, *Unitatea de control logic* care realizează comanda către module are ca ieșire un set de date reprezentat mai jos într-un tabel. Coloana timp și cea corespunzătoare modulului reprezintă traiectoria descrisă în timp pentru un modul. Sistemul se conduce prin comandarea independentă a modulelor, acestea având fiecare un sistem de comunicație cu *Unitatea de control logic*. Așa cum am arătat mai sus nu există legătură între module, alta decât UCL, care furnizează simultan comenzi tuturor modulelor.

De exemplu, să considerăm o mașină de prelucrare reconfigurabilă reprezentată de un strung, care este prevăzută cu un grad de libertate suplimentar (figura 6). În această configurație avem o sanie transversală, una longitudinală și un modul de rotație pentru poziționarea sculei. Comanda către module constă în tabelul care reprezintă evoluția în timp a valorilor corespunzătoare care sunt comandate pe rând. În timpul funcționării, valorile corespunzătoare variabilelor de control

sunt modificate datorită schimbării comportării sistemului. De exemplu, o schimbare a comportării sistemului, ar fi în cazul unui proces de aşchiere, când forţa creşte, ceea ce ar putea duce la o instabilitate a sistemului.

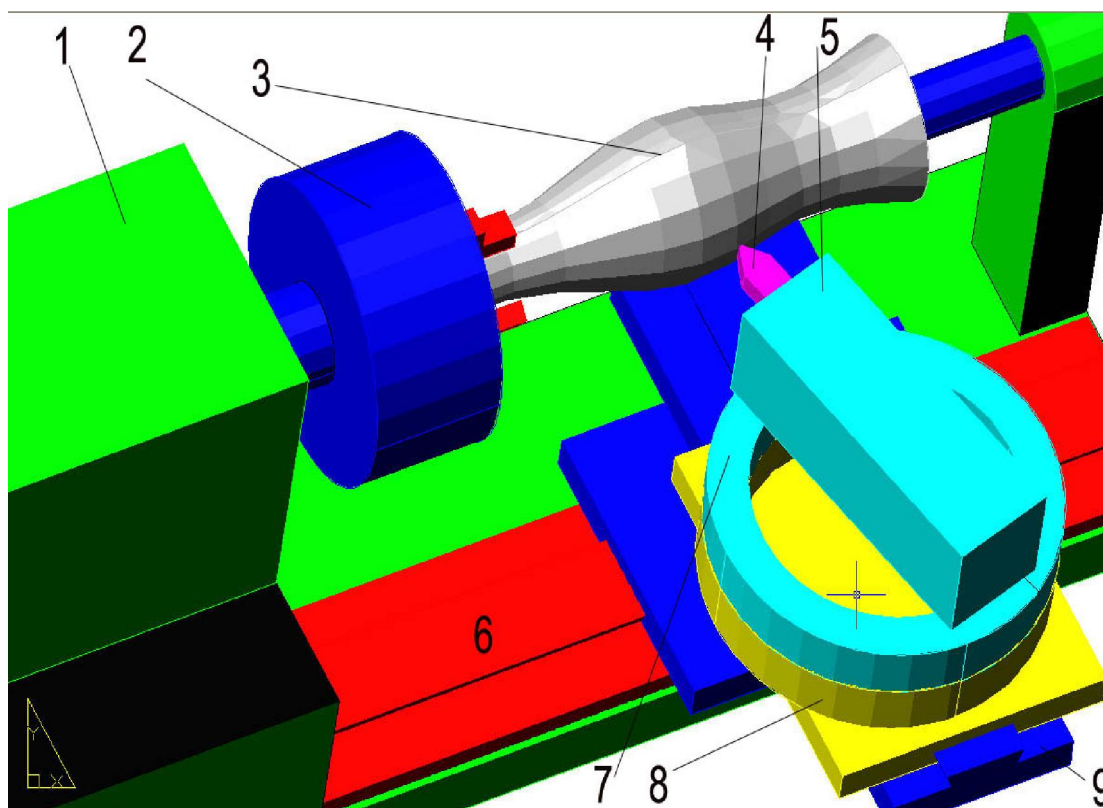


Fig. 6 Arhitectura propusă pentru strungul reconfigurabil

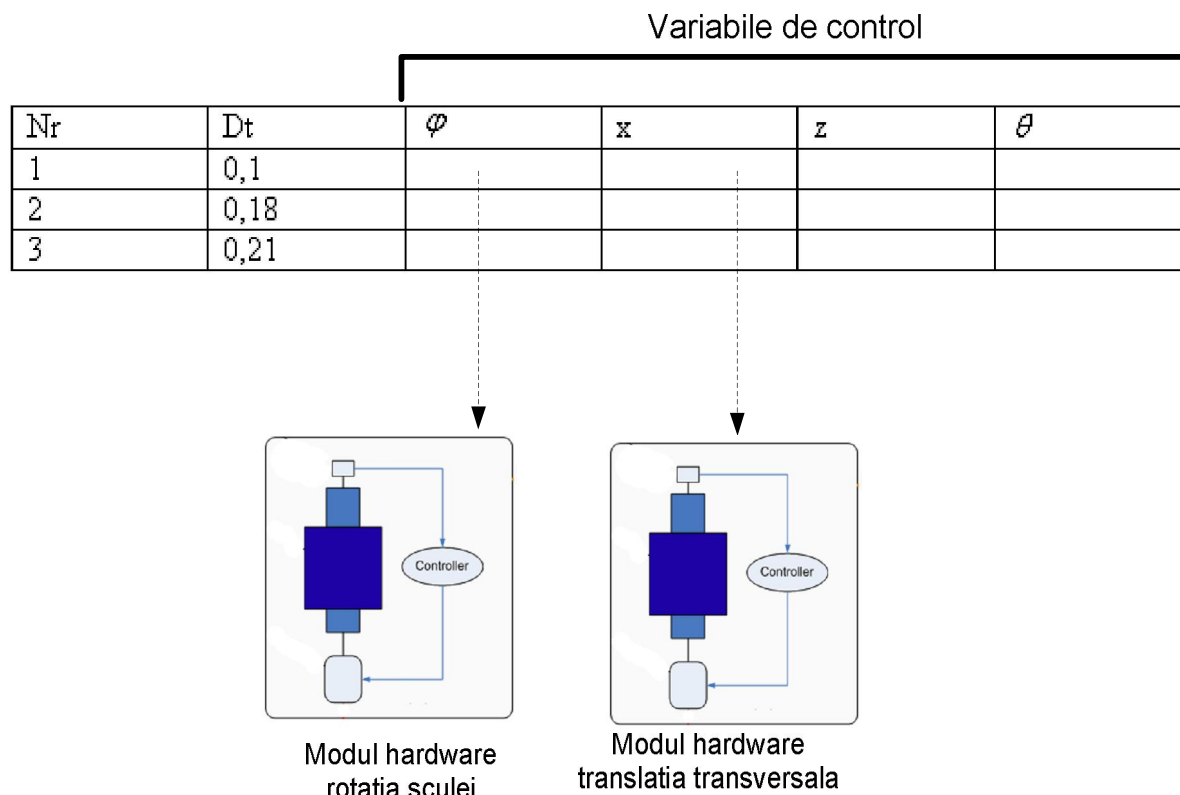


Fig. 7 Variabilele de control care se comanda modulelor

Așa cum se arata în figura 7, sistemul se controlează prin intermediul binomului  *timp – valoare variabila de control*. Astfel, la timpul calculat, *Unitatea de control logic* comandă valorile variabilei de control corespunzătoare modulului hardware. În figura de mai sus se surprinde situația de la timpul 0,1s, când *UCL* comandă modulelor hardware corespunzătoare pentru rotația sculei și translație transversală, noile valori a variabilelor de control. În continuare, se comandă succesiv, corespunzător coloanei timp fiecare modul la 0,18 s, 0,21, s.a.m.d. Prin planificare nu se programează viteza prin specificare directă de către programator, ci aceasta rezultă prin modificarea stărilor care determină starea sistemului.

## 2.5 Elaborarea unei noi metode de programare a sistemelor tehnologice si aplicarea acesteia la sistemele tehnologice conduse prin planificare reactiva

În cele ce urmeaza se prezinta o noua metoda de programare a sistemelor tehnologice care se bazeaza pe o noua abordare a relatiei între programarea masinii si controlul operational al acesteia, pe de o parte, si a relatiei dintre programator si operator, pe de alta parte. Potrivit acestei abordari programarea masinii consta în chiar realizarea sistemului software al acesteia folosind un mediu de programare specific. Conform noii abordări, programatorul trebuie să



parcursă mai multe etape pentru procesarea semifabricatului. Etapele care trebuiesc parcurse de către programator în scopul executării unei sarcini sunt așa cum se arată în figura 8.

Operatorul trebuie să proiecteze piesa, apoi în stadiul de CAPP, se procedează la împărțirea task-urilor, urmată de modelarea cinematicii pentru prelucrarea piesei. Fiecare operație este împărțită în task-uri, iar fiecărui task i se asociază cerințele impuse corespunzător suprafeței care o reprezintă.

*Modelarea cinematicii procesului de prelucrare* presupune calcularea pozițiilor succesive ale modulelor sistemului de prelucrare reconfigurabil pentru realizarea semifabricatului, în așa fel încât să se satisfacă condiția de maximizare a funcției obiectiv. În urma acestei modelări rezultă un algoritm de planificare reactivă parametrică.

*Modelarea geometriei sculei* este etapa în care se identifică geometria sculelor care urmează a fi folosite. În continuare, programatorul trece la faza de configurare a mașinii, care presupune alegerea modulelor necesare efectuării operației curente. În funcție de traiectoriile necesare pentru executarea fiecărui task, se aleg modulele care compun mașina, rezultând *programul mașina*. Având modelul cinematic al mașinii, se generează documentul tehnologic, numit în abordarea noastră - *program piesa*. *Programul piesa* care rezultă nu are structura unui program în accepțiune prezentă, de cod scris, care descrie comportarea de-a lungul funcționării mașinii, și care urmează să fie executat. Acesta reprezintă un model software care va genera comenzile transmise *Unitatii de control logic* și care vor fi diferite în funcție de comportarea sistemului. Programul piesa include algoritmul de planificare reactiva parametrică rezultat prin modelarea holonică a cinematicii. *Programul mașină* și *programul piesă* formează *Modulul software de evaluare a parametrilor modelului cuplului operatie tehnologica - sistem tehnologic*, un modul software care rulează pe PC-ul industrial de pe sistemul de prelucrare reconfigurabilă.

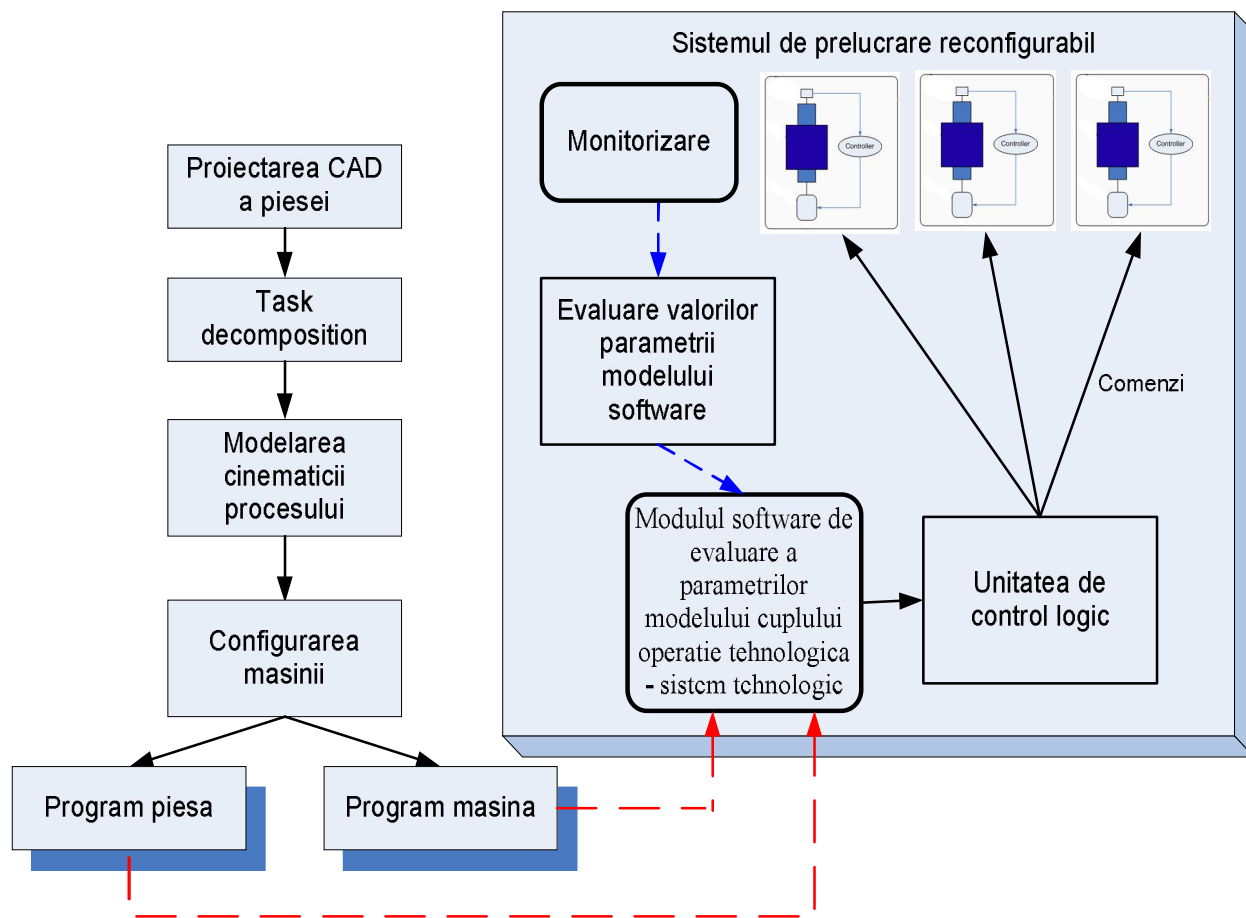


Fig. 8 Etapele parcurse de programator și schema simplificată a conducerii sistemului de prelucrare reconfigurabil

Schema conceptuală a conducerii sistemelor tehnologice reconfigurabile prin planificare reactivă, așa cum se arată în figura 9, respectă conceptele propuse și cuprinde acțiunile descrise mai înainte. În figura se observă împărțirea conducerii sistemelor de prelucrare reconfigurabilă în două etape, una care reprezintă faza de proiectare iar cealaltă reprezintă faza de procesare.

În faza de proiectare, așa cum am arătat anterior, se definesc operațiile și se structurează fiecare task, urmând ca modelul ciclului mașinii să fie folosit în faza de construire a programului piesă. Configurarea structurii hardware este realizată având în vedere succesiunea task-urilor definite și se construiește modelul solid al sistemului de prelucrare, model care, împreună cu modelul parametric al operației, rulează în *Modulul software de evaluare a parametrilor modelului cuplului operatie tehnologice - sistem tehnologic*.

*Planificarea reactiva parametrica a operației* este etapa de construire a programului piesa prin care se construiește modelul parametric al operației care va fi parte, de asemenea, a Modelului software al ansamblului operație tehnologica – sistem tehnologic.

*În faza de procesare*, modulul software realizează planificarea operației prin actualizarea setului de date reprezentând valorile variabilelor de control către *Unitatea de control logic*, care procedează la transmiterea acestora la intervale precizate de informația timp corespunzătoare fiecărui set. Sistemul de monitorizare transmite date care sunt procesate în *Modulul software de evaluare a parametrilor modelului cuplului operatie tehnologica - sistem tehnologic*, fapt ce generează actualizarea valorilor curente ale parametrilor de planificare pentru următoarele coordonate de stare ale sistemului.

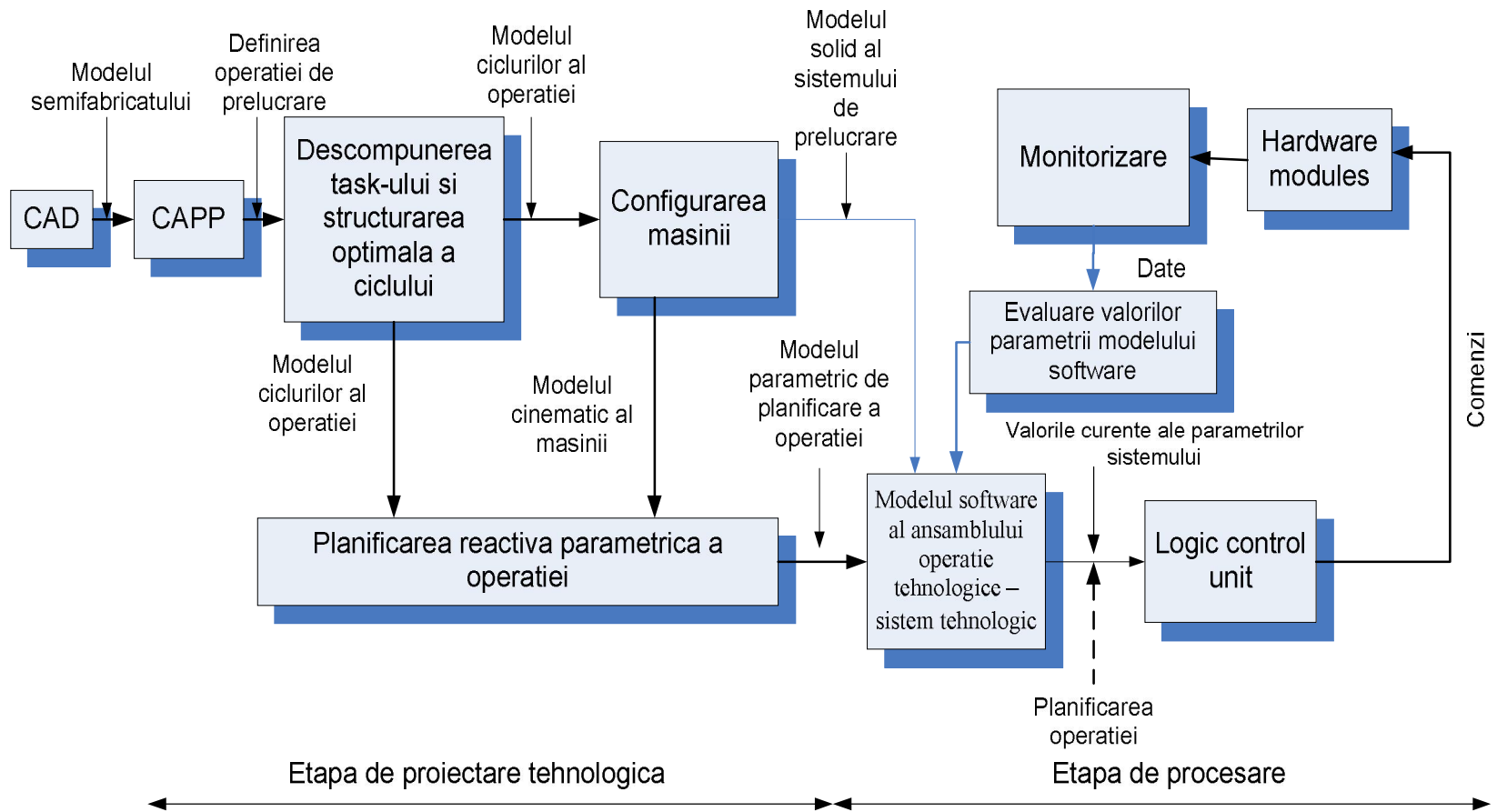


Fig. 9 Schema conceptuală a conducerii bazată pe planificarea reactivă a sistemelor de fabricație reconfigurabile

## **2. 6 Structura programului mașina. Structura programului piesa.**

În ceea ce privește programarea mașinii se propun două documente tehnologice corespunzătoare reconfigurării mașinii tehnologice și a executării operației tehnologice pe mașină. În acest sens, în faza de configurare a mașinii se are în vedere piesele sau familiile de piese ce vor fi prelucrate și cu ajutorul unui limbaj vizual, se alege și se testează diferite module pentru a realiza o configurație potrivită. În faza de proiectare a procesului tehnologic se folosește un limbaj vizual pentru proiectarea operației, așa cum se arată în figura...

Se propune în continuare o metodă de reconfigurare rapidă a sistemelor de control numeric, bazată pe ideea separării nete a sistemului de control al fiecărui modul component al mașinii de interpretorul programului piesă. În locul arhitecturii clasice, utilizată pentru controlul numeric al mașinilor unelte, a fost dezvoltată o arhitectura nouă, mult simplificată, care are la bază o unitate de control logic. Operația de reconfigurare a mașinii unelte include reconfigurarea hardware a acesteia și setarea unității de control logic. A fost conceput un limbaj de nivel înalt destinat pentru programarea operației de reconfigurare a mașinii.

Analog programului mașină, se propune o nouă metodă de programare a mașinii în vederea executării operației tehnologice, la care programul piesă rezultă în mod automat în urma simulării de către programator a respectivei operații și s-a înlocuit limbajul ISO G-code cu un limbaj de nivel mai înalt, care are la bază structurarea pe task-uri a operației tehnologice. De asemenea, se propune schimbarea documentului tehnologic numit program piesă, folosit în prezent, cu unul exclusiv digital care conține patru grupe de informații: fișiere cu date CAD, imaginea scriptică a operației, algoritmul de conducere al mașinii corespunzător fiecărui task, reprezentarea vizuală a operației de reconfigurare a mașinii și prelucrarea piesei.

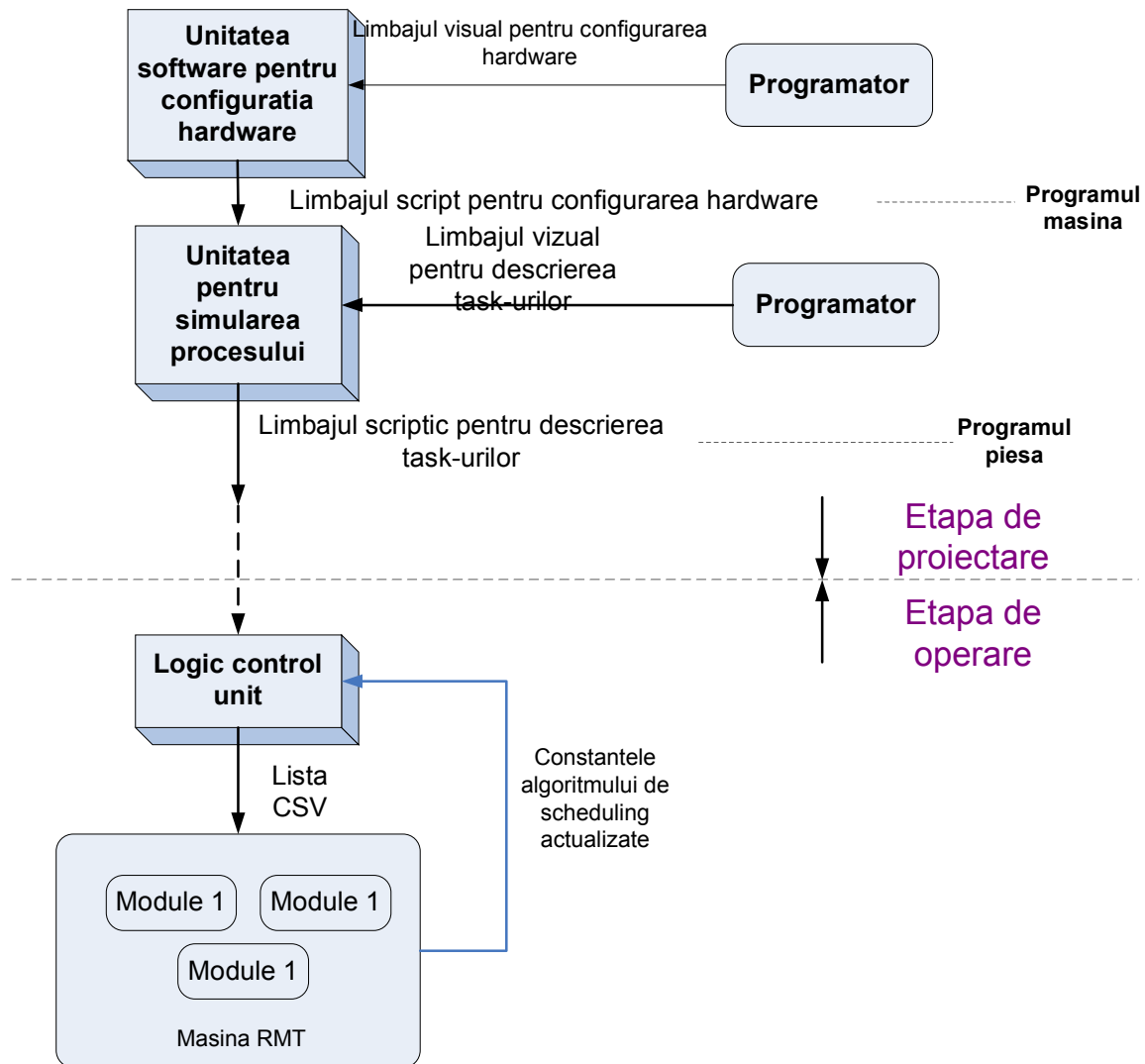


Fig. 10 Schema etapelor de proiectare si operare

### Programul mașina

Algoritmul de procesare a datelor pentru construirea programului-mașina presupune ca programatorul să parcurgă următoarele etape:

- 1) Importă modelul CAD al piesei sau al familiei de piese care se vor prelucra;
- 2) Împarte traiectoria care trebuie parcursă în mai multe segmente. Conform noii concepții, aceste segmente sunt task-urile de realizat.
- 3) Importă și încercă diverse module cu parametrii cinematici și geometrici aferenți. Simulează traiectoriile care trebuiesc executate pentru procesarea piesei.
- 4) Alege acele module care permit parcurgerea fiecărui task;

Programul mașina cuprinde mai multe seturi de informații (figura 11) precum urmează:

- i) *programul scriptic*, care este generat automat de către mediul vizual în care programatorul simulează și alege configurația mașinii, fiind incluse informații de geometrie și cinematică. De asemenea, imaginile scriptice care sunt necesare pentru elaborarea programului piesă i se asociază;
- ii) *o imagine digitală a structurii hardware a mașinii*, pentru reprezentarea etapelor de fixare a modulelor, în scopul înțelegerii facile de către operatorul care urmează să assembleze mașina și
- iii) *lista de module folosite și caracteristicile lor.*

În faza de elaborare a programului piesă este necesar să se cunoască atât caracteristicile geometrice și cinematice cât și caracteristicile generale ale sistemului (turație maximă a motorului, avansul maxim, momentul maxim, etc.).

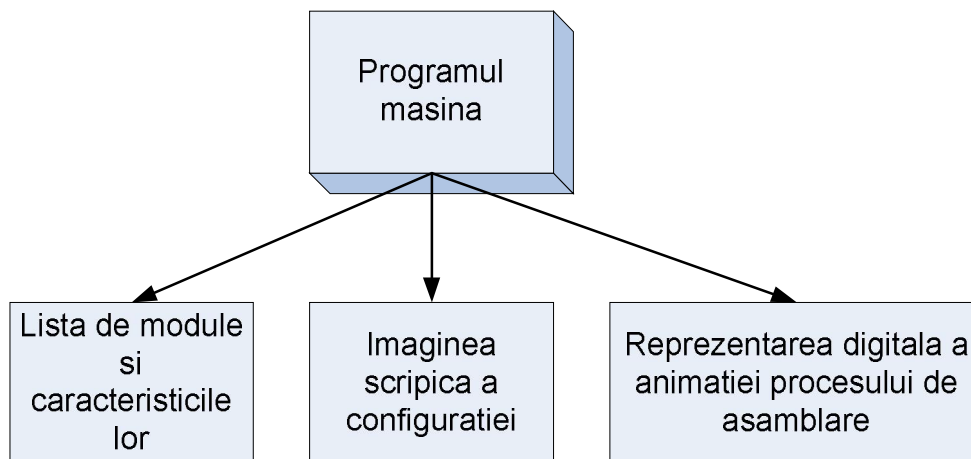


Fig. 11 Părțile constitutive ale programului mașina

Exemplu de imagine scriptică generată automat de mediul vizual :

```

WorldReference(X,Y,Z)
Set.Module23.At(X,Y);
Set.Module45.On.Module23.At(X,Y);
Set.Module98.At(X,Y);
Set.Module45.On.Module98.At(X,Y).Angle(FX).CW
  
```

#### *Programul piesa*

Algoritmul de procesare a datelor pentru construirea programului-piesă presupune, după ce s-a realizat programul-mașină, ca programatorul să parcurgă următoarele etape:

- 1) Importă programul – mașină, care reprezintă configurația curentă a mașini;
- 2) Importă modelul CAD al sculei, care este cunoscut;
- 3) Importă modelul CAD al semifabricatului de procesat și împarte traiectoria care trebuie parcursa în mai multe segmente. Conform noii concepții aceste segmente sunt task-urile de realizat.
- 4) Pentru fiecare task, programatorul precizează cerințele impuse pentru suprafețele corespunzătoare fiecărui task. În acest sens, se introduc informații cum ar fi rugozitatea și toleranța.
- 5) Programatorul introduce modelul CAD (nominal) al semifabricatului, urmând ca, în etapa de testare, să îi modifice profilul, pentru a simula profilul real al semifabricatului.
- 6) Introduce caracteristicile materialului de prelucrat.
- 7) Testează și simulează procesul, considerând cunoscut profilul semifabricatului (în etapa de operare, semifabricatul urmează a fi măsurat pe mașină), profilul nominal al piesei finite. Testarea are ca obiective găsirea unor succesiuni de task-uri, în așa fel încât să nu existe probleme de coliziune și găsirea unor scule potrivite cu cerințele impuse produsului finit.
- 8) Odată stabilite succesiunea task-urilor și sculele potrivite pentru procesare, se procedează la construirea automata a codului care constituie programul piesă.

Programatorul nu stabilește parametrii tehnologici ai procesului, ci doar succesiunea task-urilor și cerințele impuse piesei finite. De asemenea, acesta nu construiește scriptic succesiunea de task-uri, ci o parcurge într-un mediu vizual, în care amplasează sculele în configurația curentă, în așa fel încât să nu se producă coliziuni, stabilește pentru fiecare task cerințele, introducând în segmentul corespunzător taskului valorile limitelor impuse produsului, precum și alte informații.

Documentul tehnologic numit program piesă, folosit în prezent, este unul exclusiv digital, care conține patru grupe de informații (figura 12): fișiere cu date CAD, imaginea scriptică a operației, algoritmul de conducere al mașinii corespunzător fiecărui task, reprezentarea vizuală a operației de reconfigurare a mașinii și prelucrarea piesei.



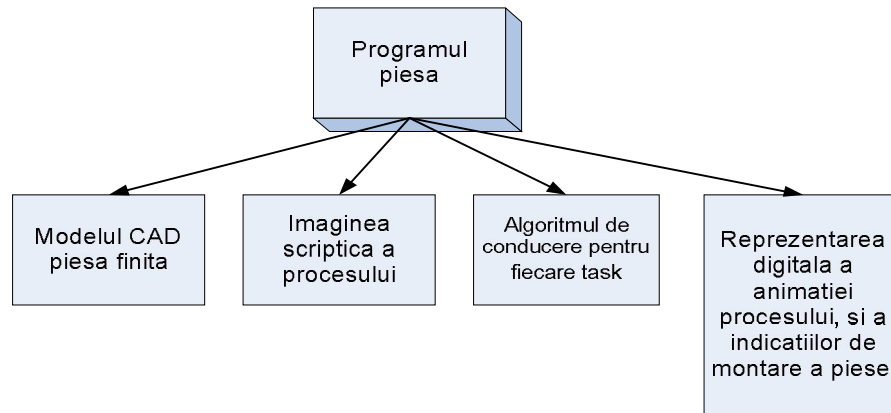


Fig. 12 Părțile constitutive ale programului piesă

În programul scriptic, care este generat automat de către mediul vizual în care programatorul a lucrat, se precizează task-urile iar pentru fiecare task se atașează modulul soft corespunzător pentru conducerea operațională a mașinii unelte în cursul executării taskului, care cuprinde și parametrii tehnologici de conducere.

Așa cum se arată mai jos, sintaxa programului cuprinde informații și instrucțiuni corespunzătoare pașilor parcurși de programator pentru definirea succesiunii task-urilor. De exemplu, se stabilește Taskul 1, ca fiind corespunzător traiectoriei între punctele P1 și P2, cu cerințele impuse piesei finite, reprezentate de rugozitatea  $Rz$  și limitele superioară  $Ts$  și inferioară  $Ti$  ale câmpului de toleranță. Se mai precizează caracteristicile materialului,  $MatCh$ , și cele ale sculei,  $Tool1$ . De asemenea, se precizează acțiunile auxiliare, cum ar fi de exemplu deplasarea rapidă, schimbarea sculei, pornirea lichidului de răcire. Mai jos, se prezintă un model de imagine scriptică a programului piesă.

Define P1(X,Y,Z)

Define P2(X,Y,Z)

Define P3(X,Y,Z);

FastPos(X,Y,Z)

ChangeTool(Tool1)

StartCoolant

Task1(P1,P2)(Rz,Ts,Ti,MatCh,Tool1)

Task2(P2,P3)(Rz,Ts,Ti,MatCh,Tool1)

Stopcoolant

FastPos(X,Y,Z)

Changetool(Tool2)

Task1(P3,P4)(Rz,Ts,Ti,MatCh,Tool1)

Operatorul primește informația în format digital reprezentând programul– piesă. Spre deosebire de momentul actual, când acesta primește un desen, în care se prezintă modul de prindere a piesei și sculei pe mașina unealtă, noua abordare presupune informarea prin intermediul unei animații, care prezintă atât procesul ce urmează a fi derulat, cât și reprezentarea 3D a schemelor de prindere pe mașina a piesei și sculei. În continuare, operatorul fixează semifabricatul pe mașina și rulează programul.

## **2.7 Particularitati ale aplicării noii concepții de conducerii bazate pe planificare reactiva la conducerea la sistem de prelucrare reconfigurabile.**

În figura 1 este descrisă arhitectura de control CNC actuală. Tradițional, CAM au fost considerate unelte de programare NC utilizate pentru a genera codul CNC pentru a conduce mașinile cu control numeric. Majoritatea sistemelor cu control numeric (CNC) adoptă o arhitectură așa cum se prezintă în figura 13. Sunt cunoscute sistemele de conducere numerică computerizată a mașinilor unelte (CNC), cu ajutorul cărora se realizează procesele de manufacturare a unor obiecte fizice. În cazul acestor sisteme, prin programul piesă (elaborat în limbajul ISO G-code), se stabilește șirul acțiunilor elementare pe care mașina unealtă trebuie să le întreprindă, pentru a realiza ciclul de prelucrare a unui exemplar și, pentru fiecare acțiune, se stabilesc valorile mărimilor de stare, astfel încât să fie satisfăcute exigentele tehnice ale produsului rezultat, cum ar fi de exemplu rugozitatea sau precizia. Programul piesă este citit și executat, instrucțiune cu instrucțiune de către sistemul CNC al mașinii. Operatorul monitorizează geometria obiectului prelucrat și desfășurarea procesului de prelucrare și, la nevoie, intervine în conținutul programului piesă, modificând în mod adecvat parametrii regimului de lucru sau valorile unor constante ale programului piesă. De exemplu, la monitorizarea geometriei, constatând că o anumită dimensiune a obiectului prelucrat a depășit sau este foarte aproape să depășească limita câmpului de toleranță, operatorul modifică valoarea corecției de sculă. Un alt exemplu, dacă la monitorizarea desfășurării procesului constată apariția vibrațiilor autoexcitate, atunci intervine pentru reducerea vitezei de așchiere, până la dispariția acestei vibrații. Elaborarea programului piesă, corespunzător procesului de prelucrare a unui anumit obiect fizic, cu ajutorul unei anumite mașini unelte CNC și folosind

un anumit echipament tehnologic, poate fi manuală sau asistată de calculator pe baza unui produs informatic CAM.

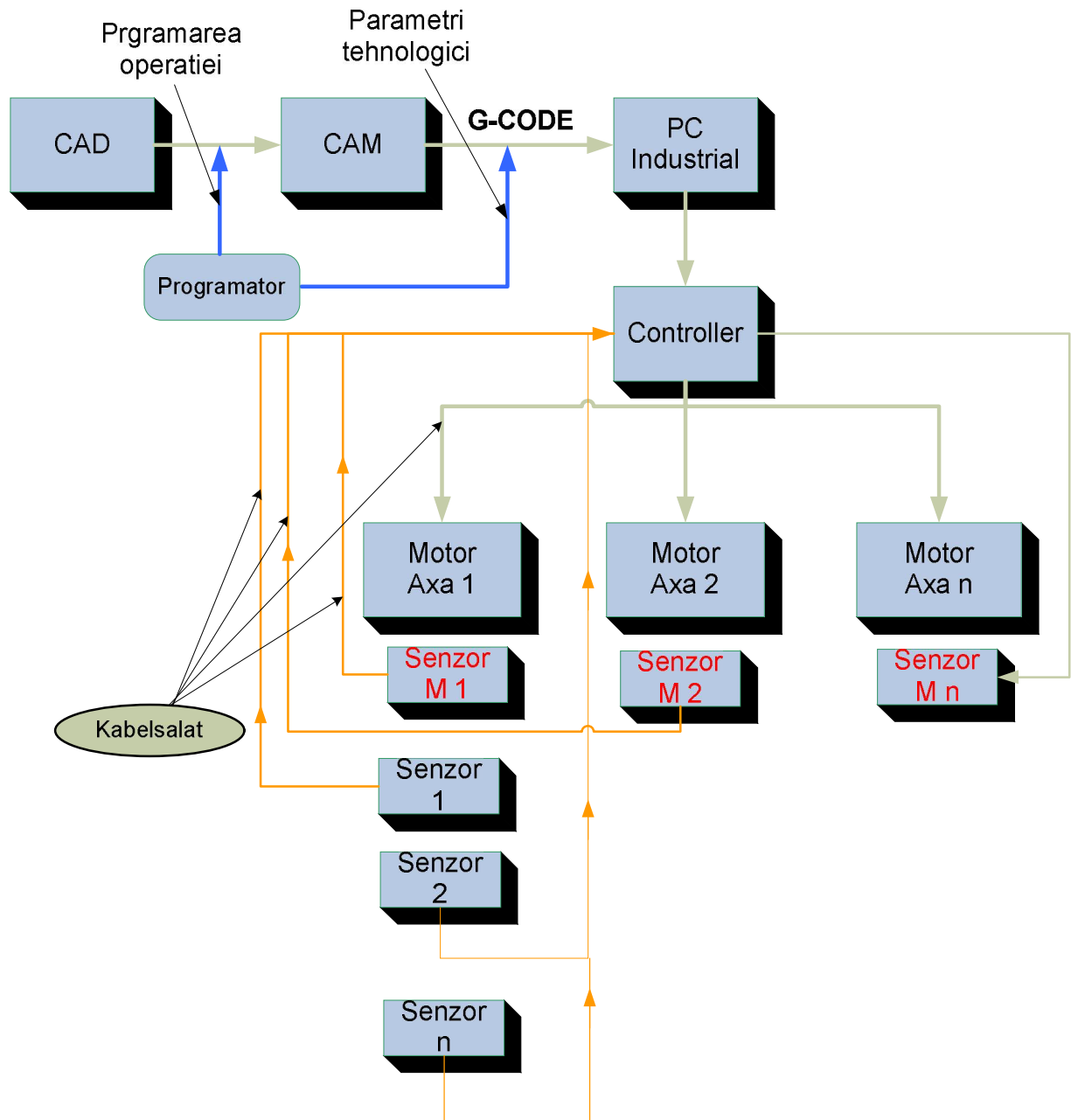


Fig.13 Arhitectura de control CNC actuală

Un sistem computer, care este de obicei un calculator personal (PC) sau alt tip de calculator, este ales ca platformă sistem NC unde codul NC este executat. Funcții, cum ar fi interpolarea, compensarea unghiului de taiere, control servo, etc., sunt implementate în câteva

controlere auxiliare ( cum ar fi PLC- Programmable Logic Controller). Controlerele administrează comenzile pentru a controla motoarele și a citi datele de la senzori.

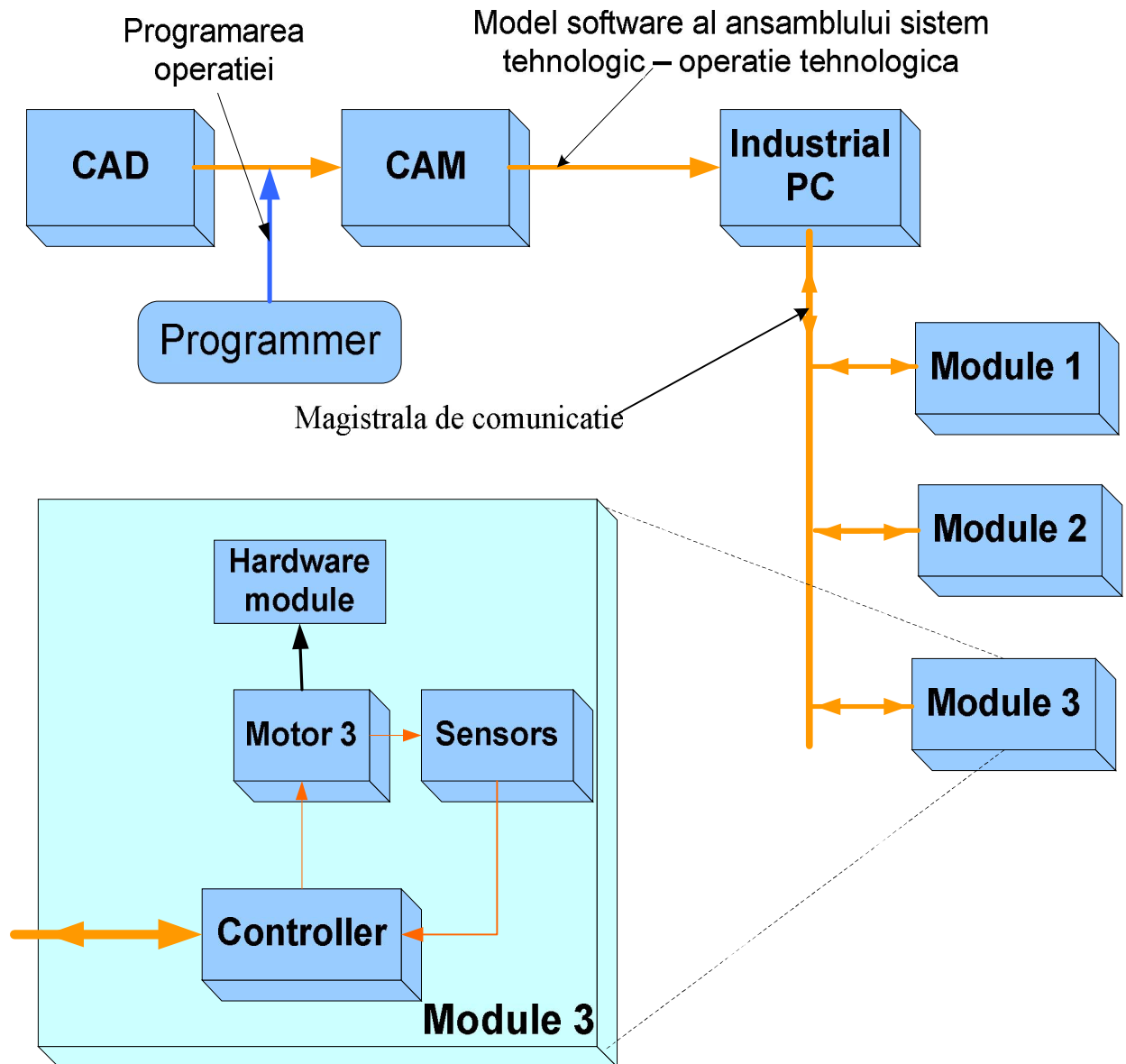


Fig. 14 Arhitectura de control RMT propusă

Abordarea noastră consideră o magistrală capabilă de a comunica cu toate modulele. (Fig.14) Comparativ cu arhitectura actuală, modulele hardware au bucle închise de control reprezentate prin controlere integrate, capabile să comunice cu calculatorul industrial. Informația trimisă modului hardware este reprezentată doar de poziția impusă. De asemenea, dacă un modul hardware are senzori specifici pe lângă controlul poziției mișcărilor, acesta este manevrat de către controlerul de pe modulul hardware. Comparativ cu arhitectura CNC actuală, CAM nu asigură codul sursă pentru a fi interpretat și executat de mașină, ci un

algoritm de calcul cu valori nominale. Oricum, codurile sursă ale softurilor moderne CNC CAM de ieșire descriu o traiectorie geometrică dar nicio informație cu privire la parametrii tehnologici (cum ar fi avansul). Abordarea noastră aduce avantajul de a asigura valorile pentru parametrii tehnologici. Același algoritm realizat în A-CAM este calculat în *Modulul software de evaluare a parametrilor modelului cuplului operatie tehnologica - sistem tehnologic*. În faza de proiectare a procesului în CAM, care este o mașină virtuală cu valori nominale. Derularea produsului software pe mașină se realizează prin măsurarea valorilor, care sunt în mod continuu actualizate și calculate. Așa cum se prezintă în Fig.15 sunt introduse în A-CAM următoarele: modelele CAD a părților cerute, modelul CAD al semifabricatului, cerințele tehnice ale produselor finale (cum ar fi toleranța sau rugozitatea).

Conținutul informațional al programului piesă constă în definirea unor sarcini și nu în succesiunea acțiunilor ce trebuie parcurse pentru obținerea unor caracteristici.

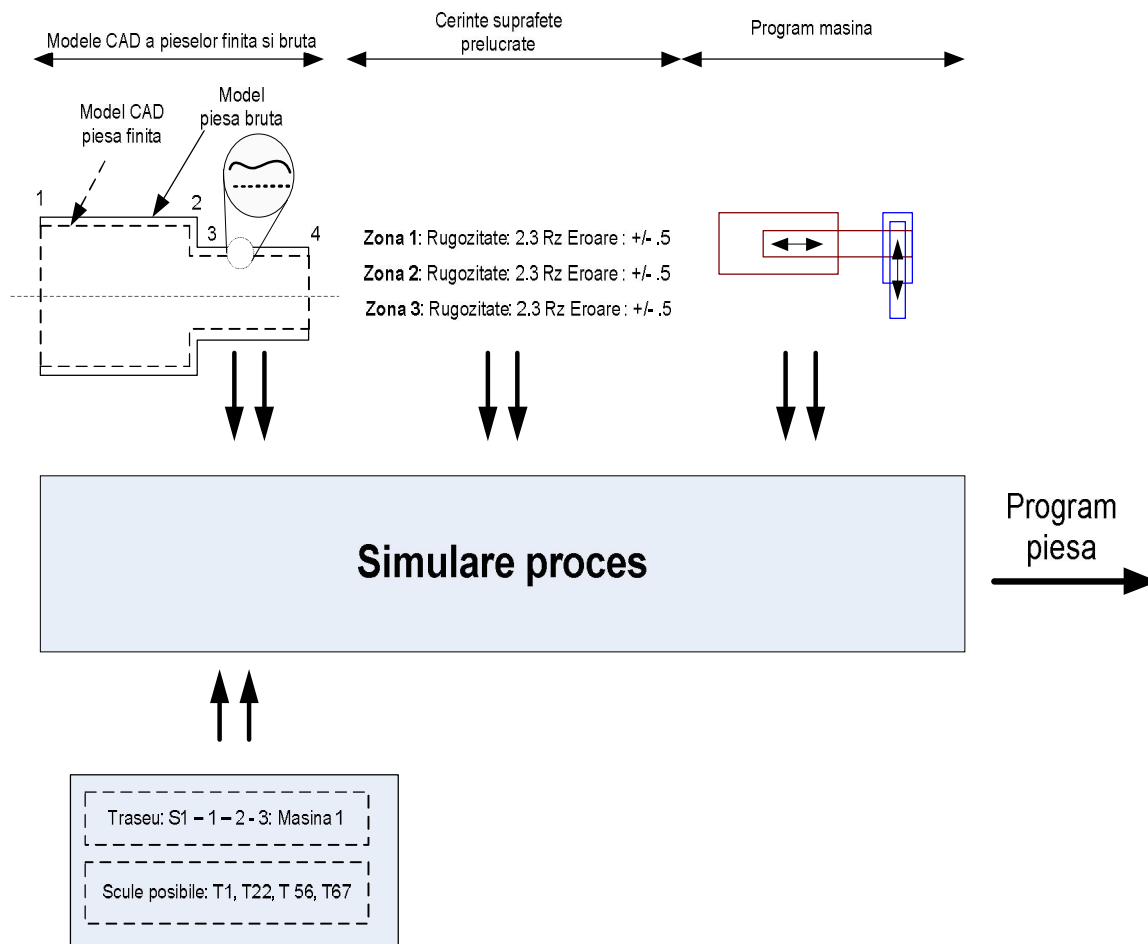


Fig. 15 Simularea procesului

Sistemele CAM (Computer Aided Manufacturing) procesează modelul CAD al piesei și elaborează programul piesa scris în codul ISO G, care se refera strict la geometria traiectoriei ce trebuie parcursă de sculă, în timp ce parametrii regimului de lucru și alte informații trebuie introduse de utilizator. Programul piesă este apoi citit de un interpretor, care preia informațiile conținute în una dintre frazele de comandă, le procesează folosind interpolatoare adecvate și elaborează traiectoria variabilelor de comandă, corespunzătoare respectivei fraze de comandă. În continuare, se comandă motoarelor de acționare parcurgerea punct cu punct a acestei traiectorii. Spre deosebire de sistemele CAM, sistemul conducere propus oferă la ieșire traiectoria variabilelor de stare, care conține toate informațiile, inclusiv parametrii regimului de lucru, necesare executării întregii operației de prelucrare. În plus, spre deosebire de sistemele CAM, unde pe parcursul executării unei fraze de comandă, parametrii regimului de lucru rămân constanți, sistemul de conducere propus asigură modificarea în mod continuu a valorilor variabilelor de comandă, în funcție de evoluția comportării sistemului de manufacturare și de modul real în care se desfășoară procesul de prelucrare. În ceea ce privește testarea coliziunilor, aceasta se realizează automat în etapa de simulare virtuală, luând în considerare faptul că se cunoaște configurația geometrică a strungului, cea a sculelor și a semifabricatului.

## **2.8 Aplicatie software. Configurarea masinii unelte si analiza configuratiei acesteia pe baza simularii virtuale a masinii**

Metoda propusă pentru realizarea de prototipuri virtuale interactive RMT constă în următoarele etape principale:

- 1) construirea și reprezentarea geometrică a hardware-ului mașinii folosind modulele hardware (luind în considerare caracteristicile geometrice, cinematice și funcționale ale acestora);
- 2) construirea modelului cinematic direct și invers pentru lanțul cinematic al mașinii-unealte
- 3) testarea modelului interactiv al mașinii prin înlocuirea sau îndepărtarea modulelor până la găsirea unei configurații corespunzătoare
- 4) efectuarea în mod automat a reconfigurării controlului

Practic, algoritmul pentru aplicarea metodei constă în două etape, configurare și testarea hardware –ului (efectuat de către utilizator) și reconfigurarea controlului (generat automat).

În primul rând, configurare hardware, după cum se arată în Fig. 2, se face prin testarea configurației cinematice și geometrice, ceea ce implică o serie de provocări tehnice care trebuie depășite pentru a construi mașina virtuală : detectarea coliziunilor, constrângerile inter-module, ca urmare a dependenței cinematice (un modul este amplasat pe un altul ), simularea virtuală, manipularea obiectelor intuitiv și prelucrare piesei virtuale. Modelul sistemului de prelucrare, are drept țintă pentru a simula, a evalua și de a optimiza procesul de prelucrare efectiv de testare a modulelor și în ceea ce privește cinematica și caracteristicile lor fizice. Folosind prelucrarea virtuale utilizate în faza de simulare a procesului de prelucrare, utilizatorul poate construi mai târziu cadru pentru sistemul de optimizare on-situ de prelucrare pe RMT.

Detectarea coliziunilor este testată pentru a verifica configurația mașini, iar utilizatorul este capabil de a anima mașină pentru a asigura că nici o coliziune va avea loc în timpul prelucrării unei piese.. În consecință, într-un sistem virtual RMT aceste piese sunt reproduse.

Modelul virtual al mașinii este construit prin schimbarea iterativă a diferitelor module din bibliotecă de module. Dacă un modul hardware anumit nu satisface procesul de fabricație, atunci este respins de software și utilizatorul poate înlocui cu unul corespunzător. Prin încercarea diferitelor variante de design și sunt îndeplinite cerințele impuse. Utilizatorul poate naviga în atelierul virtual și poate adăuga cu ușurință, înlătura și înlocui modulele pentru a construi mașina necesară conform cinematicii și caracteristicile sale de prelucrare. Modulele utilizate în VE sunt module generice fiecare având un grad de libertate .

Fiecare lanț cinematic este construit prin adăugarea unui modul hardware compatibil peste cel anterior. Bazat pe formalismul din robotica, modelul cinematic direct și invers Denevit-Hartenberg este construit lanțul cinematic.

În ceea ce privește sistemul de scule, în mod similar cu selectarea hardware module, utilizatorul poate selecta din bibliotecă o anumită scula. În timp ce partea a fi prelucrată este solid reprezentat piesa de prelucrat este transparent pentru a fi identificate cu ușurință instrumentul potrivit.

Normele de software-ul de compatibilitate între module de complexa este oferind un sistem sigur nu. De exemplu, un modul de traducere foarte grele, nu poate fi fixat pe un modul electric redus.

În scopul de a construi reprezentarea digitală a complexa, utilizatorul poate selecta opțiunea de înregistrare și un film este generat prezintă proiectarea de masini si de lucru pentru o mai bună înțelegere pentru echipa complexa. De asemenea, simulare poate genera rapoarte și statistici detaliate care descriu comportamentul sistemului RMT în studiu.

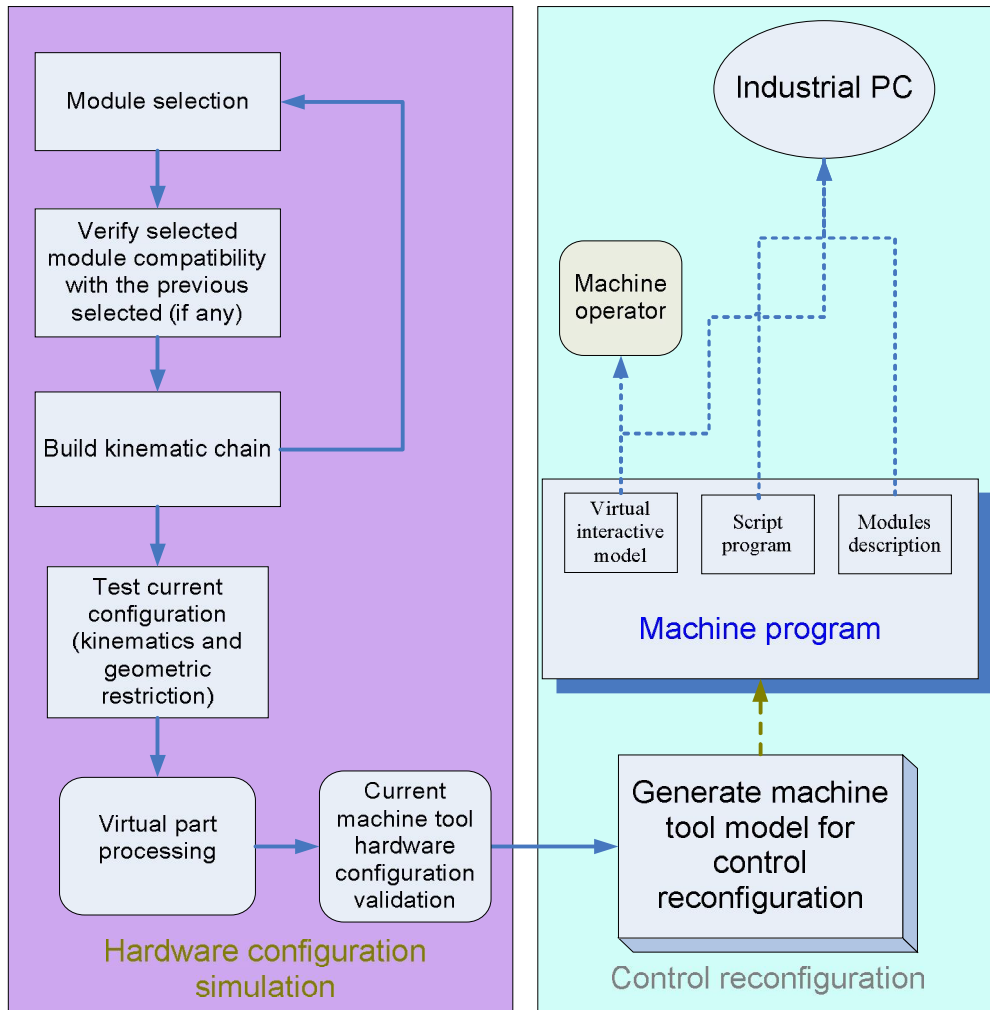


Fig.2 Flowchart representation of the method

În al doilea rând, reconfigurarea controlului (Fig. 2) se realizează prin construirea a ceea ce noi numim "programul de mașină", care este de fapt un model al noii configurații. În timp ce programul piesa este o descriere a unei operațiuni, " programul-masina" este un instrument de descriere configurarii mașinii. Configurația masinii virtuale este un model de simulare pe calculator a unui produs fizic care funcționează ca o mașină reală. Reconfigurarea



controlului și software-ul presupune reconfigurarea așa fel încât PC-ul central să "știe" cinematică configurației, precum și caracteristicile fiecărui modul hardware. Prin aceasta, modelul actual de configurare hardware-ul este utilizat pentru reconfigurarea controlului.

Modelul outputează arhitectura hardware-ul adecvat, având în vedere ca inputul sarcinile de prelucrare care trebuie să fie efectuate.

Utilizatorul trebuie să urmeze mai multe etape, după cum urmează:

- 1) Alege modulele care permit realizarea fiecărei sarcini.
- 2) Testarea configurației actuale în ceea ce privește restricțiile cinematic și geometrice
- 3) Efectuarea prelucrării virtuale
- 4) Construirea programului mașină.

Mașină-program cuprinde mai multe seturi de informații (Fig. 2), după cum urmează:

i) programul de script-ul, care este generat în mod automat de către mediul virtual care descrie lanțul cinematic, și informațiile lor adiționale.

ii) modelul virtual interactiv, informațiile care urmează să fie utilizate de către operatorii de asamblare a noii mașini pentru o înțelegere ușoară a procesului de asamblare a modulelor hardware.. Modelul virtual interactiv oferă capacitatea operatorului de a naviga printr-un model virtual 3D, pentru a citi informații cu privire la asamblare și pentru a permite o gamă largă de interacțiuni a utilizatorului cu mașina virtuală. De asemenea, modelul virtual interactiv este instalat pe PC-ul industrial al mașinii pentru a fi utilizate în timpul funcționării mașinii unelte.

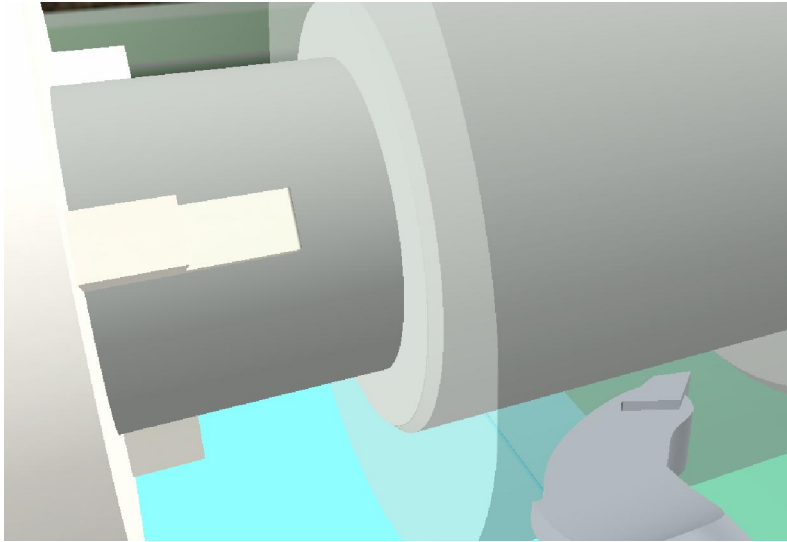
iii) lista de module pentru a fi utilizate și caracteristicile lor.

După ce s-au urmat pașii de mai sus, și arhitectura mașina testată este validată de către utilizator, modelul mașinii este generată și, prin urmare, controlul este reconfigurat prin intermediul programului-mașina.

### **Proof-of-concept demonstrator**



În atelierul virtual utilizatorul construiește configurația mașinii curente prin selectarea unui modul potrivit pentru a fi adăugat în următoarea parte a lanțului cinematic. Așa cum se vede în figura de mai sus, modulul selectat este afișat în centrul atelierului virtual și este în continuă rotație pentru o mai bună reprezentare. Cu ajutorul mouse-ului și joystickului operatorul este capabil de a naviga în mediul virtual pentru a observa asamblarea mașinii. În mod similar, procesul de prelucrare poate fi simulat. Așa cum se vede în Fig. piesa de prelucrat este afișată ca translucidă și piesa este prezentată ca solid. Prin simularea mișcării de axe, piesa este practic prelucrată pentru a valida arhitectura mașinii curente. Utilizatorul poate încerca diferite instrumente pentru procesul de prelucrare și operatorul are posibilitatea de a vedea utilizând funcția zoom detalii specifice. Așa cum este descris în Fig. utilizatorul este în măsură să observe că scula actuală nu este adecvată pentru piesa curentă, prin urmare, o altă scula este selectată.



După cum se vede Fig.3 Fig.4 mai multe module hardware-ul au fost folosite pentru a construi un strung și o mașină de frezat. Modulele de translare sunt folosite pentru ambele configurații, în timp ce în configurația strung a fost adăugat un grad de rotație suplimentare de libertate pentru a construi o freza. Această configurație simplă a fost construită pentru a demonstra fezabilitatea sistemului de simulare și, cel mai important, pentru a dovedi capacitatea de a genera în mod automat modelul mașinii.

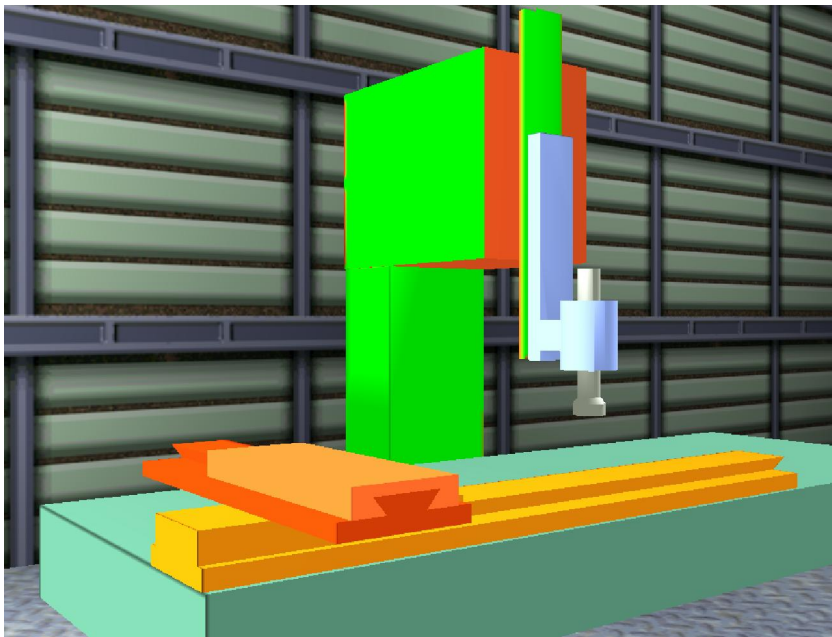


Fig. 3 A view of the virtual environment. The reconfigurable machine tool configured as milling machine

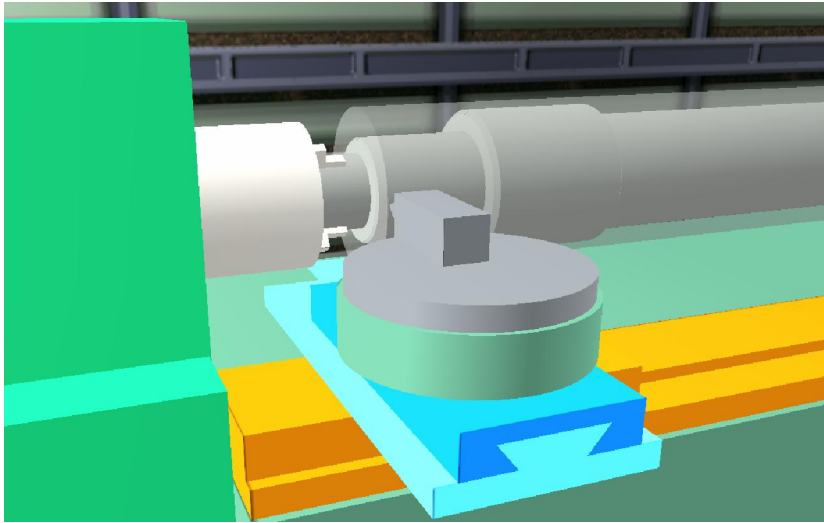


Fig. 4 A view of the virtual environment. The reconfigurable machine tool configured as lathe

Metoda de reconfigurarea a fost implementata folosind Visual C și Lite-C, bazat pe metoda de modelare propusă a masinilor-unelte reconfigurabile. Dezvoltarea Proof-of-the-concept a confirmat faptul că metoda este adecvată pentru punerea în aplicare a fabricației sistemelor reconfigurabile.

## 2.9 Concluzii

Arhitectura propusă înlătură dezavantajele de mai sus prin aceea că, în scopul de a diminua efortul de programare și de a optimiza procesul de manufacturare, chiar în condițiile în care comportarea sistemului de manufacturare evoluează în timp și spațiu: a) conținutul informațional al programului piesă constă în caracteristicile obiectului manufacturat și nu în succesiunea acțiunilor ce trebuie întreprinse pentru obținerea acestor caracteristici; b) ciclul de lucru al mașinii este discretizat într-un număr mare de secvențe, astfel încât, în cursul unei secvențe, modificările mărimilor de stare să fie neglijabile, pentru ca valorile acestora să poată fi considerate constante, apoi, c) pentru fiecare secvență, procesul de manufacturare este derulat virtual și potrivit algoritmului de optimizare, sunt determinate valorile optime ale variabilelor de comanda, după care d) respectivele valori sunt comandate secvențial în timp, astfel încât mașina să atingă succesiv aceste valori, urmând ca, e) prin monitorizarea

procesului să se determine corecțiile valorilor optime ale variabilelor de comandă, în conformitate cu evoluția în timp și spațiu a comportării sistemului de manufacturare și a modului cum se desfasoara procesul de manufacturare.

## **Capitolul III**

### **Conceperea unei tehnici de prognoza si compensare online a erorilor de prelucrare**

#### **1. Aspecte generale**

A fost elaborata o metoda de modelare online a relatiei intre eroarea de prelucrare si marimile de stare ale masinilor tehnologice, bazata pe modelarea SVM (support vector machine) online a semnalelor transmise de sistemul senzorial.

Au fost desfasurate cercetari experimentale privind aplicarea metodei de modelare in prognoza erorilor de prelucrare, in cazul prelucrarii unui lot de piese. A fost conceput sistemul de prognoza si compensare online a erorilor de prelucrare bazat pe motoare piezoelectrice. Performanta sistemului de prognoza si compensare a fost evaluata experimental, folosind drept criteriu ponderea erorii remanente ramasa dupa compensare in eroarea initiala. Rezultatele au aratat ca prin modelare si compensare eroarea de prelucrare a fost redusa in medie de 2,5 ori.

#### **2. Modul de abordare**

A fost realizata o instalatie experimentală (fig.2 si fig. 3), care este destinata a fi folosita pentru cercetarile experimentale din proiect, urmand ca in final sa serveasca drept baza pentru dezvoltarea masinii prototip. Schema instalatiei experimental realizata in aceasta etapa de raportare este prezentata in fig.1. Cercetarile experimentale au constat in testarea metodei de modelare si prognoza a deviatii dimensionale, prin prelucrarea unui lot experimental de piese. Diagrame tipice ale fortei de aschiere (masurata si modelata cu SVM) si ale deviatiei dimensionale (masurata si prognozata) sunt prezentate in fig. 4 respectiv 5 In Fig. 6 este prezentat grafic modelul sistemului tehnologic, rezultat in urma identificarii acestuia si folosit pentru prognoza deviatiei dimensionale (redata in fig.4).

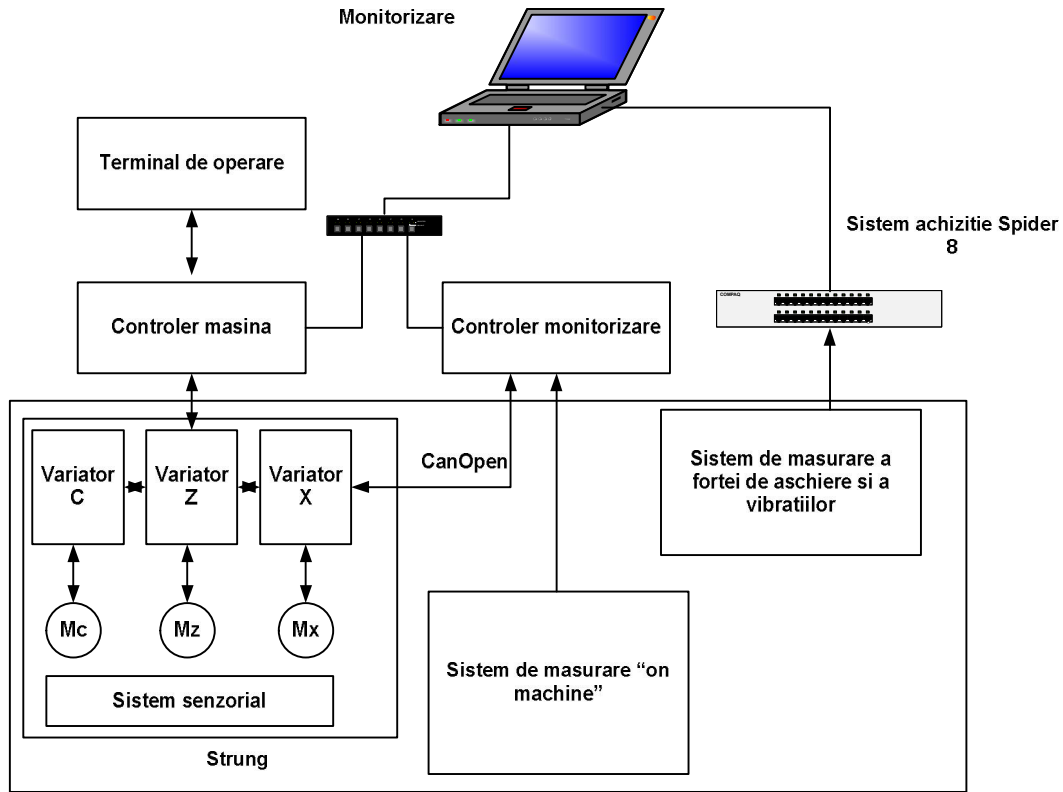


Fig. 1 Schema masinii prototip dezvoltata in cadrul proiectului si folosita pentru aplicarea experimentală a metodei de modelare, prognoza și compensare online a erorilor de prelucrare, in cazul prelucrării unui lot de piese.

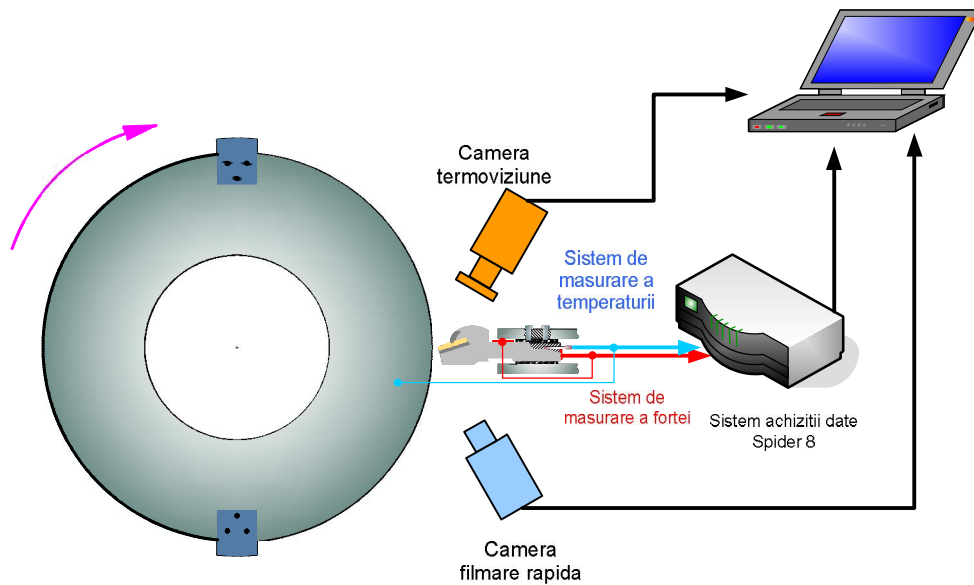


Fig. 2. Schema dispozitivului experimental

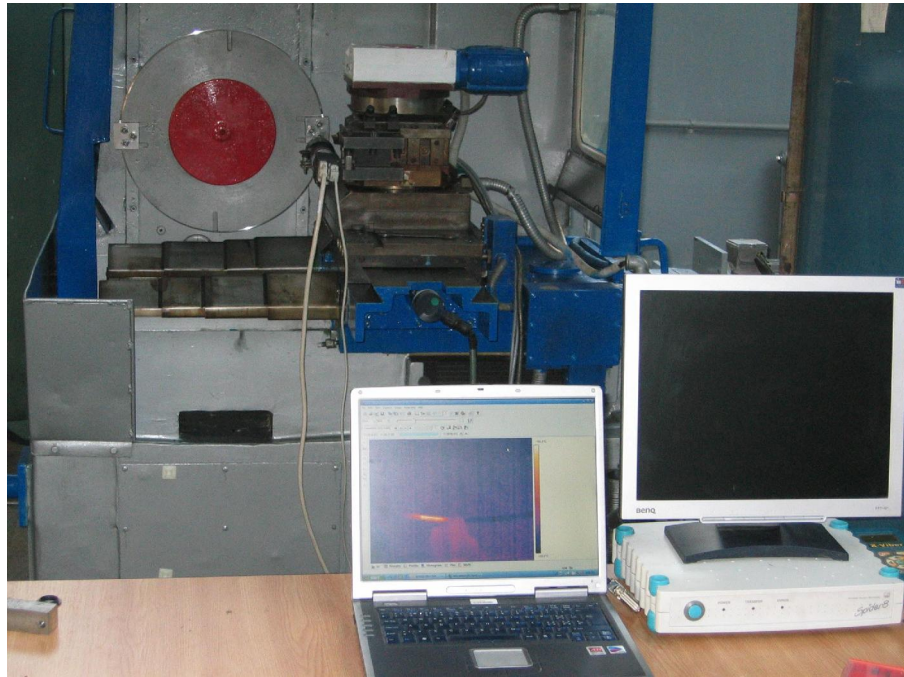


Fig.3. Standul de experimentare

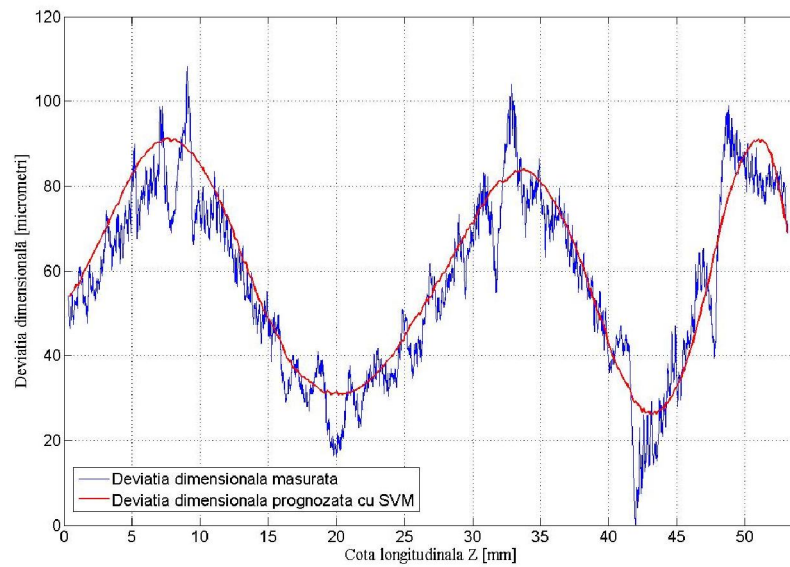


Fig.4 Valorile prognozate si masurate ale deviatiei functie de coordonata Z (diagrama tipica)



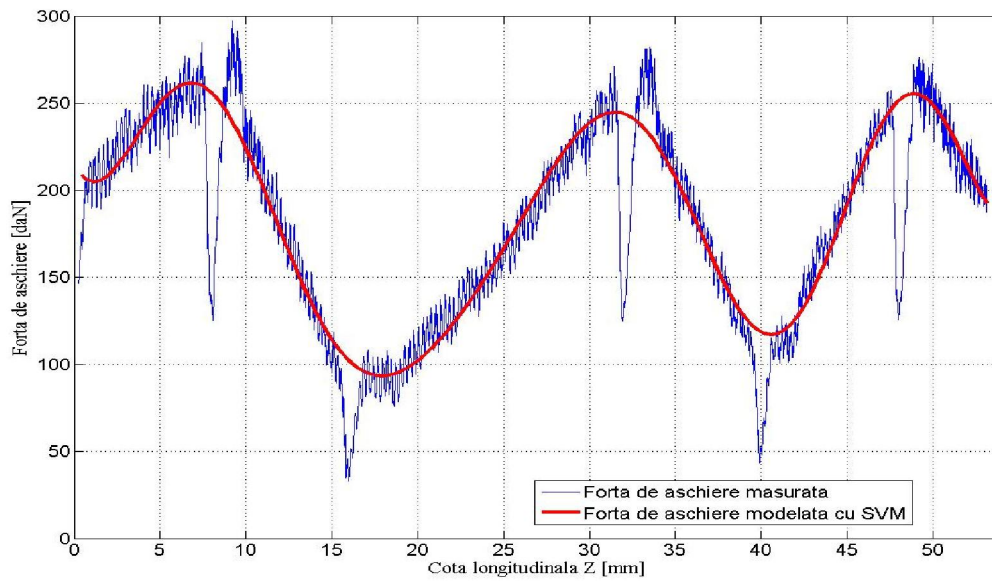


Fig. 5 Modelarea prin tehnici SVM a forței de aschiere (diagrama tipică)

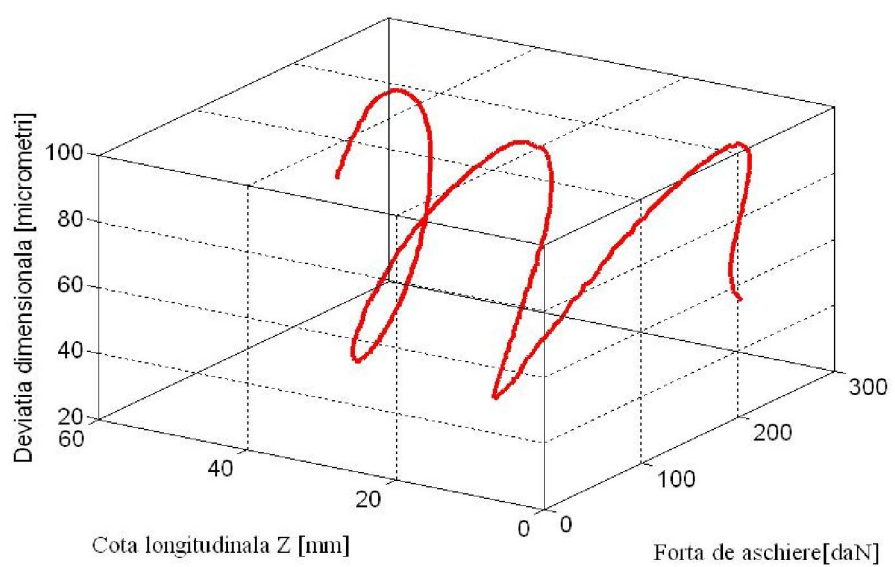


Fig. 6 Modelul matematic al sistemului tehnologic rezultat in urma identificării online

////////////////////////////////////

////////////////////////////////////



### **3. Conceperea unei metodici de conducere holistic-integrată a sistemelor tehnologice**

---

- 3.1 *Conceperea arhitecturii sistemului de conducere*
  - 3.2 *Conducerea la nivel de program*
  - 3.3 *Conducerea la nivel operațional*
    - 3.3.1. Obiectivele conducerii la nivel operațional
    - 3.3.2. Tipologia modelelor
    - 3.3.3. Identificarea relațiilor cauzale
  - 3.4 *Controlul preciziei*
    - 3.4.1. Formularea problemei
    - 3.4.2. Idei cheie
    - 3.4.3. Abordarea holistic-integrată a controlului dimensional
    - 3.4.4. Controlul adaptiv al erorilor de proces
    - 3.4.5. Controlul adaptiv predictiv al erorilor de sistem
  - 3.5 *Controlul stabilității sistemului tehnologic*
  - 3.6 *Controlul economicității operației tehnologice*
    - 3.6.1. Modelarea econometrică a procesului de prelucrare
    - 3.6.2. Costul specific
    - 3.6.3. Timpul specific
    - 3.6.4. Rata specifică a profitului
  - 3.7 *Controlul ecologicității*
  - 3.8 *Conducere la nivel canonic*
  - 3.9 *Conducere la nivel strategic*
  - 3.10 *Concluzii*
- 

#### **Conceperea arhitecturii sistemului de conducere**

Abordarea holistic-integrată a problemei conducerii ansamblului proces-mașină presupune conceperea unei arhitecturi de control care să gestioneze optimal-adaptiv, atât aspectele referitoare la procesul de așchiere, cât și cele referitoare la economicitatea și ecologicitatea sistemului tehnologic.

*Conducerea la nivel de program* presupune gestionarea sistemului astfel încât acesta să realizeze transformarea semifabricatului în piesă, prin intermediul unor operații tehnologice specifice.

Ideal ar fi ca toate cerințele, impuse piesei din punct de vedere tehnologic, să fie îndeplinite, fără a fi necesar altceva decât introducerea unui program piesă alcătuit corect. În realitate, aceste cerințe nu sunt îndeplinite, piesa prelucrată nu este identică cu piesa programată prin programul piesă, deoarece apar abateri de formă, dimensiuni sau de poziție reciprocă ale suprafețelor prelucrate.

De asemenea, parametrii regimului de așchiere se pot dovedi ca fiind inadecvați, în sensul că, fie regimul de așchiere este prea puțin intens, lucru care afectează productivitatea procesului, fie prea intens, ceea ce face ca stabilitatea sistemului tehnologic să nu fie asigurată.

Prelucrarea în condițiile în care stabilitatea sistemului tehnologic nu este asigurată determină uzura prematură a sculelor așchietoare, obținerea unor suprafețe care nu au calitate corespunzătoare și pune în pericol siguranța personalului și a mașinii.

Apare nevoia stabilirii unor corecții la programul inițial de prelucrare, astfel încât procesul de așchiere să poată fi condus pentru a corespunde situație reale și de actualitate a sistemului tehnologic. Elaborarea corecțiilor este realizată prin *conducere la nivel operațional*, pe baza informațiilor obținute de la ansamblul proces - mașină.

*Conducerea la nivel canonic* constă în a comanda sistemul de control operațional pe baza unor reguli impuse. Aceste reguli (canoane) vizează aspecte legate de stabilirea unor direcții prioritare privind economicitatea, ecologicitatea, precizia de prelucrare sau productivitatea.

*Conducerea la nivel strategic* este realizată de sistemul de management și are la intrare modificările apărute în mediul economic precum și valorile curente ale indicatorilor de performanță, iar la ieșire ajustările de politici, necesare pentru adaptarea la mediu economic a sistemului tehnologic.

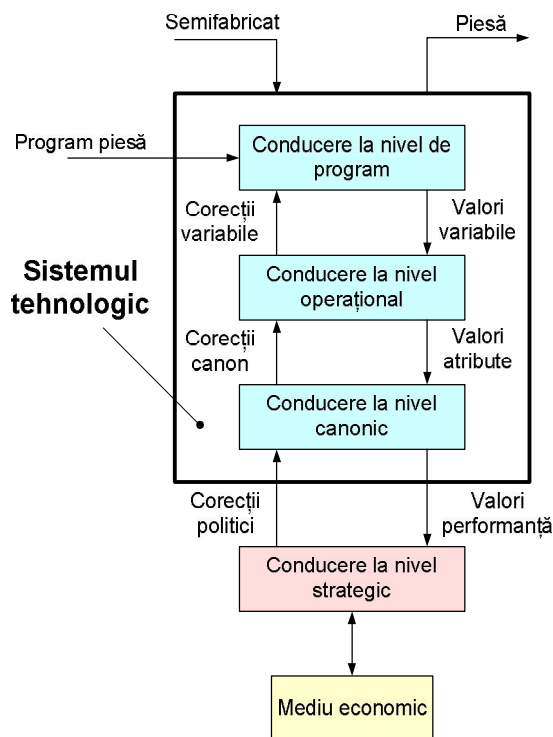


Fig. 0.1. Sistemul de control holistic-integrat

## Conducerea la nivel de program

Sistemele tehnologice la care se referă prezenta lucrare, sunt cele reconfigurabile, controlate numeric după program, în cazul cărora ideea cheie a reconfigurabilității hardware este structurarea mașinii unelte în module mecatronice universale. Fiecare modul asigură unul dintre gradele de libertate active ale mașinii unelte, iar joncțiunile dintre module reprezintă gradele de libertate pasive ale acesteia.

În alta lucrare [Marin 2009], a fost elaborat principiul controlului bazat pe *planificare reactivă*, în scopul de a elimina nevoia reconfigurabilității controlului numeric atunci când arhitectura hardware a mașinii unelte a suferit modificări. Potrivit acestui principiu, programul piesă este un produs software, care permite descrierea *cu înaltă rezoluție* a ciclului de lucru, pe baza datelor privind sarcina de prelucrare și caracteristicile sistemului tehnologic. În figura 0.3 se prezintă modul în care șirul seturilor de valori ale variabilelor sistemului este transmis unei unități de control logic, care le distribuie în mod adecvat modulelor mecatronice ale mașinii unelte.

Aceasta reprezintă conducerea la nivel de program a procesului și, dacă datele inițiale în produsul software ce reprezintă programul piesa nu ar suferi modificări, atunci rezultatele obținute ar fi exact cele programate. Din motivele arătate în capitolul precedent, această ipoteză nu se confirmă, și de aceea este necesară o buclă de control bazată pe reacție inversă, prin care sistemul să se adapteze la noile condiții. Această intervenție constă în *replanificarea ciclului de lucru al mașinii*, imediat ce, măcar una dintre datele inițiale, a suferit modificări.

*Conducerea la nivel de program nu face obiectul acestei lucrări.*

În schimb, bucla de control bazată pe feedback, care, fiind parcursă în timpul funcționării sistemului tehnologic, este numită buclă de control operațional, a fost studiată în detaliu și prezentată în capitolele următoare ale lucrării.

## Conducerea la nivel operațional

### Obiectivele conducerii la nivel operațional

Arhitectura sistemului de conducere holistic-integrată, se prezintă în figura 0.3, evidențiindu-se elementele structurale ale conducerii la nivel de program și ale conducerii la nivel operațional.

Sistemul de conducere la nivel de program are ca intrare un model parametric al ansamblului sistem tehnologic-operație tehnologică, construit sub forma unui produs software specific, care este controlabil printr-un set de parametri. Inițial acești parametri au valori implicite dar, pe parcursul prelucrării piesei, acestea se corectează de către sistemul de conducere la nivel operațional, dacă situația curentă o impune. Din această cauză programatorul poate folosi doar valori aproximative ale acestor parametri.

Ieșirea modelului parametric software al ansamblului sistem tehnologic-operație tehnologică reprezintă traiectoria variabilelor de comandă, mai precis o listă ce conține poziția impusă fiecărei axe pe parcursul traiectoriei. Această listă este recepționată de unitatea de control

logic, care are rolul de secvențiere a ciclului de lucru, prin transmiterea la momente bine stabilite a valorilor de comandă pentru fiecare axă de deplasare a mașinii.

Ansamblul proces-mașină are drept intrare semifabricatul care trebuie transformat în piesă finită.

Sistemul de conducere la nivel de program este monitorizat de către sistemul de conducere la nivel operațional, prezentat în figura 0.2. , care construiește o bază de date ce va conține informații culese de la senzorii mașinii. Informațiile sunt achiziționate, atât în timpul prelucrării, cât și înainte și după aceasta. Înainte de prelucrare se identifică modelul semifabricatului, iar după ce prelucrarea s-a realizat se determină rezultatul prelucrării, evaluându-se astfel piesa obținută.

Conducerea la nivel operațional se bazează pe un *sistem de învățare*, ce are rolul de a construi două tipuri de modele: *modele de corecție a parametrilor de control* și *modele de evaluare a atributelor*.

Pentru generarea modelelor, sistemul de învățare determină în primul rând *relațiile cauzale*, pentru a determina acele variabile provenite din baza de date care vor fi folosite pentru construcția modelului. După identificare vor fi selectate *seturile de date relevante*, adică înregistrările din baza de date care vor fi utilizate la construirea modelului. Urmează analiza tipologiei modelelor disponibile, ce implică determinarea *tipului de model* prin care erorile de modelare sunt minime.

Modelele folosite pentru corecții au drept scop principal determinarea următorilor parametri de control care sunt folosiți de unitatea de rulare a modelului parametric software al ansamblului sistem tehnologic-operație tehnologică:

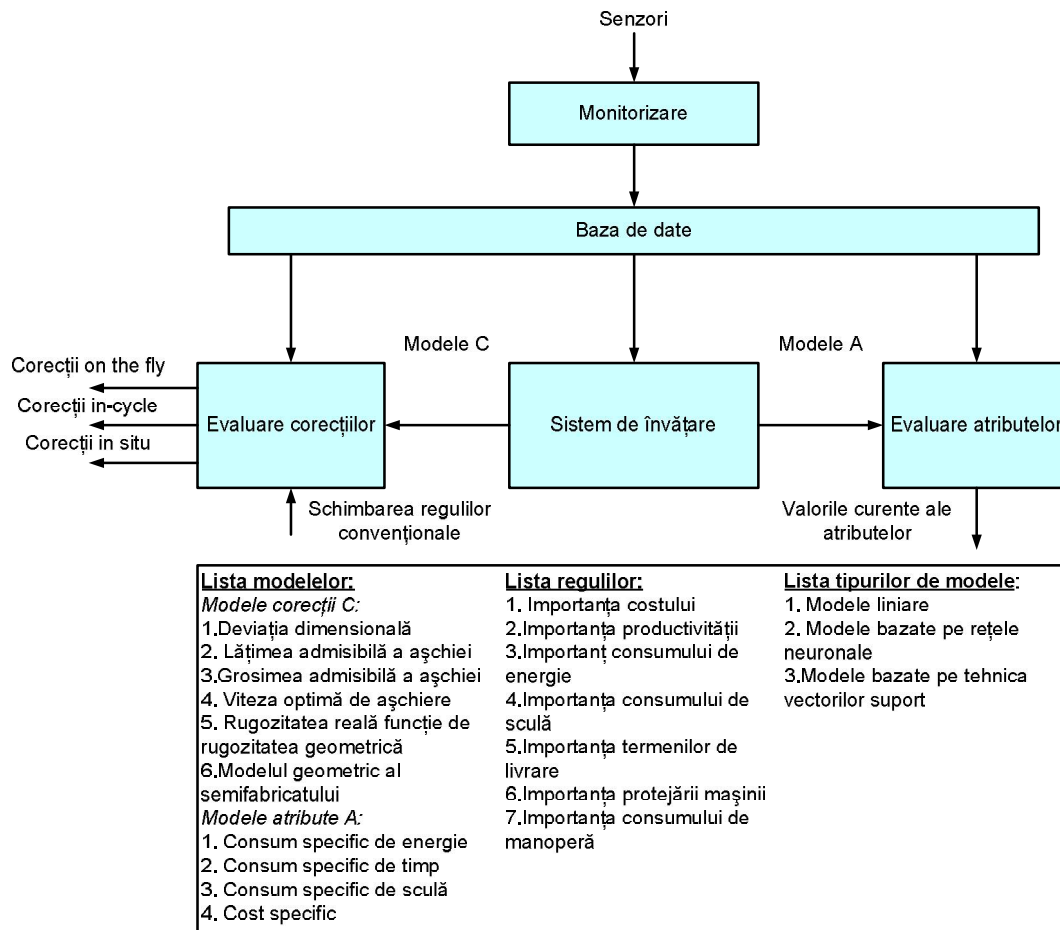
- *Deviația dimensională prognozată*, corespunzătoare unui set de puncte ce aparțin traiectoriei sculei în raport cu semifabricatul;
- *Lățimea admisibilă a așchiei*, mărime care influențează stabilitatea procesului de așchiere;
- *Grosimea admisibilă a așchiei*, parametru limitativ al avansului pentru a proteja muchia sculei așchietoare;
- *Aria admisibilă a așchiei*, parametru limitativ prin care se protejează sistemul tehnologic împotriva suprasolicitării cu forță;
- *Viteza optimă de așchiere*, parametru care influențează productivitatea, economicitatea și ecologicitatea procesului de așchiere;

- *Rugozitatea geometrică admisibilă*, funcție de rugozitatea reală limitată prin desenul de execuție al piesei.

Modelele de evaluare a atributelor furnizează valoarea curentă a atributelor care vor fi folosite de către sistemul de control canonic, sistem controlat de sistemul de control strategic. Aceste atribute sunt:

- consumul specific de energie;
- consumul specific de timp;
- consumul specific de sculă;
- costul specific;
- emisia de CO<sub>2</sub> pentru 1dm<sup>3</sup> de material prelucrat.

*Identificarea relațiilor cauzale* va fi realizată utilizând metode din domeniul data-mining cunoscute sub denumirea de „filtre de atribute”. Pentru determinarea relațiilor între variabilele de interes pentru care se realizează modelul și celelalte variabile conținute în baza de date, se vor folosi tehnicile RRelief și Corelation Feature Selection.





*Fig. 0.2. Sistemul de conducere la nivel operațional*

*Selectarea seturilor de date* va avea în vedere ideea folosirii numărului optim de date pe baza cărora să se construiască modelul matematic, astfel încât acesta să descrie cât mai bine posibil comportarea ansamblului modelat.

*Selectarea tipului de model* se va realiza pe baza evaluării virtuale, retrospective a tuturor modelelor disponibile în sistemul de conducere operațional sub aspectul performanței de modelare. În acest scop, fiecare dintre modelele disponibile va fi testat prin aplicarea virtuală succesivă la controlul operațional al fiecăreia dintre piesele din lot care au fost deja prelucrate. Rezultatul simulării va fi comparat cu valorile măsurate ale parametrului controlat rezultând performanța de modelare. După ce toate modelele disponibile au fost astfel evaluate se va alege modelul cu cea mai bună performanță, și va fi utilizat la controlul operațional al piesei curente. În acest fel selectarea tipului de model este un proces de optimizare exhaustivă.

*Construcția modelului* constă în determinarea parametrilor modelului selectat, astfel încât acesta să descrie cât mai bine comportarea la momentul curent a sistemului modelat.

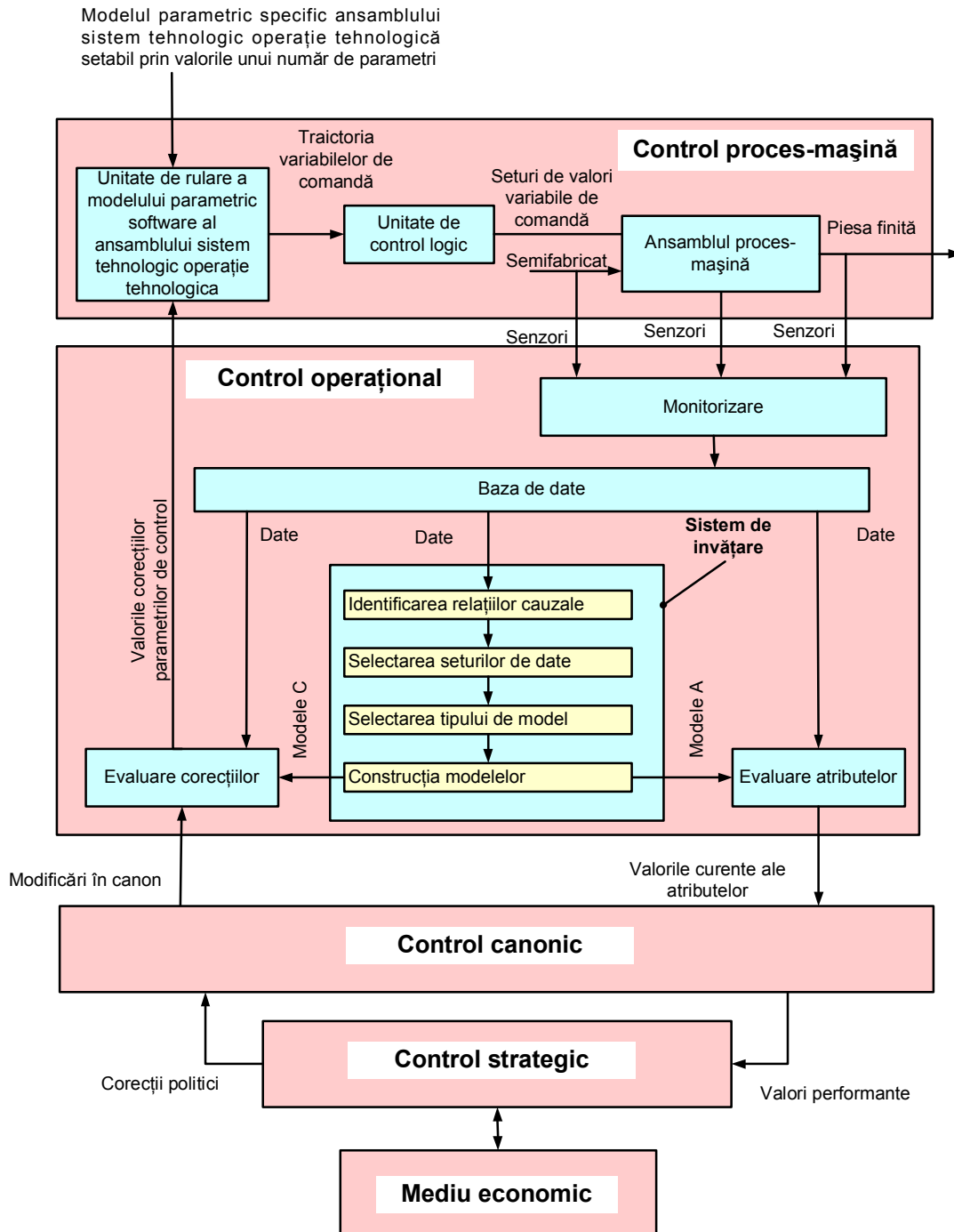


Fig. 0.3. Arhitectura sistemului de conducere holistic-integrată

## Tipologia modelelor

Pentru modelarea deviațiilor dimensionale vom avea în vedere folosirea următoarelor tipuri de modele:

- modele analitice obținute în urma unor procedee de regresie,

- modele neuronale,
- modele bazate pe tehnologia vectorilor suport SVM (Support Vector Machine).

### Modele obținute prin procedee de regresie liniară

Orice algoritm de regresie are drept principal scop determinarea unei funcții  $\bar{f}$  care să aproximeze o funcție  $f$  ce nu este definită explicit, ci sub formă tabelară, prin intermediul unor dublete de forma  $\langle x_i, y_i \rangle$  cu  $i=1..n$ . Vectorii  $\mathbf{x}_i \in \mathfrak{R}^m$  reprezintă datele de intrare ale modelului, iar valorile  $y_i \in \mathfrak{R}$  reprezintă valorile funcției  $f$  pentru aceste date de intrare.

În cazul regresiei liniare, funcția  $\bar{f}$  reprezintă o combinație liniară a componentelor unui vector de parametri  $\beta$ . Cea mai simplă formă de regresie liniară este cea polinomială de ordinul 1. În acest caz, considerând că vectorii  $\mathbf{x}$  au dimensiunea  $m$ , expresia funcției  $\bar{f}$  este de forma:

$$\bar{f}(\mathbf{x}) = \bar{f}(x_1, x_2, \dots, x_m) = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \dots + \beta_m \cdot x_m + e \quad (0.1)$$

unde  $e$  este eroarea de modelare.

În cazul abordării problemei conducerii dimensionale a unui strung, vectorul  $\mathbf{x}$  poate avea de exemplu următoarea structură:

- $\{x_1, x_2, x_3\} = \{C, Z, F\}$ , în cazul *controlului online* sau
- $\{x_1, x_2, x_3\} = \{C, Z, Ad\}$ , în cazul *controlului predictiv programat*.

unde:

- $C$  reprezintă valoarea axei „rotația arborelui principal”;
- $Z$  reprezintă valoarea axei „translație paralelă cu axa arborelui principal”;
- $F$  reprezintă o componentă a forței de așchiere;
- $Ad$  reprezintă adâncimea de așchiere.

În aceste cazuri, prin regresie liniară se vor obține modele de forma:

$$\bar{f}_1(C, Z, F) = \beta_0 + \beta_1 \cdot C + \beta_2 \cdot Z + \beta_3 \cdot F + e_1 \text{ - în cazul controlului online sau}$$

$$\bar{f}_2(C, Z, Ad) = \beta_0' + \beta_1' \cdot C + \beta_2' \cdot Z + \beta_3' \cdot Ad + e_2 \text{ - în cazul controlului predictiv, unde vectorii}$$

$\beta_1 = \{\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3\}$  și  $\beta_2 = \{\beta_0', \beta_1', \beta_2', \beta_3'\}$  reprezintă parametrii modelelor matematice,  $e_1$  și  $e_2$  reprezintă erorile de modelare.

Pentru determinarea valorilor optime ale coeficienților, se poate aplica metoda celor

mai mici pătrate, adică se va minimiza suma:  $S = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{f}(x_i))^2$  pentru întreg setul de

date de antrenare. Pentru minimizare, se va determina situația în care derivatele parțiale al funcției  $S$  în raport cu variabilele modelului se anulează. Luând în considerare cazul controlului online, putem scrie:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial S}{\partial \beta_0} = \sum_{i=1}^n -2(y_i - \beta_0 - \beta_1 C_i - \beta_2 Z_i - \beta_3 F_i) = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial \beta_1} = \sum_{i=1}^n -2(y_i - \beta_0 - \beta_1 C_i - \beta_2 Z_i - \beta_3 F_i) C_i = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial \beta_2} = \sum_{i=1}^n -2(y_i - \beta_0 - \beta_1 C_i - \beta_2 Z_i - \beta_3 F_i) Z_i = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial \beta_3} = \sum_{i=1}^n -2(y_i - \beta_0 - \beta_1 C_i - \beta_2 Z_i - \beta_3 F_i) F_i = 0 \end{array} \right. \quad (0.2)$$

ceea ce se poate exprima prin următorul sistem:

$$\left\{ \begin{array}{l} n\beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_1 C_i + \sum_{i=1}^n \beta_2 Z_i + \sum_{i=1}^n \beta_3 F_i = \sum_{i=1}^n y_i \\ \beta_0 \sum_{i=1}^n C_i + \beta_1 \sum_{i=1}^n C_i^2 + \beta_2 \sum_{i=1}^n Z_i C_i + \beta_3 \sum_{i=1}^n F_i C_i = \sum_{i=1}^n C_i y_i \\ \beta_0 \sum_{i=1}^n Z_i + \beta_1 \sum_{i=1}^n Z_i C_i + \beta_2 \sum_{i=1}^n Z_i^2 + \beta_3 \sum_{i=1}^n F_i Z_i = \sum_{i=1}^n Z_i y_i \\ \beta_0 \sum_{i=1}^n F_i + \beta_1 \sum_{i=1}^n F_i C_i + \beta_2 \sum_{i=1}^n Z_i F_i + \beta_3 \sum_{i=1}^n F_i^2 = \sum_{i=1}^n F_i y_i \end{array} \right. \quad (0.3)$$

sistemul de ecuații de mai sus poate fi scris sub formă matriceală astfel:

$$(\mathbf{X} \cdot \mathbf{X}^T) \boldsymbol{\beta} = \mathbf{X}^T \mathbf{Y} \quad (0.4)$$

unde matricele sunt definite astfel:

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} 1 & C_1 & Z_1 & F_1 \\ 1 & C_2 & Z_2 & F_2 \\ 1 & C_3 & Z_3 & F_3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & C_n & Z_n & F_n \end{pmatrix}, \boldsymbol{\beta} = \begin{pmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{pmatrix}, \mathbf{Y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \dots \\ y_n \end{pmatrix}, \quad (0.5)$$

iar  $\mathbf{X}^T$  reprezintă transpusă matricei  $\mathbf{X}$ .

Rezultă că parametrii modelului matematic se determină rezolvând ecuația matriceală:

$$\boldsymbol{\beta} = (\mathbf{X} \cdot \mathbf{X}^T)^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y} \quad (0.6)$$

Prin rezolvarea sistemului de ecuații se determină parametrii modelului matematic  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  și  $\beta_3$ .

### 1.1.1.2 Modele obținute pe baza tehnicii de regresie bazată pe vectori suport (Support vector regression)

Modelele SVM au fost inventate de către savantul de origine rusă Vladimir Vapnik, [Boser 1992], [Cortes 1995]. Inițial, SVM a fost folosit pentru probleme de clasificare, cum ar fi aplicațiile OCR (optical character recognition) și aplicațiile de recunoaștere a obiectelor. De asemenea, au fost obținute rezultate remarcabile și în cazul problemelor de regresie.

Algoritmii de regresie bazați pe vectori suport au drept principal scop, ca orice algoritmi de regresie, determinarea unei funcții  $\hat{f}$ , care să aproximeze o funcție continuă  $f$ , definită sub formă tabelară, prin intermediul unor dublete de forma  $\langle \mathbf{x}_i, y_i \rangle$  cu  $i=1..n$ . Vectorii  $\mathbf{x}_i \in \mathfrak{R}^m$  reprezintă datele de intrare ale modelului, iar valorile  $y_i \in \mathfrak{R}$ , reprezintă valorile funcției  $f$  pentru aceste date de intrare.

Spre deosebire de alte tehnici de regresie, funcția  $\hat{f}$  determinată de algoritm are o deviație maximă  $\varepsilon$  față de funcția necunoscută  $f$ , pentru valorile datelor de antrenare, adică  $|\hat{f}(\mathbf{x}_i) - f(\mathbf{x}_i)| \leq \varepsilon$  pentru oricare  $i=1..n$

Pentru cazul în care modelul Support Vector Regression (SVR) este de tip liniar, funcția  $\hat{f}$  este definită de o relație de tipul:  $\hat{f}(\mathbf{x}) = \langle \mathbf{w} \cdot \mathbf{x} \rangle + b$ , unde operatorul  $\langle \mathbf{a} \cdot \mathbf{b} \rangle$  reprezintă produsul scalar dintre vectorii  $\mathbf{a}$  și  $\mathbf{b}$ . Un deziderat privind forma modelului matematic este legat de mărimea factorului  $\mathbf{w}$  care reprezintă complexitatea modelului. Norma vectorului  $\mathbf{w}$  trebuie să fie minimă. Determinarea funcției  $\hat{f}(\mathbf{x})$  este o problemă de optimizare, care poate fi definită astfel:

$$\text{Minimizează: } \frac{1}{2} \langle \mathbf{w} \cdot \mathbf{w} \rangle \quad (0.7)$$

$$\text{cu restricțiile } \begin{cases} y_i - \langle \mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_i \rangle - b \leq \varepsilon \\ \langle \mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_i \rangle + b - y_i \leq \varepsilon \end{cases} \quad (0.8)$$

Există situații în care problema de optimizare nu are soluții, deoarece nu poate fi găsit nici un vector  $\mathbf{w}$  care să satisfacă condițiile impuse de restricții, adică nu există o funcție liniară  $\hat{f}(\mathbf{x})$  care să aproximeze setul de date de antrenare cu precizia  $\varepsilon$ . Pentru a se determina totuși o soluție liniară acceptabilă, se pot introduce variabile adiționale, care să permită încălcarea restricțiilor, dar prin intermediul cărora să se introducă penalități la nivelul funcției obiectiv. Astfel problema de optimizare poate fi reformulată astfel:

$$\text{Minimizează: } \frac{1}{2} \langle \mathbf{w} \cdot \mathbf{w} \rangle + C \sum_{i=1}^n (\xi_i + \xi_i^*) \quad (0.9)$$

$$\text{cu restricțiile } \begin{cases} y_i - \langle \mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_i \rangle - b \leq \varepsilon + \xi_i \\ \langle \mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_i \rangle + b - y_i \leq \varepsilon + \xi_i^* \\ \xi_i, \xi_i^* \geq 0 \end{cases} \quad (0.10)$$

Modelul va avea așadar doi parametri: parametrul  $\varepsilon$  care definește eroarea acceptabilă pentru setul de date de antrenare și parametrul  $C > 0$  care reprezintă un factor de penalizare pentru elementele din setul de date, pentru care condiția  $|\hat{f}(\mathbf{x}_i) - f(\mathbf{x}_i)| \leq \varepsilon$  nu poate fi îndeplinită.

Funcția de optimizare, precum și restricțiile, pot fi formulate sub forma unui lagrangian:

$$L(\mathbf{w}, b, \xi_i, \xi_i^*, \alpha_i, \alpha_i^*, \eta_i, \eta_i^*) = \frac{1}{2} \langle \mathbf{w} \cdot \mathbf{w} \rangle + C \sum_{i=1}^n (\xi_i + \xi_i^*) - \sum_{i=1}^n \alpha_i (\varepsilon + \xi_i - y_i + \langle \mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_i \rangle + b) - \sum_{i=1}^n \alpha_i^* (\varepsilon + \xi_i^* + y_i - \langle \mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_i \rangle - b) - \sum_{i=1}^n (\eta_i \cdot \xi_i + \eta_i^* \cdot \xi_i^*) \quad (0.11)$$

-unde  $\alpha_i, \alpha_i^*, \eta_i, \eta_i^*$  reprezintă multiplicatorii Lagrange.

Problema de optimizare este reformulată astfel:

$$\text{Arg min}_{\mathbf{w}, b, \xi_i, \xi_i^*} \max_{\alpha_i, \alpha_i^*, \eta_i, \eta_i^*} L(\mathbf{w}, b, \xi_i, \xi_i^*, \alpha_i, \alpha_i^*, \eta_i, \eta_i^*) \quad (0.12)$$

unde  $\alpha_i, \alpha_i^*, \eta_i, \eta_i^* > 0$ .

Din condițiile de anulare ale derivatelor parțiale ale Lagrangianului în raport cu variabilele  $\mathbf{w}$ ,  $b$ ,  $\xi_i$  și  $\xi_i^*$ , rezultă următorul sistem de ecuații:

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial b} = \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \mathbf{w}} = \mathbf{w} - \sum_{i=1}^n (\alpha_i + \alpha_i^*) \cdot \mathbf{x}_i = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \xi_i} = C - \alpha_i - \eta_i = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \xi_i^*} = C - \alpha_i^* - \eta_i^* = 0 \end{cases} \quad (0.13)$$

Ținând cont în  $L$  de aceste relații, problema de optimizare devine:

$$\max \left( \frac{1}{2} \left\langle \sum_{i=1}^n ((\alpha_i - \alpha_i^*) \cdot \mathbf{x}_i) \cdot \sum_{j=1}^n ((\alpha_j - \alpha_j^*) \cdot \mathbf{x}_j) \right\rangle - \varepsilon \sum_{i=1}^n (\alpha_i + \alpha_i^*) + y_i \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) \right) \text{ cu restricțiile:} \\ \begin{cases} \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) = 0 \\ (\alpha_i - \alpha_i^*) \in [0, C] \end{cases} \quad (0.14)$$

Această problemă de optimizare poate fi rezolvată folosind metode specifice, cum ar fi metoda Gradient Ascent.

Funcția  $\hat{f}(\mathbf{x}_i) = \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) \cdot \langle \mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x} \rangle + b$  va fi determinată de coeficienții  $\alpha_i, \alpha_i^*$  care

vor fi nuli pentru o serie de înregistrări din setul de date. Așadar algoritmul selectează din setul de date o serie de înregistrări "remarcabile", denumite *vectori suport*, înregistrări pe baza cărora se va construi modelul SVR.

Pentru regresie neliniară, produsul scalar este înlocuit de o transformare neliniară, denumită *kernel*. În mod uzual, se utilizează următoarele tipuri de kernel-uri:

- Kernel polinomial  $K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \langle \mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j \rangle^d$
- Kernel polinomial neomogen  $K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \langle \mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j + c \rangle^d$
- Kernel gaussian  $K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = e^{-\frac{\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|^2}{2\sigma}}$

Pentru a realiza regresia cu vectori suport este necesară antrenarea algoritmului cu un set de dublete,  $(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i)$ , specificându-se următorii parametri: parametrul legat de mărimea zonei de insensibilitate  $\varepsilon$ , parametrul de regularizare  $C$  și parametrii specifici kernel-ului.

Selecția acestor parametri poate fi o sarcină dificilă, deoarece selectarea unor parametri improprii afectează performanța modelului obținut prin regresie. Pentru selecție se pot aplica mai multe strategii. De obicei pentru  $\varepsilon$  se alege o valoare egală cu nivelul zgomotului, dacă acesta este cunoscut. În practică, în cele mai multe situații, nivelul zgomotului nu este cunoscut. Pentru parametrul  $C$  se poate selecta o valoare mai mare decât cea mai mare dintre valorile funcției  $f$ , furnizată pentru datele de antrenare, însă această abordare face modelul sensibil la datele eronate înregistrate în setul de date de antrenare.

O altă strategie implică selectarea valorilor pentru toți parametrii, pe baza unui algoritm de validare încrucișată (cross validation).

Practic se utilizează două abordări:

-*n folds cross validation*- setul de date se împarte aleatoriu în  $n$  părți. Din cele  $n$  părți,  $n-1$  părți sunt folosite pentru antrenarea algoritmului, iar a  $n$ -a pentru evaluarea erorilor modelului. Algoritmul este repetat de  $n$  ori, evaluându-se eroarea globală de modelare. Algoritmul se repetă pentru toate combinațiile de valori ale parametrilor, alegându-se acele valori, pentru care eroarea de modelare este minimă.

-*leave one cross validation*- abordarea este similară cu algoritmul precedent, însă numărul  $n$  este egal cu mărimea setului de date de antrenare.

Validarea încrucișată are dezavantajul că este costisitoare din punct de vedere computațional.

În această lucrare vom folosi algoritmul *n folds cross validation*. De asemenea, vom folosi abordarea descrisă în [Cherkassky 2004], conform căreia  $C$  se va alege  $C = \bar{y} + 3\sigma_y$ , unde  $\bar{y}$  reprezintă valoarea medie a ieșirilor pentru setul de date de antrenare, iar  $\sigma_y$  reprezintă dispersia pentru aceleași valori. Pentru parametrul  $\varepsilon$ , Cherkassky a determinat o relație empirică, prin care se obțin rezultate mai bune decât atunci când  $\varepsilon$  este egal cu nivelul zgomotului  $\sigma_y$ .

Această relație se obține multiplicând  $\sigma_y$  cu un parametru  $\tau$  și cu o expresie ce ține seama de numărul  $n$  de înregistrări ale bazei de date folosite pentru antrenare.

$$\varepsilon = \tau\sigma_y \sqrt{\frac{\ln(n)}{n}} \quad (0.15)$$

Experimental s-a stabilit că pentru valoarea  $\tau=3$ , valoarea determinată pentru parametrul  $\varepsilon$  determină obținerea unui model mai precis. Pentru estimarea nivelului zgomotului, se poate aplica următoarea strategie: se construiește un model matematic de complexitate ridicată, cum ar fi un model de tip polinomial de ordin mare, sau se realizează un model de

regresie de tip kNN (K Nearest Neighbor) cu parametrul  $k$  cuprins între 2 și 6. Prin algoritmul kNN, valoarea furnizată de model se determină prin medierea a celor mai apropiate  $k$  valori din setul de date pe care se construiește modelul. Nivelul zgomotului se poate aproxima cu relația:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{n}{n-d} \cdot \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (0.16)$$

unde -  $y_i$  și  $\hat{y}_i$  reprezintă valorile țintă furnizate în setul de date pentru care se evaluează nivelul de zgomot, respectiv valorile țintă evaluate de modelul de complexitate ridicată; -  $n$  reprezintă numărul de înregistrări pentru care se evaluează nivelul de zgomot; -  $d$  reprezintă parametrul legat de complexitatea modelului.

Pentru modele polinomiale,  $d$  este egal cu gradul  $p$  al polinomului, iar pentru modele de tip kNN,  $d=k/n$ .

Pentru selectarea parametrului kernel-ului vom utiliza o tehnică de căutare exhaustivă. Valoarea parametrului kernel-ului va fi căutată într-un șir de valori discrete. Selectarea valorii optime a parametrului kernel-ului va fi realizată pe baza unui algoritm de validare încrucișată.

## Rețele neuronale

O rețea neuronală artificială (ANN-Artificial Neural Network) reprezintă un tip de model matematic inspirat din rețelele neuronale biologice, alcătuite din neuroni interconectați prin intermediul sinapselor ce apar între axoni și dendrite.

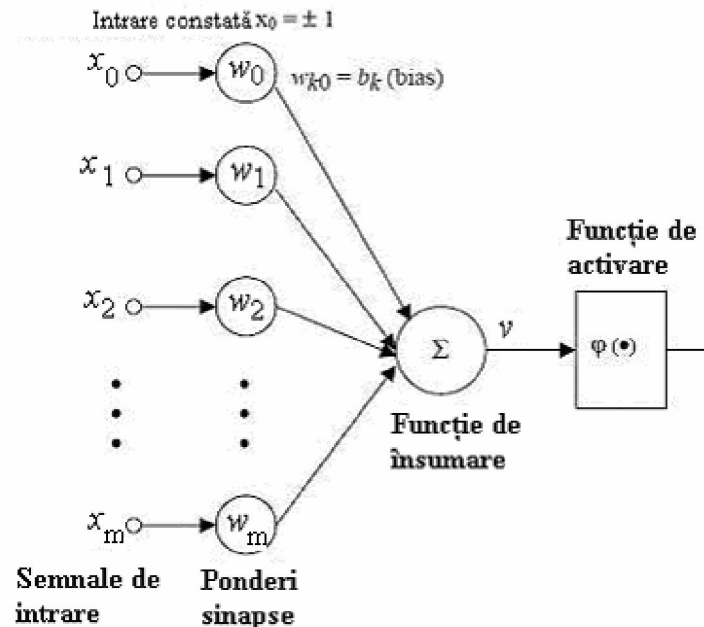


Fig. 0.4. Structura unui neuron artificial

Rețelele neuronale artificiale sunt alcătuite din neuroni artificiali, a căror structură emulează structura neuronilor biologici. În figura 0.4 se prezintă structura unui neuron artificial. Un neuron artificial reprezintă un element de procesare care pe baza unui număr  $m$  de intrări  $x_0, x_1, \dots, x_m$  generează o ieșire  $y$ . Sinapsele dintre neuroni sunt modelate cu ajutorul unor ponderi. În funcție de valorile acestor ponderi legăturile neuronului cu intrările sale sunt întărite, adică contribuie mai mult la valoarea funcției de ieșire a neuronului, sau sunt inhibate, adică



contribuie puțin sau chiar deloc la valoarea funcției de ieșire a neuronului. Procesarea intrărilor de către neuron se realizează în două etape. În cadrul primei etape se efectuează însumarea valorilor intrărilor înmulțite cu ponderea corespunzătoare. În cadrul celei de-a doua etape se calculează mărimea *funcției de transfer* a neuronului. De obicei această valoare, precum și valoarea corespunzătoare fiecărei intrări este limitată în intervalul  $[-1, 1]$  sau  $[0, 1]$ .

În practică cele mai utilizate funcții de transfer sunt:

- funcția de transfer de tip prag,  $f(v) = \begin{cases} 0 & \text{dacă } v \leq 0 \\ 1 & \text{dacă } v > 0 \end{cases}$

- funcția de transfer liniară,  $f(v) = v$

- funcție de transfer liniară cu saturație,  $f(v) = \begin{cases} -1 & \text{dacă } v < -1 \\ v & \text{dacă } v \in [-1, 1] \\ 1 & \text{dacă } v > 1 \end{cases}$

- funcția de transfer sigmoidă,  $f(v) = \frac{1}{1 + e^{-v}}$

Mai multe unități elementare de procesare, adică mai mulți neuroni pot fi interconectați pentru îndeplinirea unei sarcini specifice, formând astfel o rețea neuronală. În cazul în care rețeaua neuronală este folosită pentru rezolvarea unor probleme de regresie, cea mai folosită structură de rețea neuronală este *arhitectura feed forward*. Arhitectura feed forward presupune gruparea neuronilor într-o structură fixă, aceștia fiind organizați pe straturi. Neuronii unui strat au conectate la intrările lor ieșirile neuronilor din stratul precedent sau intrările modelului în cazul neuronilor aflați pe primul strat.

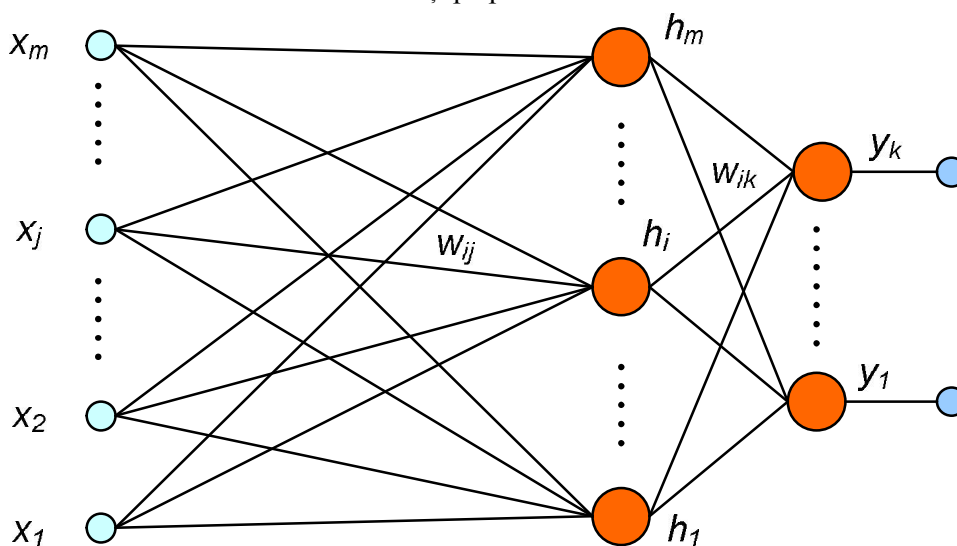


Fig. 0.5. Structura unei rețele neuronale de tip feedforward

Stratul de neuroni care generează ieșirea poartă denumirea de *strat de ieșire*, celelalte straturi fiind *straturi ascunse*. Stabilirea structurii rețelei neuronale se realizează de obicei pe baza expertizei utilizatorului, sau folosind o strategie euristică. Numărul neuronilor de pe stratul de ieșire se stabilește ca fiind egal cu numărul ieșirilor. Pentru fiecare neuron trebuie specificat tipul de funcție de transfer.

Rețeaua neuronală calculează valoarea unei ieșiri  $y_k$  folosind datele de intrare astfel:

$$y_k = \varphi_k \left( \sum_{i=1}^n w_{ki} \cdot h_i \right) = \varphi_k \left( \sum_{i=1}^n w_{ki} \cdot \varphi_i \left( \sum_{j=1}^m w_{ij} \cdot x_j \right) \right),$$

relație în care  $\varphi_k$  și  $\varphi_i$  reprezintă funcțiile

de transfer corespunzătoare straturii de ieșire respectiv straturilor ascunse. După stabilirea structurii rețelei neuronale este necesară antrenarea acesteia. Antrenarea reprezintă un proces de învățare prin care se realizează actualizarea valorii ponderii pentru fiecare sinapsă. Procesul de învățare este supervizat în cazul rețelelor de tip feedforward și poartă denumirea de *backpropagation training*. Astfel, rețelei îi sunt prezentate o serie de seturi de valori pentru variabilele de intrare și setul corespunzător de valori pentru variabilele de ieșire. În cazul în care funcțiile de transfer ale neuronilor sunt diferentiabile, algoritmul de antrenare este de tip gradient descent.

Pentru antrenare se utilizează un set de date alcătuit din  $l$  perechi de vectori  $\langle \mathbf{x}(t), \mathbf{d}(t) \rangle$  cu  $t=1..l$ . Vectorii  $\mathbf{x}(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t)\}$  reprezintă valori ale variabilelor de intrare, iar vectorii  $\mathbf{d}(t) = \{d_1(t), d_2(t), \dots, d_l(t)\}$  reprezintă valorile corespunzătoare funcțiilor necunoscute ce trebuie approximate. În urma antrenării rețeaua neuronală va genera un set de date de ieșire care  $\mathbf{y}(t)$  care trebuie să aproximeze valorile funcție specificate prin vectorii  $\mathbf{d}(t)$ . Scopul antrenării rețelei este acela de a micșora erorile de modelare pentru datele de antrenare  $\mathbf{e}(t) = \mathbf{d}(t) - \mathbf{y}(t)$ . Actualizarea ponderilor pentru sinapse se va realiza astfel încât să fie minimizată o funcție cost. Cel mai frecvent în practică se utilizează funcția cost eroare medie pătratică dintre valoarea ieșirii rețelei și valoarea cunoscută a ieșirii obținută prin măsurare.

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{l} \sum_{k=1}^l e_k^2(t), \quad \text{unde} \quad e_k(t) = d_k(t) - y_k(t). \quad (0.17)$$

Algoritmul de antrenare se bazează pe actualizarea ponderilor folosind valoarea negativă a gradientului funcției obiectiv în raport cu ponderile, și un parametru fix  $\eta \in (0,1)$  care reprezintă rata de învățare. Ponderile sunt actualizate în mod similar, atât pentru sinapsele neuronilor de pe stratul de ieșire cât și pentru neuronii aflați pe straturile de intrare:

$$\Delta w_{ki}(t) = -\eta \frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial w_{ki}(t)}, \quad \Delta w_{ij}(t) = -\eta \frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial w_{ij}(t)} \quad (0.18)$$

Algoritmul de antrenare al rețelei neuronale este alcătuit din următorii pași:

1. Ponderile rețelei sunt stabilite inițial în mod aleatoriu, la valori foarte mici;
2. Se selectează o instanță din setul de date de antrenare;
3. Se calculează valoarea ieșirilor pentru neuronii aflați pe straturile ascunse și pentru neuronii de pe stratul de ieșire;
4. Se calculează valoarea funcției obiectiv;
5. Dacă valoarea funcției obiectiv este corespunzătoare sau numărul maxim de iterații impus operația de antrenare se consideră finalizată, dacă nu se continuă cu pasul 6;
6. Se calculează gradientul funcției obiectiv în raport cu ponderile sinapselor pentru neuronii de pe stratul de ieșire;
7. Se actualizează valorile ponderilor pentru neuronii de pe stratul de ieșire;

8. Se calculează gradientul funcției obiectiv în raport cu ponderile sinapselor pentru neuronii de pe straturile ascunse;
9. Se actualizează valorile ponderilor pentru neuronii de pe straturile ascunse;
10. Se reia algoritmul de la pasul 2.

## Identificarea relațiilor cauzale

Din analiza literaturii de specialitate, s-a remarcat faptul că modelul matematic corespunzător erorilor de prelucrare este construit pe baza unor cunoștințe provenite din experiențe anterioare. În cazul sistemelor tehnologice reconfigurabile, având în vedere faptul că structura sistemului se schimbă de la o fază de reconfigurare la alta, construcția modelului matematic nu se mai poate baza pe cunoștințe provenite din experiențe anterioare. De aceea, apare nevoia utilizării unor algoritmi de descoperire a relațiilor cauzale, ce există între variabila pentru determinarea căreia se construiește modelul matematic, și restul variabilelor aflate în componența bazei de date. Descoperirea relațiilor cauzale se bazează pe algoritmi de evaluarea atributelor.

Dacă, de exemplu, variabila pentru determinarea căreia se construiește modelul matematic este deviația dimensională, atunci mărimile măsurate de sistemul senzorial al mașinii pot fi considerate în raport cu mărimea deviației dimensionale ca fiind:

- atribute relevante, adică atribute care influențează mărimea deviației dimensionale;
- atribute irelevante, adică atribute care nu au nici o influență asupra mărimii deviației dimensionale (acestea pot fi considerate ca fiind aleatorii în raport cu valoarea pe care o ia deviația dimensională);
- atribute redundante, adică atribute care pot fi înlocuite cu alt atribut, față de care acesta este redundant, fără ca precizia modelului să fie influențată (în general atributele redundante sunt puternic corelate între ele).

În figura 0.6, este prezentată structura tipică a unui algoritm de evaluare a atributelor. Există mai multe posibilități de descoperire a setului de atribute relevante. Una dintre acestea constă în inițializarea algoritmului cu un set care conține toate atributele după care se elimină pe rând atributele redundante și nerelevante din setul inițial. O altă posibilitate este de a porni cu o listă de atribute vidă, la care se adaugă atribute relevante. În fine, se poate iniția algoritmul selectând un set aleatoriu de atribute, la care se vor adăuga atribute relevante și/sau se vor elimina atribute irelevante ori redundante.

În faza de evaluare se determină performanțele subsetului curent de atribute; dacă cel mai performant subset, determinat anterior, este inferior subsetului curent de atribute, atunci subsetul curent de atribute va fi reținut. Criteriul de oprire implică în general o condiție prin care se determină faptul că, prin adăugarea sau eliminarea unui atribut, nu se poate obține îmbunătățirea valorii funcției de evaluare a subsetului de atribute.

Algoritmii de mai sus au avantajul că necesită un număr mai mic de evaluări decât în cazul unei căutări exhaustive când, pentru un set de  $n$  atribute, numărul de evaluări  $N$  este dat de relația:

$$N = \sum_{i=1}^n C_n^i = \sum_{i=1}^n \frac{n!}{i!(n-i)!} = 2^n - 1 \quad (0.19)$$

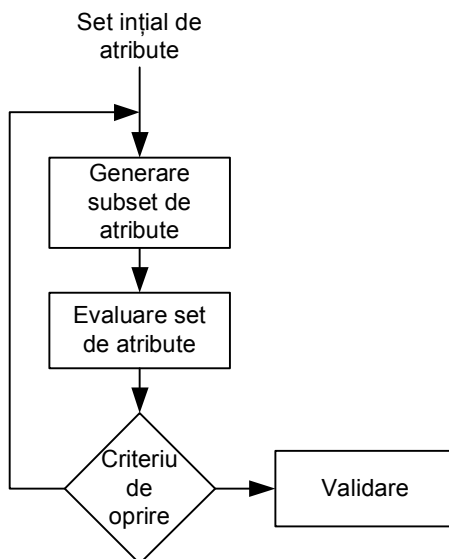


Fig. 0.6. Structura tipică a unui algoritm de selectare a atributelor

Construirea unor modele matematice folosind atribute redundante sau irelevante influențează negativ precizia modelului matematic, sporindu-i în același timp complexitatea, afectând în mod nefavorabil timpul de construcție și cel de exploatare.

În general, pentru evaluarea atributelor există două abordări:

- folosirea unui filtru de atribute potrivit căruia atributele relevante se evaluează pe baza unui criteriu rezonabil, care este independent de problema reală;
- folosirea unei metode de tip *wrapper* care constă în aplicarea algoritmului pe baza căruia se construiește modelul matematic și evaluarea preciziei de modelare corespunzătoare diferitelor subseturi de atribute.

### Metode de tip filtru de atribute

Metodele bazate pe filtre de atribute sunt preferate în general, având în vedere faptul că nu sunt costisitoare din punct de vedere computațional, datorită faptului că algoritmul pe baza căruia se selectează atributele este mai simplu decât algoritmul cu care se modelează datele. Dezavantajele folosirii unor astfel de metode sunt legate de faptul că, pentru evaluarea performanțelor fiecărui atribut, se folosesc criterii de performanță care nu au legătură cu modelul ce va fi folosit.

În cadrul acestei lucrări vom folosi următorii algoritmi de tip filtru:

#### **-Correlation Feature Selection-**

Algoritmul a fost dezvoltat de M. Hall în [Hall2000] și se bazează pe o observație simplă și evidentă: vom selecta atributele corelate cu variabila de ieșire pe baza căreia se va construi modelul matematic, dar se vor elimina atributele care sunt corelate între ele, adică atributele redundante. Se știe că un indicator al dependenței lineare dintre două seturi de variabile X și Y este coeficientul de corelație, parametru statistic definit de relația:

$$\rho_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^n [(X_i - \bar{X}) \cdot (Y_i - \bar{Y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}) \cdot \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})}} \quad (0.20)$$

unde  $\bar{X}$ ,  $\bar{Y}$  reprezintă valoarea medie pentru fiecare variabilă.

Pentru un subset de  $k$  atribute performanța (meritul) grupării este calculat cu relația:

$$Ms = \frac{k \cdot \bar{\rho}_{si}}{\sqrt{k + k(k-1)\bar{\rho}_s}} \quad (0.21)$$

Media coeficienților de corelație pentru fiecare atribut din setul de atribute selectate în raport cu variabila de interes  $\bar{\rho}_{si}$ , contribuie proporțional la „punctajul” grupării de atribute. Punctajul unui subset de atribute este mai scăzut în cazul în care unele din atribute sunt corelate între ele, adică media coeficientului de corelație corespunzător variabilelor din subset  $\bar{\rho}_s$ . Meritul subsetului este folosit pentru funcția de evaluare (vezi fig. 0.6.). Pentru generarea subsetului ce va fi evaluat se folosesc algoritmi de căutare: *greedy forward selection sau backward elimination*, algoritmi la care se atributele care determină creșterea respectiv descreșterea cea mai mare a funcției merit sunt adăugate respectiv eliminate succesiv, *best first* prin care se selectează subsetul de date pornind de la un subset vid la care se adaugă progresiv atributele care conduc la creșterea funcției merit, însă care spre deosebire de algoritmi de tip *greedy* permit backtracking-ul, adică reconsiderarea unor variante descalficate inițial dacă calea de căutare nu dă rezultate bune. De asemenea, pentru generarea subseturilor de date se poate utiliza algoritmul genetic considerând că trebuie rezolvată o problemă de optimizare a funcției merit.

### -Rrelief pentru regresie

Algoritmul Rrelief dezvoltat de Igor Kononenko [Kononenko1997] are ca scop evaluarea calității fiecărui atribut, în funcție de capacitatea acestuia de a surprinde variațiile variabilei de interes. Inițial algoritmul a fost dezvoltat pentru probleme de clasificare, adică pentru situații în care variabila de interes este discretă și are doar două valori corespunzătoare celor două clase. Algoritmul selectează în mod aleatoriu o instanță  $R_i$  din setul de date, și apoi determină cei mai apropiați doi vecini: unul din aceeași clasă denumit *nearest hit*  $H$  și unul din altă clasă *nearest miss*  $M$ . Pe baza acestor instanțe se actualizează valoarea estimată pentru calitatea atributului  $W[A]$  folosind o funcție diferență definită pentru două instanțe  $I_1$  și  $I_2$  astfel:

$$diff(A, I_1, I_2) = \frac{|valoare(A, I_1) - valoare(A, I_2)|}{\max(A) - \min(A)} \quad (0.22)$$

Algoritmul Relief pentru clasificare:

Pentru toate atributele  $W[A]=0$ ;

Pt.  $i$  de la 1 la  $m$

    Selectează aleatoriu o instanță  $R$ ;

    Se determină *nearest hit*  $H$  și *nearest miss*  $M$

    Pentru toate atributele  $A$

$W[A] = W[A] - diff(A, R, H)/m + diff(A, R, M)/m$

    Sfarsit pentru

Sfarsit pentru

Valoarea calculată de algoritm aproximează următoarea diferență de probabilități:  
 $W[A]=P(\text{valoare diferită pentru atributul } A | \text{nearest miss } M) - P(\text{valoare diferită pentru atributul } A | \text{nearest hit } H)$

Algoritmul Relief pentru regresie nu poate folosi noțiunile *nearest miss M* și *nearest hit H*. Pentru a estima calitatea unui atribut se folosește relația:

$$W[A] = \frac{P_{diffC|diffA} \cdot P_{diffA}}{P_{diffC}} - \frac{(1 - P_{diffC|diffA}) \cdot P_{diffA}}{1 - P_{diffC}} \quad (0.23)$$

unde:  $P_{diffA}$  reprezintă  $P(\text{valoare diferită pt } A | \text{cele mai apropiate instante})$

$P_{diffC}$  reprezintă  $P(\text{predictie diferită} | \text{cele mai apropiate instante})$

$P_{diffC|diffA}$  reprezintă  $P(\text{predictie diferită} | \text{valoare diferită pt } A \text{ pentru cele mai apropiate instanțe})$

Algoritmul Rrelief are ca intrare un set de antrenare care este alcătuit dintr-o succesiune de vectori  $X$  de dimensiune  $a$ , adică caracterizate prin  $a$  atribute, și din valorile variabilei de interes  $\tau(X)$  corespunzătoare succesiunii vectorilor  $X$ . Algoritmul are ca rezultat un vector cu estimările pentru calitatea fiecărui atribut.

Setează  $N_{dc}$ ,  $N_{dA}[A]$ ,  $N_{dA\&dA}[A]$ ,  $W[A]$  la 0

Pentru  $I$  de la 1 la  $m$

Selectează aleatoriu o instanță  $R_i$ ;

Selectează cele mai apropiate  $k$  instanțe din setul de date  $I$ ;

Pentru  $j$  de la 1 la  $k$

$$N_{dc} = N_{dc} + |\tau(R_i) - \tau(I_j)| \cdot d(i,j);$$

Pentru  $A=1$  pana la  $a$

$$N_{dA}[A] = N_{dA}[A] + \text{diff}(A, R_i, I_j) \cdot d(i,j);$$

$$N_{dA\&dA}[A] = N_{dA\&dA}[A] + |\tau(R_i) - \tau(I_j)| \cdot \text{diff}(A, R_i, I_j) \cdot d(i,j);$$

Sf.pentru

Sf.pentru

Sf.pentru

Pentru  $A=1$  pana la  $a$

$$W[A] = N_{dA\&dA}[A] / N_{dc} - (N_{dA}[A] - N_{dA\&dA}[A]) / (m - N_{dc})$$

Sf.pentru

Controlul preciziei

## Formularea problemei

Reducerea erorilor dimensionale este un deziderat pentru procesele de prelucrare deoarece permite obținerea unor piese mai precise și în final a unor produse de calitate superioară. Prin control dimensional înțelegem acea modalitate de control care are drept obiectiv reducerea erorilor dimensionale care apar în urma proceselor de prelucrare.

Pentru reducerea erorilor de prelucrare se poate interveni asupra regimului de lucru, în scopul reducerii intensității acestuia; se pot produce mașini mai precise la care imperfecțiunile să fie reduse, se pot utiliza scule foarte precise etc. Toate aceste abordări pasive, prin care se asigură o precizie ridicată, implică o componentă economică care se traduce prin creșterea

costului și scăderea productivității în cazul diminuării intensității regimului de așchiere, creșterea costului de achiziție al mașinilor unelte, utilizarea unor scule scumpe. Așadar, în general, o astfel de abordare nu este fezabilă din punct de vedere economic.

O altă soluție implică utilizarea unor regimuri de lucru, mașini de unelte și scule obișnuite, combinată cu folosirea unei strategii de control prin care erorile de prelucrare sunt eliminate înainte de apariția acestora, prin prognozarea valorii lor și apoi prin comandarea părților mobile ale mașinilor unelte, în sensul în care erorile sunt eliminate. Folosirea unei astfel de strategii, este mai eficientă din punct de vedere economic deoarece permite obținerea de piese precise fără a fi necesare investiții importante în mașini unelte foarte precise sau a unor scule speciale, în condițiile folosirii unor regimuri de așchiere intense care asigură o productivitate ridicată.

Problema compensării erorilor și nu a reducerii erorilor dimensionale implică generarea unei suprafețe finale a piesei care să fie cât mai apropiată de suprafața țintă, adică suprafața impusă în desenul de execuție al piesei. În figura 0.7 se prezintă sistemul de suprafețe ce trebuie luate în considerare pentru corecția erorilor dimensionale în cazul utilizării unei mașini unelte cu comandă numerică așa cum acestea au fost prezentate și în [Apostu1998]. În urma prelucrării trebuie îndepărtat adaosul de prelucrare, astfel încât să se obțină suprafața țintă. Dacă mașina unealtă ar fi programată să realizeze suprafața țintă, în urma prelucrării datorită erorilor dimensionale s-ar obține o suprafață diferită de cea impusă. Pentru a reduce erorile dimensionale, mașina unealtă este programată să realizeze o altă suprafață denumită suprafață programată. Chiar și în cazul aplicării controlului dimensional vor exista diferențe între suprafața țintă și suprafața finală a piesei, rezultată în urma operațiilor de prelucrare.

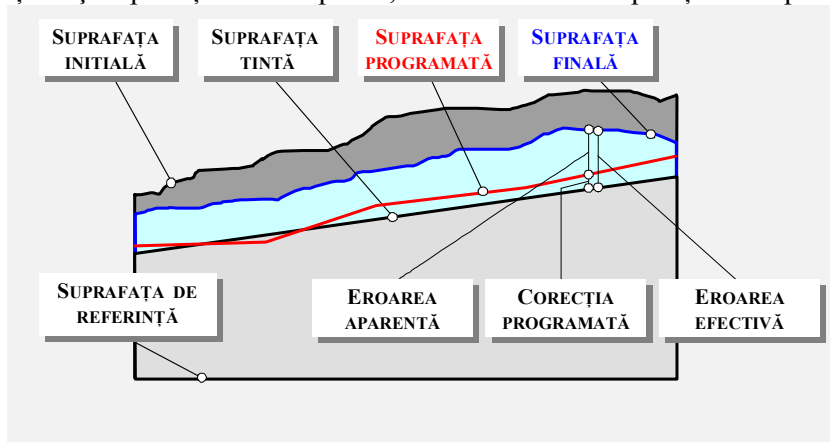


Fig. 0.7. Sistemul suprafețelor de analiză

Poziția suprafeței programate este determinată prin aplicarea unor corecții. În general, suprafața țintă este caracterizată de un set de parametri cum ar fi dimensiunea nominală, de exemplu valoarea diametrului rezultat în urma operațiilor de strunjire, toleranța dimensiunii nominale, cerințe legate de rugozitate, dar și poziția acestei suprafețe în raport cu celelalte suprafețe ce alcătuiesc suprafața finală a piesei, suprafețe pe care le vom denumi suprafețe de referință. În multe din cazuri suprafețele de referință sunt prelucrate anterior, iar poziția acestor suprafețe nu este cea nominală. Apare necesitatea determinării parametrilor și poziției suprafețelor de referință, pentru a putea determina poziția suprafeței prelucrate.

Sistemele de control dimensional se bazează în general pe următoarea strategie:

- se înregistrează datele provenite din monitorizarea sistemului de prelucrare în timpul efectuării operației;

- datele provenite din monitorizare vor fi stocate într-o bază de date. Această bază de date va conține informațiile referitoare la piesa curentă și la piesele prelucrate anterior;
- folosind baza de date se construiește un model matematic, care are ca scop prognoza deviațiilor dimensionale;
- folosind modelul se comandă organele mobile ale mașinii unelte prin adăugarea unor corecții pentru reducerea deviațiilor dimensionale.

În cazul producției de masă cu un număr mare de exemplare, problema construirii modelului matematic este simplificată datorită faptului că baza de date conține suficiente date. Probleme deosebite apar în cazul prelucrării unor loturi de piese, la care numărul de exemplare nu este foarte mare.

Problema pe care ne propunem să o rezolvăm în cadrul acestei secțiuni poate fi formulată astfel: să se construiască un sistem de control care să asigure controlul dimensional, pentru a asigura compensarea erorilor generate de proces, precum și a erorilor generate datorită imperfecțiunilor sistemului tehnologic. Nu vor fi tratate erorile datorate revenirii elastice „post operație” datorate revenirii elastice post operație, generate de redistribuirea tensiunilor interne din materialul piesei

## Idei cheie

Pentru rezolvarea problemei controlului dimensional vom avea în vedere următoarele aspecte:

### 1. Controlul dimensional se va realiza punctual

Sistemul de control dimensional va modela eroarea pentru un număr mare de puncte care aparțin suprafeței prelucrate. Prin compensarea deviațiilor dimensionale în fiecare punct vor fi compensate:

- abaterile de la dimensiunile nominale;
- abaterile de formă - cum ar de exemplu erori de planeitate, cilindricitate;
- abaterile referitoare la poziția reciprocă în raport cu poziția suprafeței de referință - cum ar de exemplu erori privind paralelismul suprafeței în raport cu o suprafață de referință, abateri de perpendicularitate, abateri de coaxialitate,

Prin utilizarea unui sistem de corecție global pentru întreaga suprafață nu pot fi compensate abaterile de formă și uneori nici abaterile referitoare la poziția reciprocă a suprafețelor.

Înainte și după prelucrare, folosind un sistem de măsură „on machine”, se va explora un număr mare de puncte aflate pe suprafața prelucrată și pe suprafețele de control. Se vor aplica corecții în vederea eliminării erorilor de proces și a celor de sistem. Datele provenite în urma procedurilor de explorare a suprafețelor vor fi stocate într-o bază de date ce va fi folosită pentru construcția modelului matematic de prognoză a erorilor dimensionale.

În aceeași bază de date vor fi stocate datele rezultate în urma monitorizării sistemului tehnologic în timpul funcționării. Date vor fi obținute prin înregistrarea valorilor furnizate de senzori folosiți pentru măsurarea unor mărimi susceptibile că ar influența precizia de prelucrare. Mărimile măsurate de senzori vor putea fi utilizate ca parametri ai modelului matematic de predicție a erorilor.



Prognoza și compensarea erorilor de prelucrare, se va realiza având în vedere două componente și anume eroarea datorată procesului și eroarea datorată sistemului de prelucrare.

## **2. Determinarea parametrilor modelului**

Influența parametrilor ce influențează precizia dimensională se poate modifica în timpul utilizării mașinilor unelte. Apare nevoia determinării relațiilor cauzale ce apar între mărimea deviației dimensionale și variabilele ce alcătuiesc baza de date.

Cea mai importantă modificare a relațiilor cauzale dintre deviația dimensională și diferitele mărimi pentru care se realizează monitorizarea sistemului apare în cazul utilizării mașinilor unelte reconfigurabile, mașini pentru care structura acestora se poate modifica de la un lot la altul. De aceea în funcție de configurația sistemului reconfigurabil trebuie analizată dependența parametrilor care pot fi folosiți pentru prognoza și compensarea deviațiilor dimensionale.

## **3. Determinarea numărului de piese ce vor fi folosite pentru construcția modelului matematic**

Modelele matematice pot fi construite pe baza informațiilor obținute prin utilizarea datelor:

- corespunzătoare tuturor pieselor prelucrate până în momentul piesei anterioare,
- corespunzătoare ultimei piese prelucrate,
- corespunzătoare ultimelor  $m$  piese.

Folosirea datelor corespunzătoare pieselor întregului lot, prezintă avantaje legate de numărul mare de înregistrări disponibile, care pot constitui o bază solidă de cunoștințe, însă care are dezavantaje legate de faptul că astfel se utilizează date care pot să nu mai fie în corelație cu starea actuală a sistemului tehnologic.

Pe de altă parte, folosirea datelor corespunzătoare ultimei piese prelucrate prezintă avantaje legate de actualitatea datelor înregistrate, însă dezavantajul faptului că datele înregistrate pot să nu surprindă tendințele sistemului tehnologic.

## **4. Domeniul pe care se construiește modelul**

Se pot defini modele matematice care sunt valabile pentru întreaga suprafață prelucrată, însă este posibil ca aceste modele să fie caracterizate de o complexitate sporită. Avantajele unor astfel de modele sunt legate de faptul că sunt în general mai robuste în ceea ce privește zgomotul ce afectează senzorii.

Divizarea suprafețelor prelucrate în părți mai mici pentru care să se realizeze modelarea deviațiilor dimensionale are avantaje legate de localizarea problemei și de simplificarea modelului matematic obținut, însă vecinătatea în care se generează modelul nu poate fi oricât de redusă deoarece astfel se reduce numărul de înregistrări pe care se realizează modelul, acesta fiind susceptibil la influențe importante legate de existența erorilor de măsurare și de zgomot.

În această lucrare domeniul pe care se construiește modelul va fi corespunzător întregii suprafețe prelucrate într-o fază, însă se vor lua în considerare la construcția modelului matematic și variabilele care definesc poziția suprafeței prelucrate.

## **Abordarea holistic-integrată a controlului dimensional**

### **Abordarea holistică a controlului dimensional**

În vederea abordării holistice a controlului dimensional vom folosi următoarea strategie:

- a. Explorarea dimensională este extinsă la toate punctele suprafeței (măsurate), la toate suprafețele corelate dimensional ale piesei (suprafața prelucrată, suprafața de referință) și la toate exemplarele din lot;
- b. Evaluarea dimensională se bazează pe modelarea simultană și unitară a întregului ansamblu de suprafețe al unui exemplar, considerându-l ca un spațiu topologic de sine stătător;
- c. Compensarea dimensională se face simultan și unitar pe toată traiectoria unei scule și la toate sculele folosite în cursul desfășurării întregii operații de prelucrare;
- d. Controlul dimensional este aplicat tuturor elementelor sistemului tehnologic: mașină, piesă, sculă, dispozitive de fixare și de măsurare;
- e. Tolerancing-ul dimensional este extins întregului spațiu topologic care formează interfețele prin care piesa se cuplează cu celelalte elemente ale sistemului mecanic;
- f. Deviațiile dimensionale sunt redefinite, astfel încât să corespundă acestei abordări holistice a controlului dimensional.

### **Abordarea integrată a controlului dimensional**

- a. Controlul dimensional include atât verificarea respectării toleranțelor dimensionale, cât și compensarea deviațiilor dimensionale, indiferent de mărimea deviațiilor dimensionale;
- b. Măsurarea este integrată cu prelucrarea în sensul că:
  - i. are loc într-o fază dedicată măsurării ce este inserată în ciclul de lucru;
  - ii. se face cu un instrument care este înglobat în construcția mașinii;
  - iii. construcția și explorarea modelului de control dimensional sunt integrate în procesul de prelucrare a lotului de produse în sensul că, construcția modelului are loc în cursul prelucrării exemplarului precedent iar exploatarea modelului are loc în cursul prelucrării exemplarului curent.

## Controlul adaptiv al erorilor de proces

Algoritmul de control adaptiv propus în această lucrare presupune parcurgerea unor pași care trebuie parcurși pentru determinarea modalității în care se realizează conducerea sistemului de prelucrare. Structura algoritmului este evidențiată în figura 0.8 folosind blocurile de culoare galbenă.

Primul pas constă în *stabilirea variabilelor de control* prin intermediul cărora se poate conduce procesul de prelucrare, în scopul reducerii deviațiilor dimensionale. După cum am precizat, deviațiile dimensionale vor fi compensate punctual. În scopul reducerii deviațiilor dimensionale se vor comanda organele mobile ale mașinii unelte astfel încât deviațiile dintre suprafața țintă și suprafața finală să fie minimă. La stabilirea variabilelor de control trebuie să se țină seama de structura cinematică a mașinii unelte, să se determine gradele de libertate pentru care trebuie comandate mișcările necesare reducerii deviațiilor dimensionale.

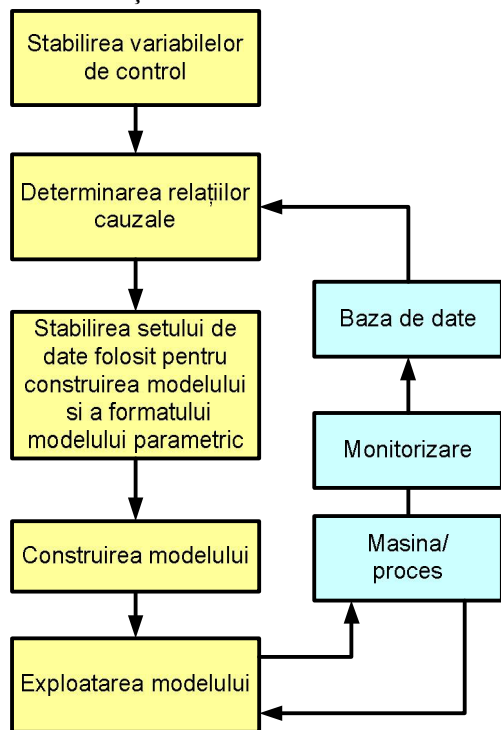


Fig. 0.8. Algoritmul de control al erorilor de proces

Al doilea pas constă în *determinarea relațiilor cauzale*, acțiune ce implică selectarea variabilelor pe baza cărora se poate stabili modelul parametric ce va fi folosit pentru controlul dimensional. Aceste variabile corespund unor câmpuri din baza de date ce a fost obținută prin monitorizarea sistemului tehnologic pe parcursul ciclurilor de măsurare și de prelucrare a pieselor precedente. Relațiile cauzale sunt determinate intermitent după prelucrarea fiecărei piese, luând în considerare datele corespunzătoare ultimei piese prelucrate. Pentru determinarea relațiilor cauzale vor fi folosite metodele expuse în paragraful „Identificarea relațiilor cauzale”.

După determinarea relațiilor cauzale este necesară *stabilirea setului de date folosit pentru construirea modelului și a formatului modelului parametric*.

Să considerăm momentul în care trebuie prognozate erorile de prelucrare corespunzătoare exemplarului  $k$  din lotul de piese în scopul compensării erorilor ce pot apare în urma

prelucrării acestuia. De asemenea, să considerăm că produsul informatic pregătit pentru construcția modelului are facilitatea de a putea construi modele de  $m$  formate. Apare întrebarea care dintre aceste formate trebuie folosit și care este numărul  $n$  de exemplare anterior prelucrate ale căror date vor fi folosite pentru construcția modelului, astfel încât performanța de modelare să fie maximă. Aceasta este o problemă de optimizare combinatorică, ce poate fi întotdeauna rezolvată prin evaluarea exhaustivă a tuturor combinațiilor posibile și selectarea aceleia care are performanța maximă. Cum în cazurile practice întâlnite numărul acestor combinații nu este prea mare evaluarea exhaustivă a performanțelor este fezabilă. Dacă însă numărul combinațiilor este foarte mare, atunci o metodă euristică de căutare, cum ar fi algoritmi genetici de exemplu, ar putea fi considerată. În cazul aplicării metodei de optimizare bazată pe evaluarea exhaustivă a performanței, algoritmul presupune ca pentru fiecare dintre cele  $k-1$  exemplare deja prelucrate să se simuleze utilizarea fiecăruia dintre cele  $m$  formate de modele și, pentru fiecare model, un număr  $n, n-1, n-2$  de exemplare deja prelucrate, iar apoi pe baza rezultatelor obținute să se aleagă formatul care, statistic, s-a dovedit a fi cel mai performant, în ceea ce privește diferența dintre valoarea modelată și valoarea măsurată a erorii.

*Construirea modelului matematic* este specifică pentru fiecare tip de model. Astfel se poate realiza regresia liniară, se poate antrena o rețea neuronală sau un algoritm de regresie bazat pe vectori suport.

Pentru evaluarea predictivă a valorii erorii de proces în scopul compensării acesteia, este necesară *exploatarea modelului* erorii de proces. Exploatarea modelului implică determinarea unor corecții pe baza prognozei modelului matematic urmată de modificarea valorilor variabilelor de control astfel încât deviațiile dimensionale să fie anulate.

Datele de intrare ale modelului, se obțin prin măsurători făcute asupra sistemului tehnologic:

- a) înainte de a se desfășura procesul de prelucrare;
- b) în timpul procesului de prelucrare.

Cazul a) se întâlnește atunci când modelul are drept variabilă o mărime fizică ce nu depinde de procesul de așchiere în sine, cum ar fi de exemplu adaosul de prelucrare. Înainte de începerea procesului de prelucrare a unui exemplar se măsoară grosimea stratului de material ce trebuie detașat (care se consideră specifică respectivului exemplar), iar datele obținute sunt introduse în modelul erori de proces determinându-se valorile acestora.

Cazul b) apare atunci când modelul are drept variabilă o mărime fizică ale cărei valori depind de procesul de așchiere în sine, cum ar fi de exemplu forța de așchiere. În acest caz forța de așchiere este monitorizată online iar valorile acestora tot online sunt folosite pentru calculul erorii de proces. Sistemul de compensare a erorii funcționează de asemenea online spre deosebire de cazul a) când valorile compensate ale erorii sunt programate odată cu programul ciclului de lucru.

În cazul prelucrării primului exemplar dintr-un lot de piese adaosul de prelucrare va fi împărțit astfel încât să se mai poată realiza o trecere. Prima trecere se va efectua evident fără a se realiza controlul dimensional și va fi folosită pentru generarea primelor înregistrări din baza de date. Pe baza acestor înregistrări se vor determina relațiile cauzale folosind algoritmi de tip filtru de atribute de proces și se va construi modelul matematic inițial al procesului de prelucrare.

## Controlul adaptiv predictiv al erorilor de sistem

În cazul operațiilor de prelucrare prin așchiere, una din cele mai importante surse de erori de sistem este datorată modului în care semifabricatul este fixat în dispozitivul de fixare.

În cazul în care se prelucreză o suprafață a cărei poziție este specificată în raport cu o serie de suprafețe de referință în urma prelucrării datorită imperfecțiunii sistemului de fixare pot apărea abateri de poziție reciprocă. Apare nevoia identificării parametrilor de poziție corespunzători suprafețelor de referință. Pentru corecția erorilor de fixare este necesară determinarea poziției suprafețelor de referință și apoi calcularea parametrilor de poziție corespunzători suprafeței ce va fi prelucrată. Astfel, vom aplica următoarea soluție conceptuală:

1. Suprafețele de referință vor fi explorate într-un număr mare de puncte folosind un sistem de măsurare „on machine”. Pentru măsurare, scula va fi înlocuită cu un sistem palpator. Palpatorul va reconstitui traiectoria pe care a avut-o scula la generarea suprafeței. În cazul în care nu poate fi explorată întreaga suprafață de referință din cauza faptului că acest lucru ar duce la coliziuni ale sistemului palpator cu elementele în mișcare ale mașinii, se va folosi o altă traiectorie care nu va conduce la coliziuni.
2. Se determină forma ecuațiilor suprafețelor de referință în condițiile apariției erorilor de fixare. Despre suprafețele de referință se cunosc următoarele elemente: forma nominală și poziția nominală. Ecuațiile suprafețelor de referință vor avea drept parametri mărimi care descriu toate componentele erorii de fixare.
3. Se identifică parametrii suprafețelor de referință, folosind ecuațiile suprafețelor de referință și tehnici de regresie.
4. Se determină parametrii suprafeței prelucrate astfel încât erorile de poziție reciprocă să fie minime.

Pentru verificarea metodei propuse vom exemplifica aplicarea acesteia în cazul unor prelucrării prin strunjire, în situația în care există o singură suprafața de referință. Vor fi tratate cazurile în care forma suprafeței de referință este cilindrică sau conică. Sistemul palpator va fi orientat pe direcția radială a piesei, adică paralel cu axa X a mașinii. Pentru măsurarea suprafeței de referință se va roti arborele principal concomitent cu deplasarea saniei longitudinale a mașinii, adică deplasarea axei Z.

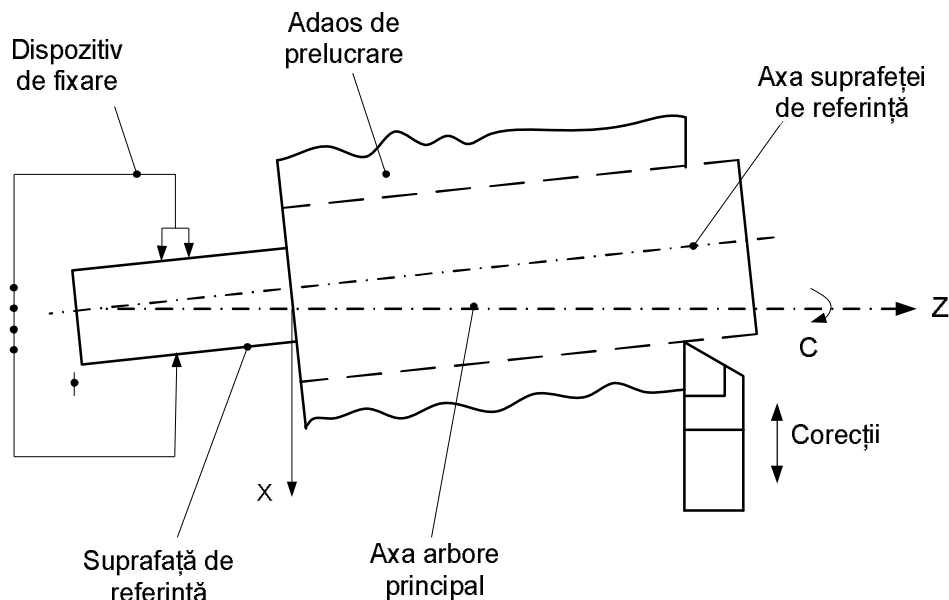


Fig. 0.9. Erorile de fixare în cazul operațiilor de strunjire

În urma prelucrării va fi necesară obținerea unei suprafețe excentrice în raport cu axa de rotație a arborelui principal, însă coaxială cu suprafața de referință.

Cazul general este acela în care axa arborelui principal și axa suprafeței de referință sunt disjuncte astfel:

- sunt excentrice,
- sunt înclinate una față de alta.

Să considerăm cazul prezentat în figura de mai sus, în care o piesă cilindrică este fixată în universal. Piesa este fixată în zona suprafeței de referință. Ne propunem ca suprafața prelucrată să fie coaxială cu suprafața de referință. Pentru aceasta este necesară identificarea parametrilor axei suprafeței de referință. Pe baza informațiilor obținute în urma identificării suprafeței de referință, se determină traiectoria sculei necesară pentru efectuarea prelucrării.

### Identificarea parametrilor de poziție pentru o suprafață de referință cilindrică

Să considerăm o dreaptă  $\delta$ , a cărei poziție în raport cu un sistem de coordonate carteziene  $xoyz$  poate fi exprimată prin relațiile:

$$\begin{cases} x = x_0 + \lambda l \\ y = y_0 + \lambda m \\ z = \lambda n \end{cases} \quad (0.24)$$

sau în formă vectorială:

$$\vec{r} = \vec{r}_0 + \lambda \vec{u}, \text{ cu } \|\vec{u}\| = 1 \Rightarrow \sqrt{l^2 + m^2 + n^2} = 1 \quad (0.25)$$

În relația de mai sus  $l, m, n$ , reprezintă cosinuzii directori ai dreptei  $\delta$ , iar  $x_0$  și  $y_0$  reprezintă coordonatele punctului de intersecție dintre dreapta  $\delta$  și planul  $xoy$ . Sistemul  $xoyz$  este un sistem de coordonate mobil, la care axa  $z$  este identică cu axa  $Z$  a sistemului de coordonate al mașinii, adică cu axa arborelui principal, dar care este solidar cu dispozitivul de fixare al arborelui principal.

În sistemul de coordonate  $xoyz$  este definit un cilindru pentru care dreapta  $\delta$  reprezintă axa cilindruului. Acest cilindru reprezintă suprafața de referință a căror parametri trebuie identificați folosind date colectate în urma inspecției „on machine”. Parametrii corespunzători suprafeței de referință sunt:

- $R$  - raza cilindruului;
- $l, m, n, x_0$  și  $y_0$  parametri care definesc poziția axei cilindruului. Cu ajutorul parametrilor  $x_0$  și  $y_0$  se poate determina excentricitatea cilindruului față de axa arborelui principal în planul  $xoy$  astfel:

$$e = \sqrt{x_0^2 + y_0^2} \quad (0.26)$$

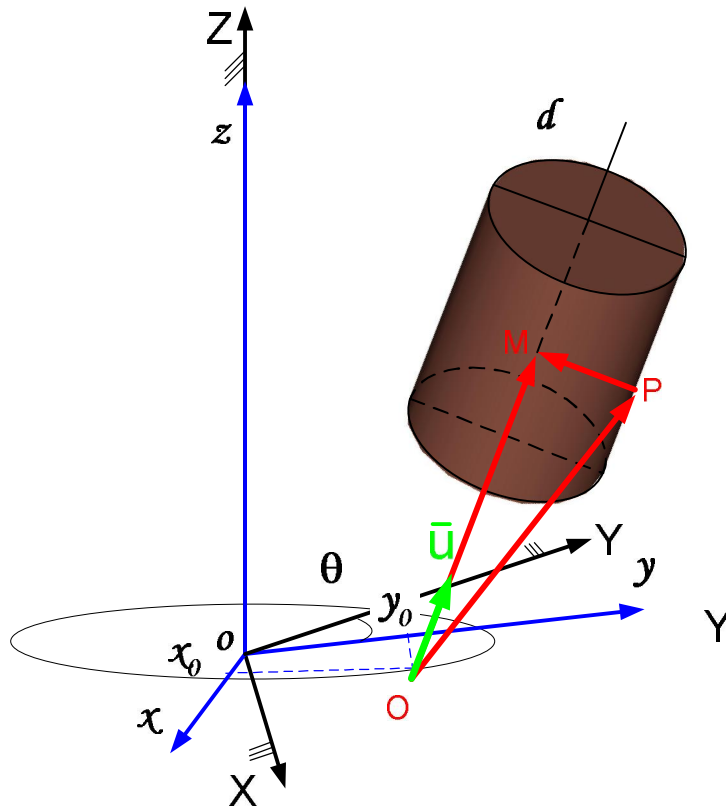


Fig. 0.10. Sistemele de coordonate utilizate pentru identificarea parametrilor corespunzători unei suprafețe cilindrice

Cilindrul poate fi definit ca fiind locul geometric al punctelor dintr-un spațiu tridimensional egal depărtate de o dreaptă. Distanța de la un punct  $P$  la dreapta  $\delta$  care are versorul  $\bar{u}$  este definită astfel:

$$R = D(P, \delta) = \frac{\|\overline{OM} \times \overline{OP}\|}{\|\overline{OM}\|} = \|\bar{u} \times \overline{OP}\|, \quad (0.27)$$

- unde  $M$  reprezintă punctul de intersecție dintre perpendiculara dusă din punctul  $P$  la dreapta, iar punctul  $O$  reprezintă punctul de intersecție al dreptei  $\delta$  cu planul  $xoy$ .

Exprimăm produsul vectorial astfel:

$$\bar{u} \times \overline{OP} = \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ x-x_0 & y-y_0 & z \\ l & m & n \end{vmatrix} \quad (0.28)$$

$$\bar{u} \times \overline{OP} = \bar{i}[n(y-y_0) - mz] + \bar{j}[lz - n(x-x_0)] + \bar{k}[m(x-x_0) - l(y-y_0)]$$

Dar  $n = \sqrt{1 - m^2 - l^2}$ .

Rezultă distanța de la punctul  $P$  la dreapta  $\delta$  care va fi constanta  $R$ .

$$R = \sqrt{\left[\sqrt{1 - m^2 - l^2}(y - y_0) - mz\right]^2 + \left[lz - \sqrt{1 - m^2 - l^2}(x - x_0)\right]^2 + \left[m(x - x_0) - l(y - y_0)\right]^2} \quad (0.29)$$

Considerăm faptul că sistemul  $xyz$  este rotit cu un unghi  $\theta$  în raport cu un sistem de coordonate fix  $XYZ$ . Coordonatele  $x, y, z$  sunt exprimate în sistemul  $XYZ$  cu transformarea:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (0.30)$$

Adică coordonatele  $x, y$  și  $z$  pot fi exprimate în funcție de coordonatele  $X, Y$  și  $Z$  și de unghiul  $\theta$  prin relațiile:

$$\begin{cases} x = X \cdot \cos(\theta) - Y \cdot \sin(\theta) \\ y = X \cdot \sin(\theta) + Y \cdot \cos(\theta) \\ z = Z \end{cases} \quad (0.31)$$

Măsurarea se realizează în coordonatele mașinii, iar instrumentul de măsură, în cazul pe care îl considerăm este orientat după direcția axei  $X$  a mașinii. Coordonatele punctelor explorate de sistemul de măsură al mașinii sunt caracterizate de valoarea  $Y=0$ . Rezultă:

$$\begin{cases} x = X \cdot \cos(\theta) \\ y = X \cdot \sin(\theta) \\ z = Z \end{cases} \quad (0.32)$$

Înlocuim relațiile (0.32) în relația (0.29) obținând o ecuație de gradul 2 pentru care necunoscuta este  $X$ :

$$aX^2 + bX + c = 0 \quad (0.33)$$

Unde:

$$a = 1 - [m \cdot \sin(\theta) + l \cdot \cos(\theta)]^2$$



$$\begin{aligned}
b &= 2y_0 \cdot \left[ m^2 \sin(\theta) - \sin(\theta) + l \cdot \sqrt{1 - m^2 - l^2} \cdot \cos(\theta) \right] + \\
&+ 2x_0 \cdot \left[ l^2 \cos(\theta) - \cos(\theta) + l \cdot m \cdot \sin(\theta) \right] - \\
&- 2 \cdot z \cdot \sqrt{1 - m^2 - l^2} \cdot \left[ m \cdot \sin(\theta) + l \cdot \cos(\theta) \right] \\
c &= x_0(1 - l^2) + y_0(1 - m^2) + z(l^2 + m^2) + \\
&+ 2(m \cdot \sqrt{1 - m^2 - l^2} \cdot y_0 z + l \cdot \sqrt{1 - m^2 - l^2} \cdot z \cdot x_0 - l \cdot m \cdot x_0 \cdot y_0) - R^2
\end{aligned}$$

- cu soluțiile

$$X_{12} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (0.34)$$

În cazul vizat de noi comparatorul măsoară cea mai mare valoare dintre soluțiile ecuației deoarece comparatorul este fixat pe suportul portsculă. În cazul fixării unor suprafețe cilindrice în universal parametrii  $m$ ,  $l$ ,  $x_0$  și  $y_0$  nu pot lua valori oricât de mari datorită modului de fixare, dreapta  $d$  este aproape identică cu axa  $Z$ . Astfel putem considera că valorile pentru parametrii  $m$  și  $l$  apropiate de 0. Astfel dacă cosinuzii directori ai dreptei  $\delta$  în condițiile în care axa cilindrului ar face cu axa piesei un unghi de 15grade atunci  $l^2 + m^2 = 1 - \cos^2(\pi/12) = 0,067$ . Indiferent de valoarea unghiului  $\theta$  parametrul  $a$  din ecuația de gradul 2 este pozitiv. Astfel putem considera faptul că relația pentru mărimea  $X$  care este măsurată cu ajutorul comparatorului poate fi descrisă matematic astfel:

$$X_c(l, m, x_0, y_0, R, \theta, z) = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (0.35)$$

Pentru determinarea parametrilor  $l$ ,  $m$ ,  $x_0, y_0$ ,  $R$  propunem următoarea metodă:

- 1- comparatorul digital va fi poziționat după direcția axei X a mașinii.
- 2- Se va realiza un ciclu de măsurare, în timpul căruia piesa va fi rotită, iar comparatorul va fi deplasat după direcția axei Z pentru a se realiza inspecția suprafeței de referință.
- 3- Valorile măsurate de comparatorul digital vor fi înregistrate într-o bază de date care va conține pentru fiecare înregistrare a comparatorului pe care o vom nota  $Xm$  și valorile corespunzătoare cotei  $Z$  și unghiului de rotație al arborelui principal  $C$  determinate în momentul măsurării.
- 4- Se rezolvă următoarea problemă de optimizare:

Dându-se lista valorilor  $Xm(i)$ ,  $C(i)$ ,  $Z(i)$  cu de la  $i = \overline{1..n}$ , unde  $n$  este numărul de măsurători să se determine  $l$ ,  $m$ ,  $x_0$ ,  $y_0$  astfel încât suma:

$$S = \sum_{i=1}^n (Xm(i) - X_c(l, m, x_0, y_0, R, C(i), Z(i)))^2 \quad (0.36)$$

să fie minimă. Problema de optimizare este o problemă de regresie neliniară care poate fi rezolvată folosind algoritmi clasici de optimizare cum ar fi algoritmul Gauss-Newton sau algoritmul Levenberg-Marquardt.

### Identificarea parametrilor de poziție pentru o suprafață de referință conică

Ca și în cazul precedent, vom considera aceleași sisteme de coordonate carteziene, în raport cu care este definită dreapta  $\delta$  care este axa conului care conține suprafața de referință. Dreapta  $\delta$ , a cărei poziție în raport cu un sistem de coordonate carteziene  $xoyz$  poate fi exprimată prin relațiile:

$$\begin{cases} x = x_0 + \lambda l \\ y = y_0 + \lambda m \\ z = \lambda n \end{cases} \quad (0.37)$$

sau în formă vectorială:

$$\vec{r} = \vec{r}_0 + \lambda \vec{u}, \text{ cu } \|\vec{u}\| = 1 \Rightarrow \sqrt{l^2 + m^2 + n^2} = 1 \quad (0.38)$$

Parametrii suprafeței conului care trebuie determinați de algoritmul de identificare sunt:

- Unghiul la vârf al conului
- Poziția vârfului conului.

În figura 0.11 am considerat un con a cărui axă este dreapta  $\delta$ , vârful conului este punctul  $V$  care aparține dreptei  $\delta$ , iar unghiul la vârf este  $\alpha$ . Poziția punctului  $V$  în raport cu sistemul de coordonate  $xoyz$  este definită prin ecuațiile:

$$\begin{cases} x_v = x_0 + kl \\ y_v = y_0 + km \\ z_v = kn \end{cases} \quad (0.39)$$

Așadar punctul  $V$  este definit de parametrii dreptei  $\delta$  și de un parametru  $k$  care definește poziția punctului pe dreaptă.

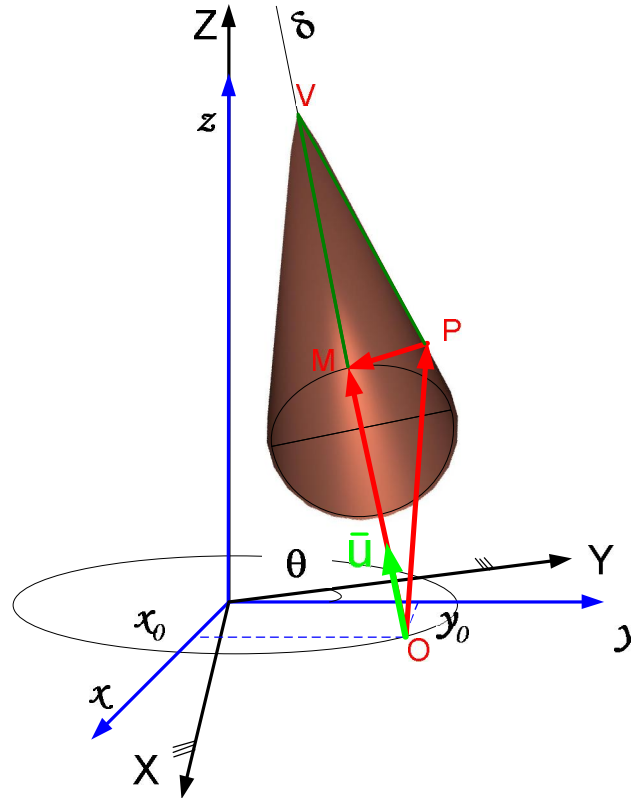


Fig. 0.11. Sistemele de coordonate utilizate pentru identificarea parametrilor corespunzătorii unei suprafețe conice

Considerăm un punct  $P$  de coordonate  $(xyz)$  aflat pe suprafața cilindrului. Distanța de la  $P$  la dreapta  $\delta$  poate fi exprimată cu ecuația:

$$r = D(P, \delta) = \frac{\|\overline{OM} \times \overline{OP}\|}{\|\overline{OM}\|} = \|\bar{u} \times \overline{OP}\| \quad (0.40)$$

De asemenea, considerăm triunghiul dreptunghic  $\Delta VMP$ , în care unghiul  $\sphericalangle MVP$  este egal cu  $\alpha/2$ .

$$r = \|\overline{AM}\| \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (0.41)$$

$$\text{dar, } \|\overline{AM}\| = \sqrt{(x - x_0 - kl)^2 + (y - y_0 - km)^2 + (z - kl)^2} \quad (0.42)$$

Combinând ecuațiile (0.40), (0.41) și (0.42) rezultă:

$$\sqrt{(x - x_0 - kl)^2 + (y - y_0 - km)^2 + (z - k\sqrt{1 - m^2 - l^2})^2} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \sqrt{\left[\sqrt{1 - m^2 - l^2} (y - y_0) - mz\right]^2 + \left[lz - \sqrt{1 - m^2 - l^2} (x - x_0)\right]^2 + [m(x - x_0) - l(y - y_0)]^2} \quad (0.43)$$

Considerăm faptul că sistemul  $xyz$  este rotit cu un unghi  $\theta$  în raport cu un sistem de coordonate fix  $XYZ$ . Coordonatele  $x$   $y$   $z$  sunt exprimate în sistemul  $XYZ$  cu transformarea:

$$\begin{cases} x = X \cdot \cos(\theta) - Y \cdot \sin(\theta) \\ y = X \cdot \sin(\theta) + Y \cdot \cos(\theta) \\ z = Z \end{cases} \quad (0.44)$$

Ca și în cazul identificării parametrilor suprafețelor cilindrice, măsurarea se realizează în coordonatele mașinii, iar instrumentul de măsură este orientat după direcția axei X a mașinii. Coordonatele punctelor explorate de sistemul de măsură al mașinii sunt caracterizate de valoarea  $Y=0$ . Rezultă:

$$\begin{cases} x = X \cdot \cos(\theta) \\ y = X \cdot \sin(\theta) \\ z = Z \end{cases} \quad (0.45)$$

Înlocuim (0.45) în ecuația (0.43) și obținem o ecuație de gradul 2 în care  $X$  este necunoscuta.

$$aX^2 + bX + c = 0 \quad (0.46)$$

Prin rezolvarea ecuației obținem două soluții corespunzătoare punctelor ce aparțin cilindrului pentru care  $Y=0$ , dar o reținem pe cea pentru care valoarea  $X$  este mai mare

$$X_c(l, m, x_0, y_0, k, \alpha, \theta, Z) = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (0.47)$$

Pentru identificarea parametrilor  $l, m, x_0, y_0, k$  și  $\alpha$  se va proceda ca și în cazul în care suprafața de referință este cilindrică. Se va realiza un ciclu de măsurare, în timpul căruia piesa va fi rotită, iar comparatorul va fi deplasat pe direcția axei Z pentru a se realiza inspecția suprafeței de referință.

Valorile măsurate de comparatorul digital vor fi înregistrate într-o bază de date care va conține pentru fiecare înregistrare a comparatorului pe care o vom nota  $Xm$ , valorile corespunzătoare cotei Z și unghiului de rotație al arborelui principal  $C$  determinate în momentul măsurării.

Se rezolvă următoarea problemă de optimizare:

Dându-se lista valorilor  $Xm(i), C(i), Z(i)$  cu de la  $i = \overline{1..n}$ , unde  $n$  este numărul de măsurători să se determine  $l, m, x_0, y_0, k$  și  $\alpha$  astfel încât suma:

$$S = \sum_{i=1}^n (Xm(i) - X_c(l, m, x_0, y_0, k, \alpha, C(i), Z(i)))^2 \quad (0.48)$$

să fie minimă. Problema de optimizare este o problemă de regresie neliniară care poate fi rezolvată folosind aceeași algoritmi ca și în cazul problemei identificării suprafeței de referință cilindrice.

### Aplicarea corecțiilor în vederea diminuării erorilor de poziție reciprocă

După identificarea parametrilor de poziție corespunzători suprafeței de referință este necesară determinarea poziției punctelor aflate pe suprafața ce trebuie prelucrată, astfel încât axa acestora să fie identică cu axa suprafeței de referință. Pentru a prelucra suprafața astfel încât erorile de poziție în raport cu suprafața de referință să fie minime este necesar ca în timpul prelucrării și a rotirii arborelui principal, cuțitului să îi fie aplicate mișcări de corecție după direcția axei X. Evident, amplitudinea acestor mișcări este redusă, însă frecvența lor este

ridicată. Acționarea saniei transversale pentru realizarea mișcărilor de corecție nu este realizabilă fizic datorită inerției mari a elementelor care alcătuiesc lanțul cinematic de avans. În schimb se poate utiliza un element de execuție piezoelectric, care poate opera la frecvențe ridicate de până la 600Hz și deplasări de până la 600 de micrometri.

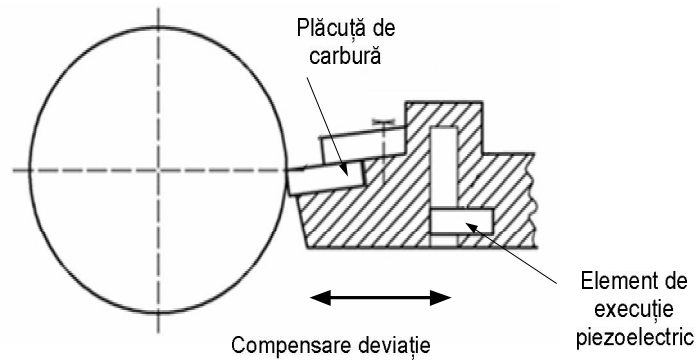


Fig. 0.12. Sistem de compensare a deviațiilor folosind element de execuție piezoelectric

Să considerăm situația în care suprafața ce trebuie prelucrată este de tip cilindric sau conic. Cunoscând parametrii care definesc poziția axei suprafeței de referință, adică parametrii  $l, m, x_0, y_0$  precum și parametrii nominali ai suprafeței ce trebuie prelucrate, de exemplu raza  $R$  pentru suprafețele cilindrice sau parametrii  $k$  și  $\alpha$  pentru suprafețe conice se poate determina o relație de forma  $X_c(l, m, x_0, y_0, R, \theta, z)$  sau  $X_c(l, m, x_0, y_0, k, \alpha, \theta, Z)$  în care prin introducerea coordonatelor  $\theta$  și  $Z$  se obțin corecțiile ce trebuie aplicate sculei.

+=====+

+=====+

## C

## conceperea și realizarea standului experimental

4.1 *Sistemul tehnologic experimental*

4.2 *Sistemul de monitorizare*

4.3 *Concluzii*

### *Sistemul tehnologic experimental*

Pentru realizarea experimentelor fizice necesare pentru studiul aspectelor legate de conducerea holistic integrată a sistemelor tehnologice, s-a realizat un stand experimental compus dintr-un strung frontal de producție românească, an de fabricație 1982. Mașina unealtă permitea inițial doar efectuarea unor operații de strunjire longitudinală și transversale.



*Fig. 0.1. Sistemul tehnologic experimental*

Structura cinematică a mașinii permitea deplasarea celor două sănii, sania longitudinală și sania transversală folosind un singur motor de acționare. Axele de deplasare X și Z, aferente acestor sănii erau acționate succesiv, pentru a permite efectuarea operațiilor de prelucrare. Lanțurile cinematice corespunzătoare mișcărilor de avans au ca elemente de transformare a mișcării de rotație în mișcare de translație șuruburi cu bile. Mașina are în componența sa un cap revolver dotat cu patru posturi de lucru.

Lanțul cinematic al arborelui principal cuprinde două cutii de viteză, o cutie de viteze cu roți cuplabile ce permite obținerea a patru trepte de turație și o cutie de viteze cu roți baladoare. Acționarea cutiei de viteze cu roți culpabile se realizează utilizând patru cuplaje electromagnetice. Acționarea cutiei de viteze cu baladoare ce se află în păpușa fixă și care permite, de asemenea, selectarea a patru trepte de turație, se realizează utilizând o cheie care se introduce într-un lăcaș aflat în capul arborelui. Selectarea unei game de viteze se putea

realiza doar în situația în care arborele principal era oprit. Acționarea lanțului de viteze al arborelui principal se realiza utilizând un motor electric asincron cu rotorul în scurt circuit cu două trepte de turație (1500 rpm/11KW, 3000rpm/18KW). Turația arborelui principal putea fi schimbă doar în trepte.

Sistemul de conducere al strungului era un sistem de comandă rigid, realizat în logică cablată, introducerea programului se realiza utilizând un sistem de tip matrice cu diode. Stabilirea cotelor program pentru fiecare axă de lucru se realiza utilizând un sistem de opritori reglabili (un set de came prereglate ce sunt detectate folosind microlimitatoare electrice).

Această structură de comandă rudimentară nu putea fi folosită pentru efectuarea experimentelor deoarece nu era controlată numeric, posibilitatea de control fiind limitată în special datorită modului de implementare a sistemului de comandă. Sistemul de acționare electrică al mașinii era necorespunzător deoarece nu permitea variația continuă a turației arborelui principal, iar durata de răspuns a comenzilor de schimbare a treptelor de turație era ridicată în cazul în care era necesară schimbarea semnificativă a turației. Mai mult decât atât, structura mecanică a mașinii nu era proprie pentru efectuarea părții experimentale. Lanțurile cinematice de avans aferente săniilor mașinii aveau o latură comună și de aceea nu era posibilă deplasarea independentă a celor două axe de deplasare în vederea stabilirii unor corecții dimensionale.

Având în vedere aceste aspecte s-a modificat structura mecanică a mașinii unelte, eliminându-se legătura comună a celor două lanțuri de avans, introducându-se elementele necesare pentru interfațarea mecanică a două motoare de avans și a cinci traductoare de poziție. Două traductoare au fost folosite pentru fiecare axă de lucru, unul pentru a cuantifica rotația arborelui principal, iar celelalte două au fost folosite pentru a realiza comanda în buclă închisă motoarelor folosite pentru acționarea lanțurilor cinematice de avans.

Sistemul de acționare electrică a mașinii a fost schimbat în întregime, a fost proiectată o nouă schemă electrică pentru acționarea strungului. Motorul acționării de avans, motor electric de curent continuu cu rotor disc a fost înlocuit cu două motoare asincrone cu rotorul în scurt circuit. Motorul acționării principale a fost păstrat însă s-au folosit doar înfășurările pentru stabilirea vitezei de 3000 rot/min. Comanda motoarelor de avans este realizată folosind variatoare de viteză Altivar 71 produse de Schneider Electric. Variatoarele care comandă motoarele ce antrenează lanțurile cinematice aferente axelor X și Z au fost dotate cu carduri pentru realizarea funcției de control vectorial cu senzor. Poziția rotoarelor motoarelor de avans este furnizată de traductoare incrementale de poziție. Variatorul folosit pentru acționarea motorului arborelui principal operează în buclă deschisă.



*Fig. 0.2. Dulapul electric al strungului SF280*

Sistemul de comandă implementat în logică cablată a fost înlocuit cu un sistem implementat în logică programabilă. Acest sistem este compus dintr-un controler logic programabil Telemecanique din gama Premium. Controler-ul are o structură modulară având în componența sa module specializate. În logică cablată a fost proiectată doar partea care este responsabilă de securitatea instalației și a personalului, mai precis partea care gestionează: butoanele de avarie, limitatoarele electrice de căpăt de cursă, limitatoarele care detectează închiderea ușilor dulapului electric.

Structura controlerului conține un modul procesor care execută programul de control al mașinii, memorează datele și constantele specifice mașinii. Pentru controlul/achiziția ieșirilor, respectiv a intrărilor, s-au utilizat module specializate, module care se află în legătură cu circuitele de interfațare.(notate cu CI în figura 0.3). Modulele de ieșiri discrete controlează motoarele cu funcții auxiliare cum ar fi cele destinate sistemelor de ungere, de rotire a capului revolver (Mcr), de răcire ungere. Modulele de intrări sunt folosite pentru achiziția comenzilor de pe pupitrul de comandă și toți senzorii mașinii.



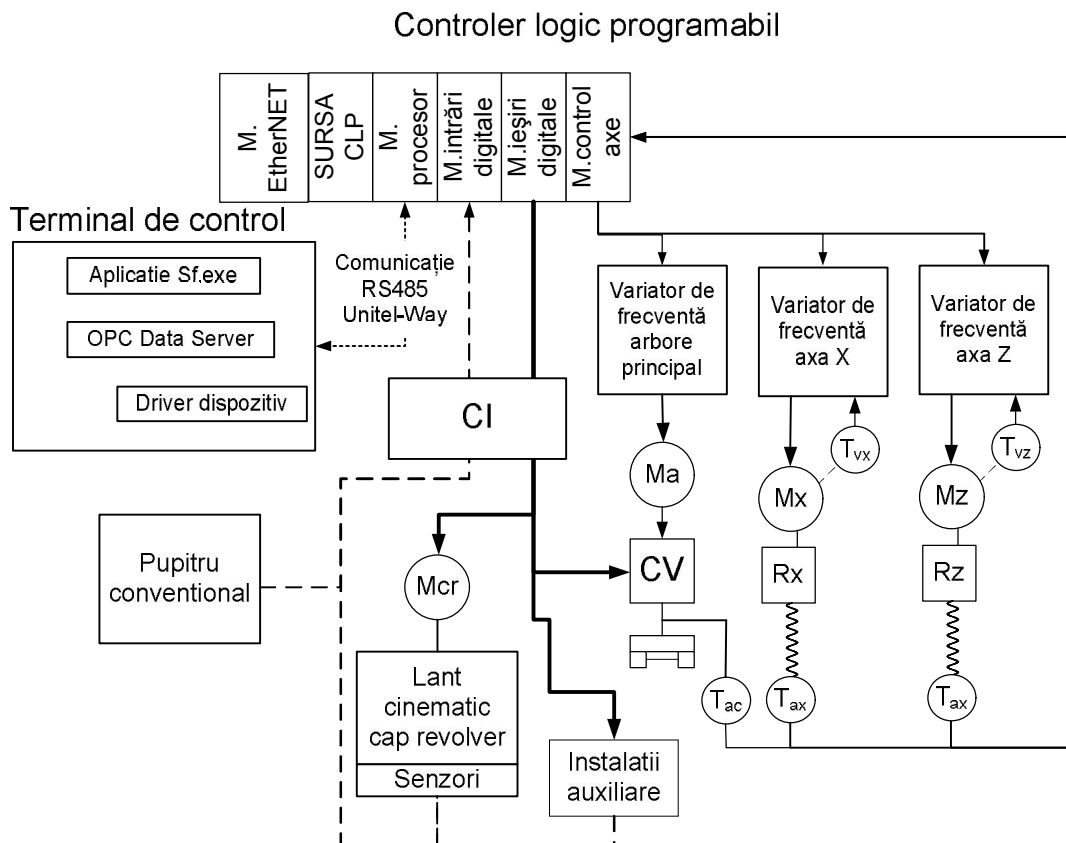


Fig. 0.3. Structura sistemului de acționare și comandă al strungului SF280

Structura de control cuprinde module pentru controlul axelor de deplasare, module care achiziționează semnale generate de traductoarele de poziție incrementale ( $T_{ac}$ ,  $T_{ax}$ ,  $T_{az}$ ) și generează semnalele bipolare de referință pentru variatoarele de frecvență. Funcția de comunicație este disponibilă de la nivelul modulului procesor care permite conectarea la rețele seriale industriale RS485 cu protocolul UnitelWay, dar și de la nivelul unui modul care permite conectarea în rețea Ethernet permițând controlul chiar prin internet.

Funcția de interfață om-mașină a strungului a fost implementată folosind un terminal industrial de control compatibil PC cu ecran tactil (touch screen). Controlerul logic programabil comunică cu terminalul industrial folosind rețeaua UnitelWay. Modulul de comunicație Ethernet este folosit pentru a permite conectarea controlerului la o rețea în vederea monitorizării funcționării mașinii. Viteza mare de transfer permite achiziționarea datelor din memoria controlerului programabil cu o frecvență de eșantionare ridicată.



Fig. 0.4. Pupitrul de comandă al strungului SF280

A fost realizat un program de comandă al controlerului programabil. Programul a fost implementat utilizând software-ul de programare PL7 Pro. Limbajele în care a fost implementat programul de control al mașinii sunt limbajele definite de standardul IEC 1131-3 și anume Sequential Function Chart, pentru procesarea secvențială asociată funcționării strungului, și limbajele Instruction List, Ladder și Structured text, pentru programarea acțiunilor corespunzătoare pașilor Grafset, a condițiilor asociate tranzițiilor de la un pas la altul, precum și a părții de program care nu necesită procesare secvențială.

Program de control al strungului este executat ciclic cu o frecvență cuprinsă între 100 și 300 Hz. Programul de control al strungului comunică cu terminalului om-mașină folosind un server de date OPC- OPC Factory Server, server dezvoltat de Schneider Electric. Serverul de date OPC gestionează transmiterea de date prin intermediul driver-ului corespunzător protocolului de comunicație UnitelWay link.

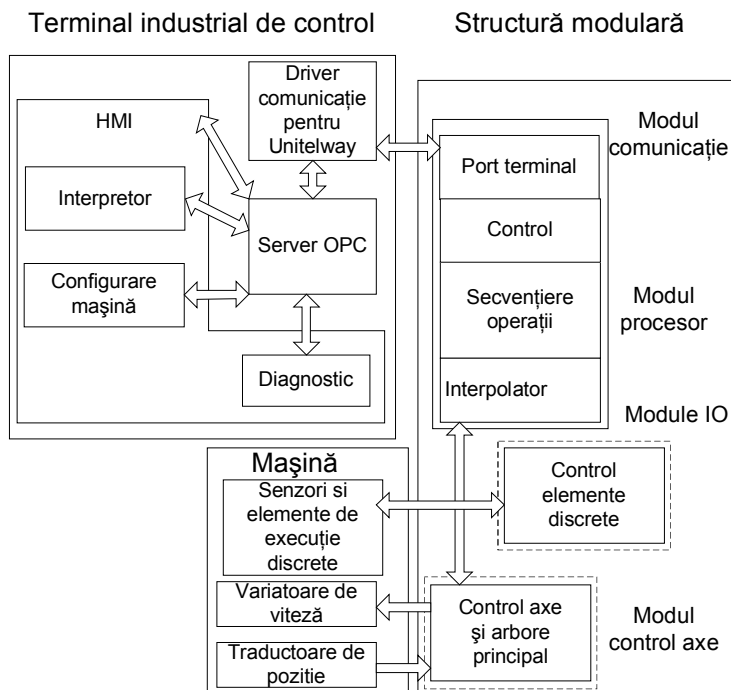


Fig. 0.5. Structura sistemului de comandă al strungului SF280

Obiectul OPC data server furnizează o modalitate de acces sau de comunicație cu mai multe surse de date. Clientul OPC se conectează la server cu care poate comunica folosind interfețele acestuia. Serverele OPC permit aplicațiilor client să creeze și să utilizeze obiecte de tip grup de articole. Toate obiectele prezentate respectă specificațiile COM și de aceea pot fi adresate doar prin intermediul interfețelor lor. Grupurile sunt obiecte care oferă posibilitatea clienților de a-și organiza datele pe care doresc să le acceseze. Grupurile de articole pot fi activate sau dezactivate ca o unitate. Fiecare grup de articole furnizează clientului o modalitate de subscriere la o listă de articole pentru a fi notificat de modificarea valorii lor. De asemenea, un grup permite efectuarea unor operații de scriere sau de citire a unui set de articole OPC. Un articol OPC poate fi un element de memorie CLP, o intrare, o ieșire sau orice alt element adresabil prin intermediul programului controlerului programabil. Operațiile de scriere sau de citire pot fi operații sincrone sau asincrone. La accesarea unor funcții sincrone programul client OPC este blocat până când funcția apelată returnează un rezultat, la apelarea funcțiilor asincrone funcția apelată de client returnează un rezultat instantaneu înainte de finalizarea operației de scriere sau de citire, însă după finalizarea operației, clientul va fi informat prin apelarea funcțiilor unui obiect COM implementat de client.

Aplicația ce rulează pe terminalul de control implementează funcția de interfață om-mașină, funcția de interpretor și partea de configurare software a mașinii. Utilizând aplicația ce rulează pe terminalul de control concomitent cu pupitrul de control al mașinii strungul poate fi controlat în modul de lucru manual, adică este posibilă efectuarea de deplasări cu sau fără a preciza un increment de mișcare, se poate stabili turația arborelui principal care poate fi variată în mod continuu, se poate selecta viteza de deplasare a axelor, se poate comanda oprirea, blocarea sau eliberarea arborelui principal al mașinii, se poate solicita schimbarea poziției capului revolver.

Sistemul de comandă implementează, de asemenea, funcția de autodiagnostic, informând operatorul asupra defecțiunilor apărute pe parcursul funcționare. De la nivelul

terminalului de control este posibilă configurarea unor parametri referitori la mașina uneltă, cum ar fi treapta de turație selectată mecanic, de la nivelul cutiei de viteze.

Tot la nivelul terminalului de control este implementat un program care interpretează programul introdus de operator în format ISO pentru comanda mașinii unelte. Programul piesă poate fi transferat în memoria controlerului care îl va executa secvență cu secvență. Aplicația de comandă a structurii controlerului programabil este o aplicație monotask, întreg programul fiind executat în task-ul MAST. Programul este alcătuit din două părți:

- Erori-secțiune folosită pentru partea de autodiagnostic a mașinii. În acest regim sunt analizate condițiile de funcționare corespunzătoare a elementelor mașinii, a sistemului de comandă și a modului de executare a operațiilor impuse.
- Secvențial-secțiune folosită pentru a realiza comanda propriu-zisă a mașinii. Secțiunea este bazată pe partea de procesare secvențială corespunzătoare diagramelor Grafcet de comandă. La fiecare ciclu de baleere a programului CLP se execută suplimentar față de elementele Grafcet următoarele structuri:
  - Preprocesare – PRL- executată înaintea diagramei Grafcet este folosită în special pentru gestionarea regimurilor de lucru ale mașinii și pentru determinarea rezultatelor unor expresii utilizate pe tot parcursul programului.
  - Postprocesare –Post- fiind ultima parte din program executată înainte de actualizarea ieșirilor, postprocesarea este utilizată pentru asigurarea interblocajelor specifice aplicației dar și pentru gestionarea modului de lucru manual.

O secțiune de program denumită “ Erori” este scrisă în limbajul Ladder și face analiza tuturor condițiilor necesare funcționării corecte și a condițiilor de asigurare a siguranței de funcționare.

Rezultatul acestei secțiuni este finalizat printr-o sumă de erori depusă în variabila de tip boolean și un cod de eroare depus într-o variabila de tip cuvânt. În cazul în care toate condițiile de funcționare sunt asigurate bitul este inactiv, iar variabila prin care se precizează codul erori are valoarea 0. Valoarea bitului „sumă de erori” condiționează toate activitățile din celelalte secțiuni ale programului. Astfel, în momentul în care acest bit este activ, toate acțiunile din celelalte secțiuni ale programului sunt inhibitate și se apelează o serie de proceduri de tratare a erorii apărute.

Analiza condițiilor ce trebuie îndeplinite se face astfel încât atunci pe mașină există mai multe condiții neîndeplinite să se genereze un cod de eroare care să se apropie cât mai mult de cauzele defecțiunii. Acest lucru este posibil prin suprascrierea cuvântului de eroare astfel încât o posibilă cauză a unei erori să aibă un cod mai mic decât eroarea respectivă. Erorile sunt analizate succesiv și în cazul în care este găsită o defecțiune se verifică existența unor defecțiuni cu nivel de prioritate mai mare. Dacă nu există o altă eroare prioritară, se depune în variabila de tip cuvânt codul corespunzător erorii detectate. Există situații în care datorită unei defecțiuni se generează un set de defecțiuni în lanț. De exemplu dacă variatorul unei axe nu mai funcționează eroarea de poziționare din cadrul mișcării curente va crește peste limita admisibilă. Cauza acestei situații nu este o defecțiune mecanică, ci faptul că variatorul nu funcționează. Se verifică dacă valoarea variabilei este

nulă, caz în care se dezactivează bitul sumei de erori sau dacă valoarea acesteia este nenulă se activează bitul sumei de erori.

Programul de interfață om-mașină fi notificat despre schimbarea variabilei ce conține codul de eroare și va afișa operatorului un mesaj prin care se specifică cauzele apariției erorii și posibilitățile de remediere.

În cadrul secțiunii de procesare secvențială se realizează printre altele gestionarea modului în care programul piesă transmis de către programul ce rulează pe terminalul de control al mașinii este gestionat. Pentru aceasta, pentru fiecare funcție ce intră în componența frazei curente se va realiza o operație de scriere a memoriei controlerului de către programul de interfață om-mașină. Scrierea se realizează în locații prestabilite de memorie. Confirmarea transmiterii unei fraze se realizează, de asemenea, prin scrierea unui bit din memoria controlerului. Controlerul transferă datele recepționate într-un buffer circular de memorie care poate stoca până la 16 fraze. În timpul execuției unei fraze transferul de date dintre terminal și controler nu este sistat decât atunci când bufferul este plin.

Una din diagramele Grafcet este folosită pentru secvențierea corespunzătoare execuției modului de lucru automat. Această diagramă este prezentată în figura 0.6.

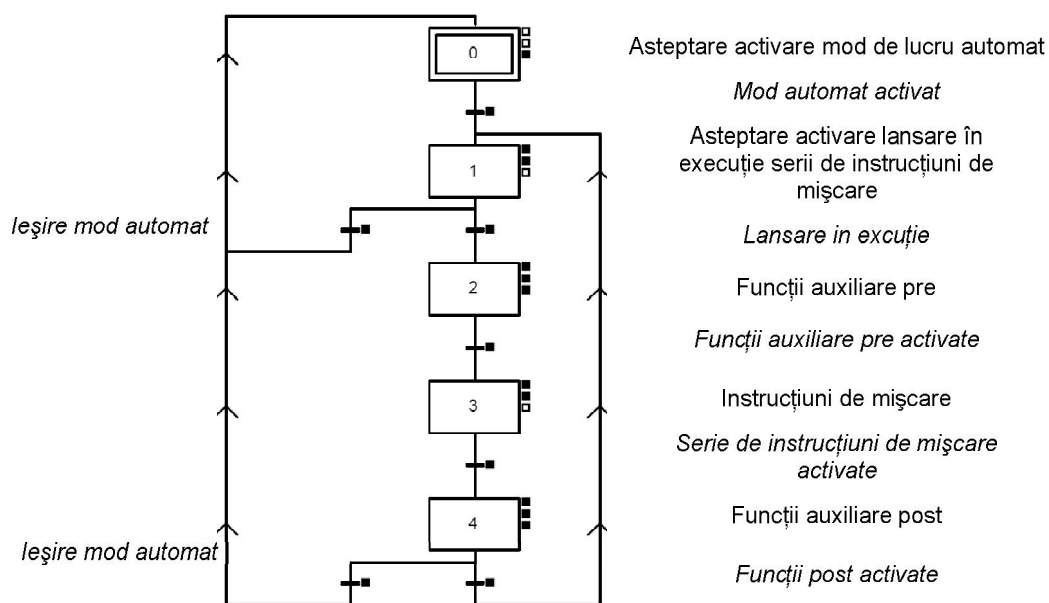


Fig. 0.6. Diagrama Grafcet pentru conducerea strungului după program

Pasul 0 este activ când modul de lucru automat nu a fost activat. Tranziția de la pasul 0 la pasul 1 implică activarea modului de lucru automat de la nivelul interfeței om-mașină și apăsarea unui buton de pe panoul instalației în vederea lansării în execuție a programului piesă.

Lansarea în execuție a unei fraze este analizată de controler care nu inițiază execuția decât după ce analizează situația în care frazele ce conțin mișcări care trebuie efectuate în mod continuu vor putea fi executate corespunzător, adică fără oprirea mișcărilor. Controlerul așteaptă în pasul 1, până când bufferul circular este plin sau până când în buffer este prezentă o instrucțiune care necesită un timp mare de execuție de exemplu G04 F. adică temporizare sau funcții auxiliare gen M03, M04, M05, M06 etc. În această situație se realizează trecerea la pasul Grafcet următor, adică la pasul 2.

Funcțiile auxiliare ce trebuie activate înainte de efectuarea mișcărilor denumite funcții „pre” sunt efectuate în pasul 2. După activarea acestor funcții, se trece la executarea instrucțiunilor de mișcare pasul 3. Instrucțiunile de mișcare sunt transmise secvențial către modulul de control al axelor care controlează variatoarele de viteză corespunzătoare axelor de deplasare și arborelui principal. După ce s-a efectuat un întreg ciclu de instrucțiuni de mișcare, se realizează trecerea la pasul 4, în care se execută funcțiile auxiliare „post” cum ar fi: M05, M06, M01, M02, M09. În cazul în care se dorește renunțarea la execuția programului piesă, operatorul va comanda prin intermediul terminalului de control, activarea unui bit care va determina activarea pasului 1 sau 4 și apoi trecerea la pasul 0. Pasul 0 este activat prin tranziția de la pasul 4 și în condițiile în care în cazul frazei curente este programată funcția M02.

#### *Sistemul de monitorizare*

În vederea monitorizării funcționării mașinii a fost proiectat un sistem dedicat care are drept scop construirea unei bazei de date în care vor fi stocate toate informațiile referitoare la evoluția în timp a unor mărimi care caracterizează procesul de prelucrare. Pentru a monitoriza funcționarea strungului a fost conceput un program implementat în mediul de programare Microsoft Visual C++. Acest program de monitorizare achiziționează date prin intermediul serverului de date OPC Factory Server. Serverul de date OPC Factory Server folosește un driver pentru a comunica prin rețea conform protocolului Modbus TCP IP. Calculatorul pe care rulează programul de monitorizare este conectat la o rețea Ethernet. Topologia rețelei este de tip stea, elementul central fiind un switch. Folosirea rețelei Ethernet a fost preferată datorită vitezei mari de transfer a datelor de 10-100Mbs.

La aceeași rețea este conectat și modulul de comunicație Ethernet din componența structurii mașinii. Software-ul de monitorizare achiziționează de la controlerul mașinii date referitoare la poziția celor două axe ale mașinii și poziția unghiulară a arborelui principal. Rezoluția traductoarelor corespunzătoare axelor este de 0,5 $\mu$ m. Caracteristicile traductoarelor incrementale folosite cu ajutorul cărora se măsoară aceste mărimi sunt prezentate în tabelul 0.1. De asemenea, se înregistrează și valoarea unei variabile index care este incrementată la 10ms. Această variabilă este folosită pentru a determina dacă în timpul monitorizării s-au pierdut pachete de date și, de asemenea, este utilizată și pentru a sincroniza date furnizate de mai multe echipamente.

*Tab. 0.1. Caracteristicile traductoarelor incrementale folosite pentru măsurarea deplasărilor axelor de lucru*

Rezoluție	5000 impulsuri
Rezoluție obținută prin multiplicare	20000 impulsuri
Frecvență maximă	160KHz
Ieșire	driver RS422

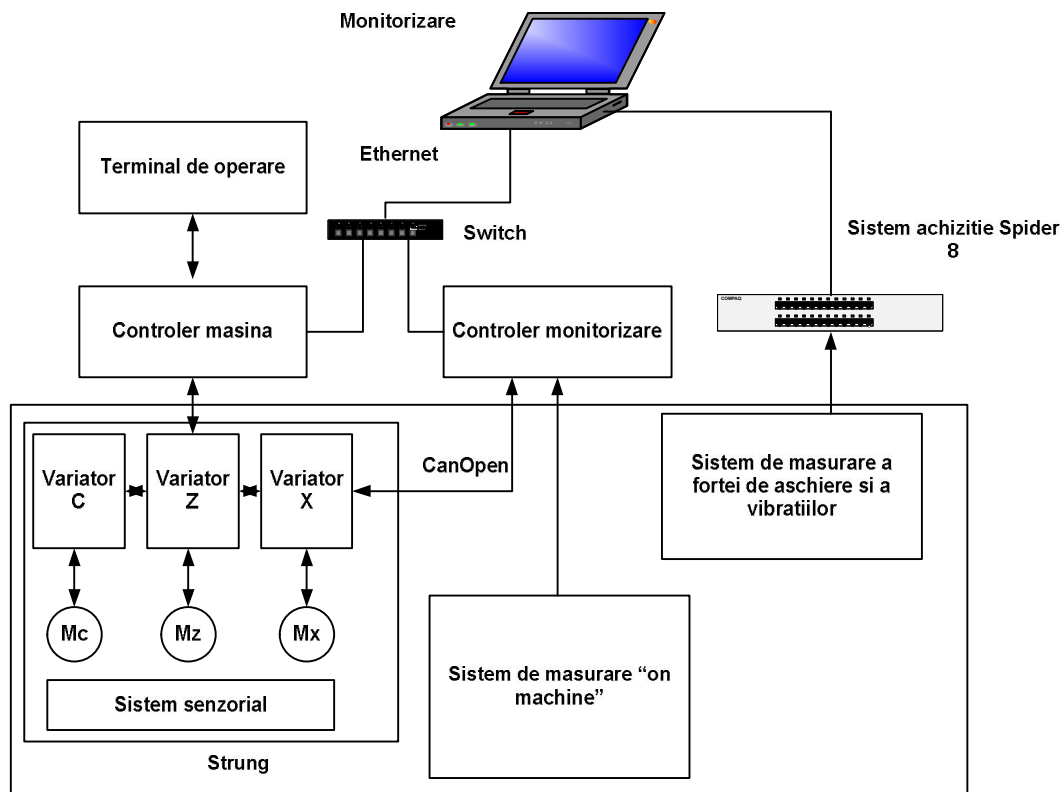


Fig. 0.7. Structura sistemului de monitorizare

În aceeași rețea Ethernet este conectat un al doilea controler care are posibilitatea de comunicare pe magistrala CAN Open. Protocolul CANOpen este un protocol de tip fieldbus bazat pe specificațiile Controller Area Network. CANOpen este un standard de protocol deschis care este acceptat și implementat de marea majoritate a producătorilor de echipamente de automatizare din întreaga lume. Variatoarele ATV71 pot fi utilizate ca noduri CANOpen. Al doilea controler este utilizat ca fiind master-ul pe magistrală CanOpen. Pentru configurare s-a utilizat pachetul software Sycon produs de Hylscler.GmbH cu ajutorul căruia se poate defini fiecare dispozitiv de pe magistrală pe baza unui EDS (Electronic Data Sheet). Pentru fiecare din cele trei variatoare s-a definit câte un obiect PDO (Process Data Object). Pentru fiecare obiect PDO s-au selectat din EDS-urile dispozitivelor, EDS-urile fiind în acest caz identice pentru fiecare dispozitiv, următoarele obiecte care vor fi accesibile la nivelul Master-ului:

- valoarea curentului absorbit,
- valoarea cuplului dezvoltat,
- energia consumată,
- puterea debitată.

Având în vedere faptul că variatoarele de viteză ATV71 nu sunt aparate de măsură, producătorul nu furnizează detalii privind acuratețea cu care sunt măsurate aceste mărimi.

La structura controler-ului sistemului de monitorizare poate fi adăugat un modul prin care se pot achiziționa date de la un sistem de



măsurare „on machine”. Acest sistem este alcătuit din două comparatoare digitate Heidenhain de tip ST1278 cu următoarele caracteristici:

- ieșire compatibilă RS422,
- rezoluția 1 μm,
- cursă 12 mm,
- acuratețe ±1 μm.

Modulul prin care se monitorizează semnalele furnizate de comparatoarele digitale este dotat cu patru intrări cu posibilitate de numărare rapidă de până la 1MHz. Comparatoarele au fost montate pe un suport care are rolul de a le susține în timpul operației de măsurare.

Controlerul care monitorizează comparatoarele digitale, reține valoarea curentă a numărătoarelor rapide, la fiecare ciclu de baleere a programului într-o zonă tampon de memorie. Această zonă tampon reține fiecare valoare pentru circa 100ms, adică pentru 10 cicluri de baleere a programului. În zona tampon datele sunt poziționate în funcție de timpul la care acestea au fost achiziționate. Pe măsură ce date noi sunt introduse în buffer, datele vechi sunt șterse, însă în condiții normale, aceste date sunt accesate de programul de monitorizare la aproape fiecare ciclu de baleere al programului.

În controlerul master a fost implementat un program care transferă datele transmise de variatoare într-un zonă tampon de memorie alcătuită din 200 de cuvinte. Zona tampon este gestionată în mod similar cu zona tampon în care se depun valorile curente ale numărătoarelor care numără impulsurile furnizate de comparatoare.

În afara sistemului de monitorizare descris anterior, în vederea măsurării forței de așchiere, s-a utilizat un sistem de achiziție de date produs de HBM denumit Spider 8. Sistemul de achiziție are în componența sa patru canale de bază de tip SR55, care permit conectarea la punți alcătuite din mărci tensometrice. Primele două canale pot fi folosite și pentru efectuarea funcției de numărare rapidă. Din nefericire, aceste intrări nu permit conectarea unor traductoare incrementale cu intrare diferențială compatibilă RS422. Sistemul este echipat, de asemenea, cu un canal de intrare opțional, denumit de producător SR01, la care se pot conecta termorezistențe, termocupluri, senzori cu ieșire bipolară ±10V sau cu ieșire 4-20mA. Caracteristicile sistemului de achiziție de date Spider 8.

Tab. 0.2. Caracteristicile sistemului de achiziție de date Spider 8

Clasă de acuratețe canal SR01	0.2
Clasă de acuratețe canal SR55	0.1
Rezoluție convertor analog digital	±25000
Variație liniaritate	0.5%
Frecvența maximă pentru canalele de numărare	1000KHz

Scula folosită pentru efectuarea experimentelor este un cuțit de strung produs de firma Sandvik model ISO DVJNL 2020K16.



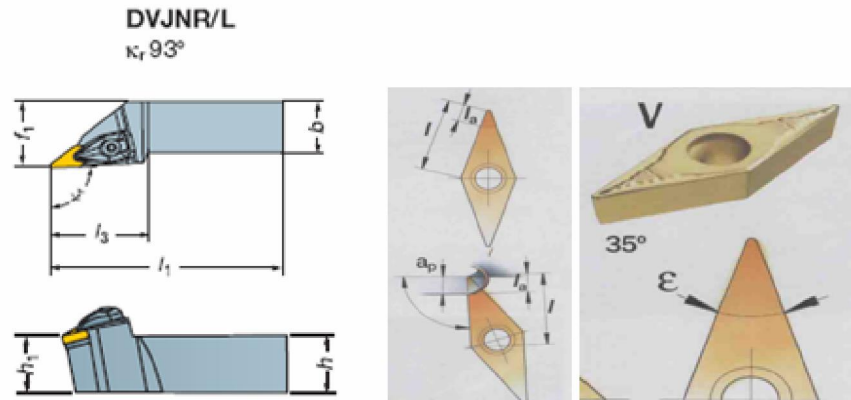


Fig. 0.8. Cuțitul folosit pentru experimente

Tab. 0.3. Geometria cuțitului folosit pentru efectuarea experimentelor

B	$f_1$	H	$h_1$	$l_1$	$l_3$	$\gamma_1$	$\alpha_s$	$\chi_\gamma$
20	25	20	20	125	46.6	-4	-13	93

Pentru derularea experimentelor au fost folosite inserții marca Garant din carbură metalică, a căror geometrie, respectiv material, este sintetizată în tabelul următor:

Tab. 0.4. Parametrii plăcuței

Geometrie	VNMG 160404
Unghi la vârf $\varepsilon$	$35^0$
Unghiul de degajare $\alpha$	$0^0$
Lungimea laturii active l	16 mm
Raza la vârful sculei r	0,4 mm
Grosimea plăcuței s	4,76 mm

Pe cuțitul folosit pentru efectuarea diverselor teste au fost aplicate patru mărci tensometrice, conectate două câte două în semipunte. Una din semipunți a fost folosită pentru a măsura componenta principală a forței de așchiere. Cealaltă semipunte a fost folosită pentru măsurarea componentei forței de așchiere corespunzătoare avansului longitudinal. Cuțitul a fost prelucrat astfel încât, în zona pe care au fost fixate mărcile tensometrice, secțiunea acestuia este 20X17mm.

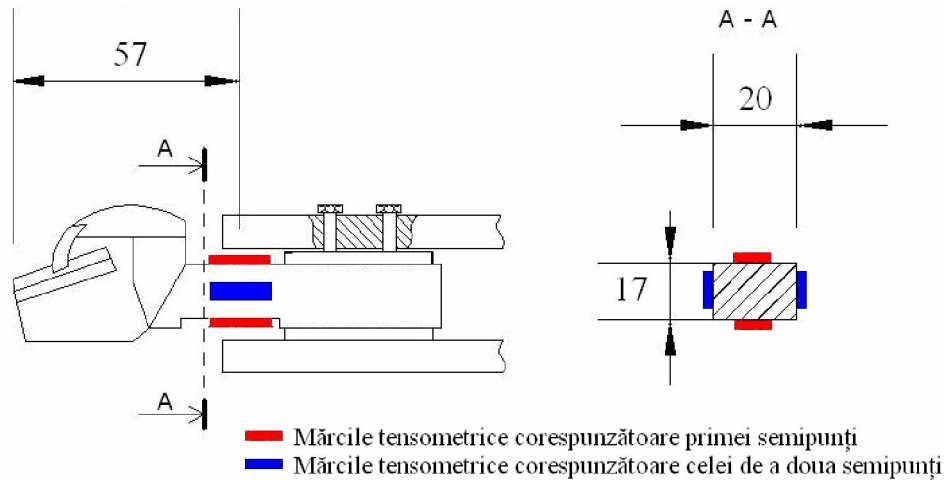


Fig. 0.9. Amplasarea mărcilor tensometrice pe cuțitul folosit pentru experimente

Pentru măsurarea vibrațiilor a fost utilizat un accelerometru produs de compania americană Connection Technology Center Inc. de tip AC140-2A a cărei specificații sunt expuse în tabelul 0.5. Accelerometrul a fost fixat pe scula așchietoare prin fixare cu șurub.

Tab. 0.5. Caracteristicile accelerometrului

Sensibilitate	100mV/g
Domeniul de frecvență	1-10000Hz
Frecvența de rezonanță	23000Hz
Domeniul de temperatura	-50-120 <sup>0</sup> C



Tab. 0.6. Fixarea accelerometrului la nivelul sculei așchietoare

Folosind cele două canale de numărare rapidă de care dispune sistemul de achiziție de date Spider 8 și două circuite de interfațare a semnalelor RS422, astfel încât acestea să poată fi conectate la intrări compatibile TTL, s-au achiziționat date de la traductoarele de poziție, cu ajutorul cărora se măsoară deplasarea axei Z și rotirea arborelui principal. Datele obținute de la aceste traductoare sunt folosite pentru a sincroniza datele obținute de la sistemul de achiziție de date Spider cu datele obținute de la cele două controlere.

### *Concluzii*

În urma conceperea standului experimental și a sistemului de prelucrare se pot trage următoarele concluzii:

1. În urma analizei structurii mecanice și a sistemelor de control și acționare a strungului frontal SF280 s-a determinat că aceasta nu este potrivit pentru realizarea experimentelor fizice necesare pentru elaborarea acestei lucrări. De aceea s-a modificat structura mecanică a mașinii și s-au înlocuit în întregime sistemele de acționare electrică și de control.
2. Modernizarea sistemului tehnologic experimental a fost realizată folosind echipamente de control și de acționare ce permit utilizarea unor protocoale de comunicație deschise, facilitând monitorizarea și controlul mașinii unelte.
3. Sistemul de monitorizare dezvoltat în cadrul cercetărilor permite înregistrarea mărimilor furnizate de traductoare incrementale de poziție, comparatoare digitale, a forțelor de așchiere, de accelerometrul fixat pe scula așchietoare și de variatoarele ce controlează motoarele sistemului tehnologic experimental.

## Experimente fizice și numerice privind metoda propusă conducere holistic integrată

---

- 5.1 *Experimente pentru controlul erorilor de proces*
    - 5.1.1. Programul experimental
    - 5.1.2. Determinarea relațiilor cauzale cu algoritmi RRelief și Corelation Feature Subset Evaluation
    - 5.1.3. Control bazat pe modelare analitică
    - 5.1.4. Control bazat modele tip Support Vector Regression
    - 5.1.5. Control bazat pe modelare neuronală
  - 5.2 *Experimente de control al erorilor de sistem*
  - 5.3 *Experimente de controlul stabilității*
    - 5.3.1. Abordare bazată pe analiză statistică
    - 5.3.2. Abordare bazată pe analiză armonică
  - 5.4 *Experimente de controlul economicității*
  - 5.5 *Experimente numerice de controlul ecologității*
  - 5.6 *Concluzii*
-

## Experimente pentru controlul erorilor de proces

## Programul experimental

Pentru studierea cauzelor și modului de manifestare a erorilor de proces a fost organizat un experiment care a constat în prelucrarea unui lot de 40 de piese (figura 0.2), din OLC45, care anterior au fost prelucrate pe strungul frontal SF280. Suprafața semifabricatelor ce au fost prelucrate în cadrul acestui experiment a fost alcătuită din zone conice, cu lungime de 8mm, cu o pantă maximă de 1/4 . Lungimea totală a piesei a fost de 120 de mm, iar partea prelucrată din piese a avut o lungime de 60mm. Din totalul de piese ale lotului, doar prelucrarea a 29 de piese a fost monitorizată. În figura 0.1 se prezintă forma semifabricatelor care au fost prelucrate, iar în tabelul 0.1 se prezintă valorile pentru diametrele cotate în figură, precum și valoarea avansului cu care piesele au fost prelucrate. Turația arborelui principal a fost aceeași pentru întreg lotul, valoarea acesteia fiind de 800 lot/min.

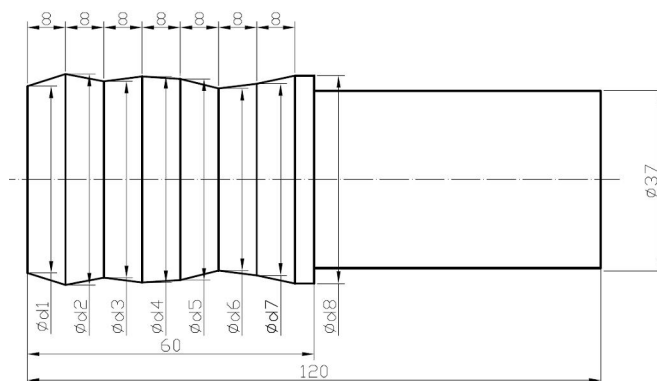


Fig. 0.1. Forma semifabricatelor folosite pentru determinarea deviațiilor dimensionale

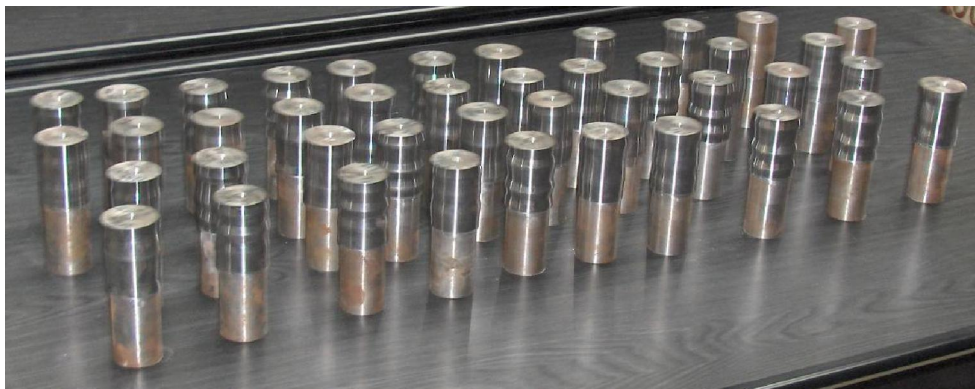


Fig. 0.2. Lotul de semifabricate folosit pentru experiment  
Tabel 0.1. Dimensiunile semifabricatelor prelucrate în cadrul lotului

Nr. Crt.	Φd1 [mm]	Φd2 [mm]	Φd3 [mm]	Φd4 [mm]	Φd5 [mm]	Φd6 [mm]	Φd7 [mm]	Φd8 [mm]	Avans [mm/lot]
1	40.2	40	40.2	40.4	40.6	40.8	40.8	42.2	0.2
2	40.6	39.6	39.2	39.4	39.6	40	40.2	42.4	0.2
3	40	39.8	39.6	39.8	40	40.2	40.2	40.8	0.25

4	39.8	42	42	42	42	42	42	41	0.3
5	40.2	39.8	39.8	40	40.2	40.2	40	39.8	0.2
6	40.4	40.6	40.6	40.8	40.8	41	41.2	39.6	0.25
7	40.6	39.4	39.8	40	40.2	40.4	40.2	40	0.3
8	40	40.6	40.6	41	41	40.8	40.8	42	0.35
9	40	41.8	41.8	41.8	41.8	42	42.4	40.2	0.2
10	39.4	40.4	40.2	40.4	40.8	41	41	40.8	0.25
11	39.8	40.6	40.6	40.6	40.8	40.6	40.8	40.2	0.3
12	42	40	40.2	40	40.2	40	40	41	0.35
13	40	40.6	40.6	40.6	40.8	41	41.2	41.8	0.2
14	40.8	40.2	40	40.2	40.4	40.8	40.8	40.8	0.25
15	40	39.8	39.8	39.8	39.8	39.8	39.8	40.8	0.2
16	41	39.8	40.2	40.2	40	39.8	40	40	0.25
17	41.8	40.4	40.4	40.8	41	41.2	41.2	40.8	0.25
18	40.4	40.6	40.6	41	41.2	41.2	40.8	41	0.2
19	42.2	40	40	39.6	39.6	40	40	40.2	0.3
20	42.6	40.2	40	40.4	40.6	40.8	40.8	40.8	0.2
21	40.8	40	40	40.4	40.8	41	40.8	42	0.25
22	40.8	41.6	41.6	42	42.2	42.2	42.2	39.8	0.25
23	39.8	41.6	41.6	42	42.4	42.6	42.4	40.6	0.3
24	40.6	40.4	40.2	40.6	40.6	40.8	40.8	39.8	0.3
25	40.8	40.8	40.8	40.8	40.8	40.8	41	40.6	0.2
26	39.8	39.8	39.6	39.8	39.8	39.8	39.8	41.8	0.25
27	39.4	39.4	39.4	39.4	39.6	40	40	40.2	0.3
28	38	40.6	40.8	40.6	40.8	41.2	41.4	39.8	0.35
29	40	41.8	41.8	41.8	41.8	42	42.4	40.2	0.35

Prelucrarea lotului de piese a fost monitorizată utilizând sistemul descris în capitolul 4 al cestei lucrări. Înainte de prelucrarea pieselor, sistemul de măsură "on machine" a fost sincronizat, folosind următorii pași:

1. In universal a fost introdusă o piesă similară cu piesele ce alcătuiesc lotul de piese. S-a stabilit originea programului astfel încât piesa rezultată în urma prelucrării să rezulte cu diametru de referință Dreg de 38 mm. Piesa a fost prelucrată în două treceri, utilizând un regim de prelucrare mai puțin intens ( $s=0,05$  mm/lot,  $t=0,3$ mm,  $n=800$  lot/min). Cota X corespunzătoare deplasării saniei longitudinale pentru care s-a obținut diametrul de Dreg, a fost reținută și impusă pentru prelucrarea lotului de piese. Pentru a lua în considerare jocul de întoarcere corespunzător axei X, pe ghidajele saniei longitudinale a fost montat un comparator digital care este monitorizat de sistemul integrat de măsurare „on machine”. Sistemul de monitorizare a fost setat astfel încât valoarea corespunzătoare comparatorului să fie egală cu 0.

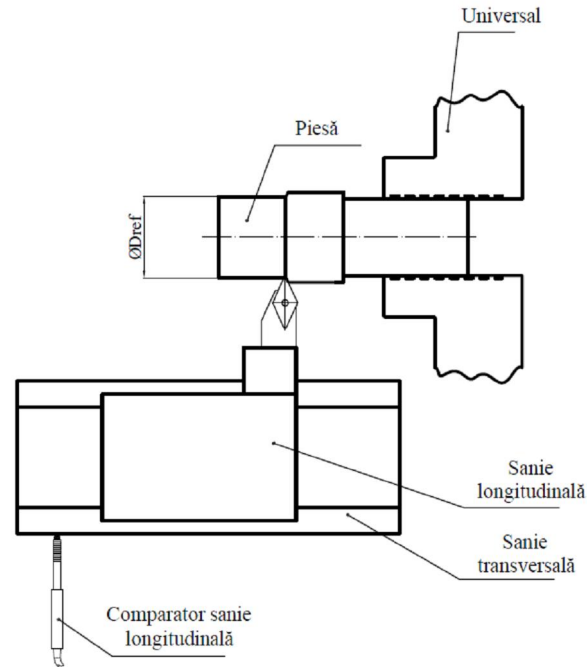


Fig. 0.3. Setarea sistemului de măsură al mașinii

2. Piesa prelucrată în primul pas a fost explorată utilizând sistemul de măsură “on machine”, cu cele două comparatoare montate pe un suport fixat pe unul din posturile capului revolver al strungului. În figura 0.4 se prezintă modalitatea în care s-a efectuat ciclul de măsurare. În urma explorării s-a obținut o bază de date în care au fost înregistrate valorile măsurate de comparator pe toată suprafața piesei. Fiecare comparator a fost setat la valoarea zero care a fost determinată pentru a corespunde valorii medii înregistrate de fiecare comparator pe parcursul prelucrării.

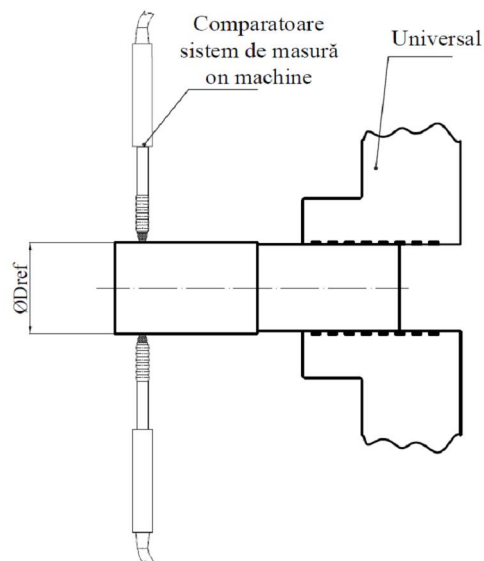


Fig. 0.4. Setarea sistemului de măsură „on machine”

3. Înainte de prelucrarea fiecărei piese, s-a măsurat fiecare semifabricat utilizând sistemul de măsură “on machine”, determinându-se punctual mărimea adaosului de prelucrare. Piesele au fost măsurate în timp ce arborele principal a fost rotit cu o turație redusă de 60 de rotații pe minut, iar comparatoarele au fost deplasate pe direcția generatoarei pieselor cu o viteză corespunzătoare avansului folosit la prelucrare.
4. Fiecare piesă a fost prelucrată menținând aceeași turație pentru arborele principal, turație de 800 de rotații pe minut. Pentru avans au fost folosite patru valori 0,2mm/rot; 0,25mm/rot; 0,3mm/rot; 0,35mm/rot. Datorită modului de fixare al pieselor în universal, axa arborelui principal nu a fost identică cu axa pieselor și, de aceea, adâncimea de așchiere a variat și în funcție de poziția axei de rotație C corespunzătoare rotației arborelui principal. Pentru a corela sistemul de măsură al mașinii atât cu sistemul de măsurare „on machine”, cât și cu sistemul de achiziție de date Spider 8, pentru fiecare piesă la capătul acesteia, la 57 de mm față de suprafața frontală a piesei fost prelucrat un canal circular cu adâncimea de 1 mm așa cum este prezentat în figura 0.5.

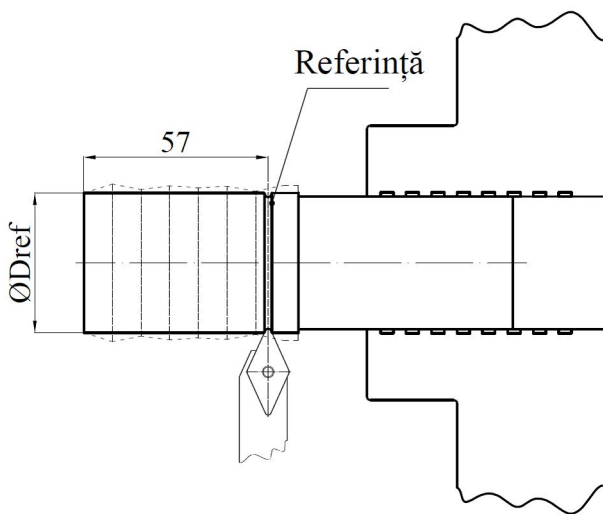


Fig. 0.5. Prelucrarea lotului de piese

5. Piesele prelucrate au fost măsurate în timp ce arborele principal a fost rotit cu o turație redusă de 60 de rotații pe minut, iar comparatoarele au fost deplasate pe direcția generatoarei pieselor cu o viteză corespunzătoare avansului folosit la prelucrarea piesei. În timpul deplasării comparatoarelor, s-a detectat poziția canalului circular. Această poziție a fost folosită pentru sincronizarea sistemelor de măsură.



6. În urma prelucrării pieselor s-a obținut o bază de date a cărei structură este prezentată în tabelul 0.2. Datele aferente acestei baze de date au fost înregistrate cu o frecvență de eșantionare de 100Hz. De la sistemul de măsură Spider s-a obținut o bază de date la care înregistrările au fost eșantionate cu o frecvență de 9600 HZ . Structura bazei de date obținută de la sistemul de achiziție de date Spider este prezentată în tabelul 0.3.

Tabelul 0.2.Structura bazei de date obținută prin monitorizarea sistemului de măsură al mașinii

Nr	Cod	Semnificație
1	Index	Valoare incrementată la fiecare 10 ms. Este supervizată de software-ul de monitorizare pentru a determina locația înregistrării în baza de date.
2	Cuplu C	Valoarea momentului debitat de motorul arborelui principal, exprimată procentual în raport cu cuplul nominal al motorului.
3	Putere C	Valoarea puterii instantanee absorbită de motorul arborelui principal, exprimată procentual în raport cu puterea nominală a motorului.
4	Consum C	Energie consumată de motorul arborelui principal exprimată în KWh.
5	Curent C	Valoarea curentului instantaneu absorbit de motorul arborelui principal. Exprimată în A.
6	Cuplu Z	Valoarea momentului debitat de motorul folosit pentru antrenarea lanțului cinematic de avans longitudinal, exprimată procentual în raport cu cuplul nominal al motorului.
7	Putere Z	Valoarea puterii instantanee absorbită de motorul folosit pentru antrenarea lanțului cinematic de avans longitudinal, exprimată procentual în raport cu puterea nominală a motorului.
8	Consum Z	Energie consumată de motorul folosit pentru antrenarea lanțului cinematic de avans longitudinal exprimată în KWh.
9	Curent Z	Valoarea curentului instantaneu absorbit de motorul folosit pentru antrenarea lanțului cinematic de avans longitudinal. Exprimată în A.
10	Cuplu X	Valoarea momentului debitat de motorul folosit pentru antrenarea lanțului cinematic de avans transversal, exprimată procentual în raport cu cuplul nominal al motorului.
11	Putere X	Valoarea puterii instantanee absorbită de motorul folosit pentru antrenarea lanțului cinematic de avans transversal, exprimată procentual în raport cu puterea nominală a motorului.
12	Consum X	Energie consumată de motorul folosit pentru antrenarea lanțului cinematic de avans transversal exprimată în KWh.
13	Curent X	Valoarea curentului instantaneu absorbit de motorul folosit pentru antrenarea lanțului cinematic de avans transversal. Exprimată în A.
14	Comparator 1	Valoarea deviației dimensionale măsurată cu ajutorul comparatorului aflat în partea inferioară a suportului.
15	Comparator 2	Valoarea deviației dimensionale măsurată cu ajutorul comparatorului aflat în partea superioară a suportului.
16	Comparator 3	Valoarea furnizată de comparatorul care determină poziția transversală a sanie strungului.
17	Unghi C	Poziția curentă a axei C, corespunzătoare arborelui principal, exprimată în minute.

18	Cota Z	Poziția curentă a axei Z, corespunzătoare axei longitudinale, exprimată în micrometri.
19	Cota X	Poziția curentă a axei X, corespunzătoare axei transversale, exprimată în micrometri.

Tabelul 0.3. Structura bazei de date obținută prin monitorizarea sistemului de achiziție de date Spider

Nr. Crt.	Cod	Semnificație
1	Timp	Momentul la care s-a realizat măsurătoarea în raport cu momentul începerii achiziției de date
2	Cota C	Poziția curentă a axei C, corespunzătoare arborelui principal, exprimată în rotații.
3	Cota Z	Poziția curentă a axei Z, corespunzătoare axei longitudinale, exprimată în micrometri.
4	Forța 1	Mărimea măsurată de prima semipunte tensometrică. Exprimată în N.
5	Forța 2	Mărimea măsurată de a doua semipunte tensometrică. Exprimată în N.
6	Accelerometru	Mărimea tensiunii furnizată de accelerometru. Exprimată în milivolti.

În figura 0.6 se prezintă diagrama de variație a mărimii înregistrate de comparatorul 1 în timpul ciclului de măsurare ce a precedat operația de prelucrare. Se observă faptul că mărimea înregistrată variază în limite largi. În figură se observă două tipuri de variație:

- o componentă care variază lent în raport cu timpul, componentă a cărei profil se aseamănă cu profilul generatoarei semifabricatului. Această componentă corespunde intervalului de timp de la 25 la 300 de secunde în diagramă. Pentru primele 25 de secunde se observă faptul că profilul componentei lent variabile are forma unui arc de cerc. Acest lucru se datorează faptului că în timpul deplasării comparatoarelor pe piesă, avansul axei Z a fost egal cu zero, doar axa transversală deplasându-se. Astfel comparatorul a înregistrat datele care corespund formei circulare a piesei.
- o componentă care variază rapid în timp. Această componentă corespunde deviațiilor în jurul componentei cu variație lentă în timp.

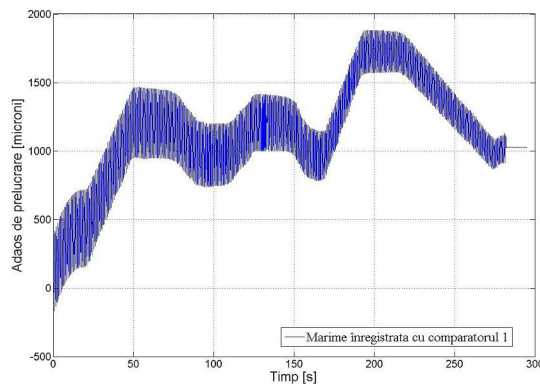


Fig. 0.6. Variația adaosului de prelucrare pentru o piesă a lotului

În figura 0.7 se prezintă modul în care variază suma indicațiilor celor două comparatoare, înregistrată în timpul operației de măsurare. Se remarcă lipsa componentei variabile rapid în timp. Pe parcursul intervalului temporal 0-25 de secunde, interval pentru care punctele în care realizează contactul piesei cu comparatoarele nu sunt diametral opuse, se observă totuși o componentă care variază rapid în timp. Componenta lent variabilă în timp are însă același mod de variație, care corespunde variației adaosului în lungul piesei. Cunoșcând valoarea la care aceste comparatoare au fost setate la 0, se poate determina variația de diametru a semifabricatului, prin efectuarea ciclului de măsurare inițial.

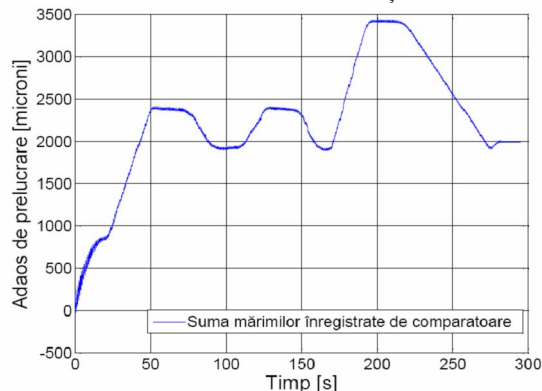


Fig. 0.7. Adâncimea de așchiere măsurată pe diametru care corespunde sumei indicațiilor celor două comparatoare ale sistemului palpator

Diferența dintre mărimea celor două comparatoare, înregistrată pe parcursul ciclului de măsurare al unui piese din lot, este prezentată în figura 0.8.a. Din figură se remarcă lipsa componentei lent variabile în timp și prezența doar a unei componente a cărei variație este rapidă. De asemenea, se observă faptul că, în general, amplitudinea componentei prezentată în figură are o evoluție monotonă descrescătoare.

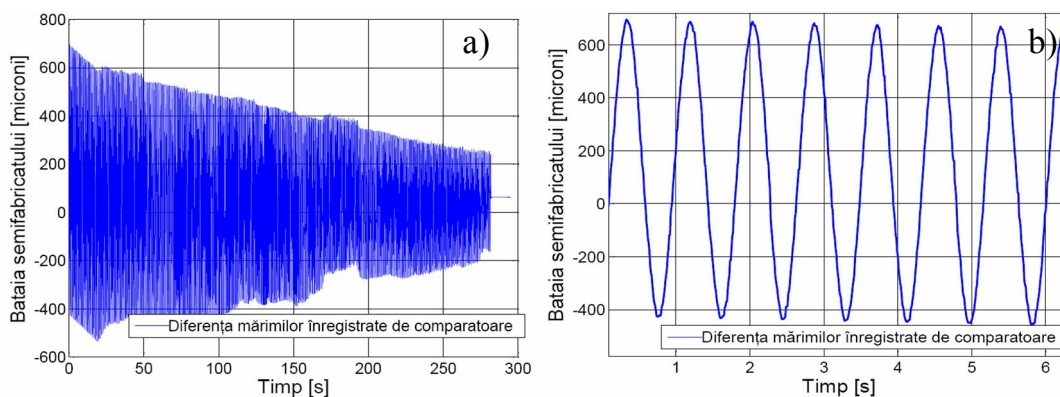


Fig. 0.8. Diferența dintre indicațiile comparatoarelor

În figura 0.8.b. se prezintă variația diferenței dintre valorile înregistrate pentru cele două comparatoare în raport cu timpul, însă, pentru un interval mai redus ca durată. Din figură se observă faptul că variația diferenței mărimilor este armonică.

Mai mult, din analiza graficului se poate determina frecvența semnalului armonic care este egală cu circa 1Hz, adică 1 oscilație pe secundă. Se observă că această frecvență corespunde turației de 60 de rotații pe minut, pe care arborele principal a avut-o în timpul ciclului de măsurare. În urma acestor observații putem deduce faptul că această componentă cu variație rapidă este datorată unui fenomen de bătaie a piesei. Acest fenomen nu este datorat doar prezenței unei excentricități din fixare a piesei, deoarece, în acest caz, bătaia măsurată de comparator ar fi fost constantă. Variația bătaiei este liniară și se datorează faptului că axa semifabricatului și axa arborelui principal sunt disjuncte în spațiu.

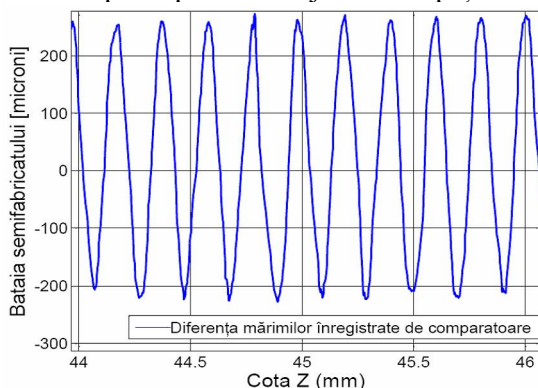


Fig. 0.9. Bătaia semifabricatului (detaliu)

În figura 0.9. se prezintă în detaliu variația diferenței dintre mărimile înregistrate de cele două comparatoare în raport cu variația coordonatei axei Z. Din analiza figurii se remarcă faptul că pe o distanță de 2 mm există circa 10 oscilații, numărul acesta fiind corespunzător mării avansului care pentru măsurarea acestei piese a fost de 0,2 mm/rot.

După realizarea ciclului de măsurare al semifabricatului se execută ciclul de prelucrare. În cadrul ciclului de prelucrare se înregistrează evoluția mai multor variabile. Astfel, se monitorizează informațiile referitoare la motoarele axelor de deplasare și la motorul arborelui principal. Se înregistrează variația cuplului și puterii debitate de fiecare dintre aceste motoare. De asemenea, se monitorizează variația curentului și energiei absorbite de motoare.

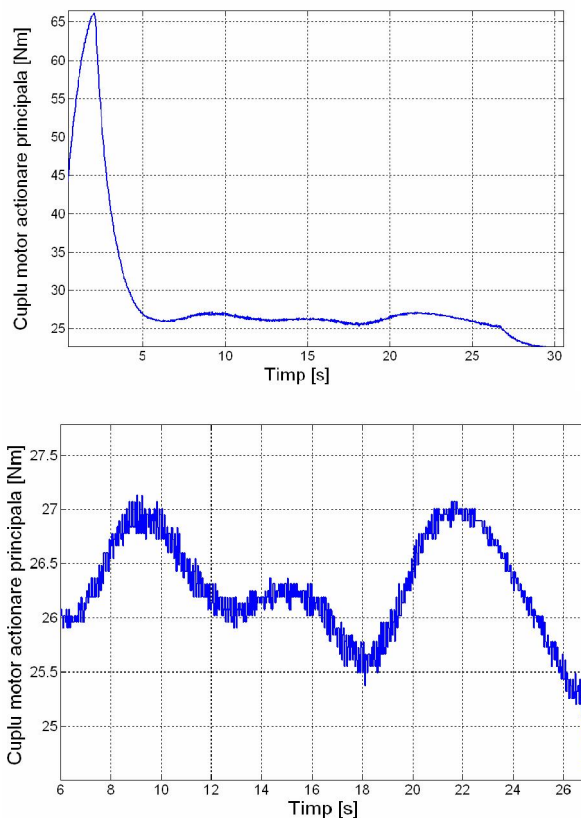


Fig. 0.10. Cuplul dezvoltat de motorul arborelui principal

În figura 0.10. se prezintă evoluția cuplului dezvoltat de motorul arborelui principal. Astfel, se observă că în primele 5 secunde prezentate în grafic, cuplul dezvoltat de motor are o variație importantă. În momentul premergător al ciclului de prelucrare toate motoarele mașinii erau oprite. Variația de cuplu este datorată momentului de inerție ridicat al lanțului cinematic al arborelui principal. După pornire cuplul dezvoltat de motor scade. Din analiza figurii se observă faptul că acesta are o evoluție a cărei alură este asemănătoare cu cea a adaosului de prelucrare. Mai mult, se poate remarca prezența a două componente: o componentă lent variabilă în timp și o componentă cu variație rapidă. Datorită rezoluției mărimii înregistrate a cuplului care este de 0,058 Nm și a faptului că lanțul cinematic al acționării principale este caracterizat de elemente cu momente inerțiale ridicate, componenta rapid variabilă în timp nu are o evoluție armonică în cazul acestei mărimi. În partea dreaptă a figurii se prezintă variația cuplului fără a se evidenția variația acestuia datorată de regimul tranzitoriu corespunzător pornirii motorului acționării principale.

În figurile 0.11. și 0.12 se prezintă variația puterii și a curentului absorbit de motorul acționării principale. Se observă faptul că aceste grafice prezintă o variație asemănătoare variației cuplului dezvoltat de motorul acționării principale. În primele 5 secunde se remarcă prezența regimului tranzitoriu datorat pornirii motorului. De asemenea, se observă faptul că aceste mărimi depind de mărimea adaosului. Se observă că în cazul puterii, variația mărimii măsurate în cadrul ciclului de prelucrare, nu e importantă Rezoluția semnalului înregistrat în cazul puterii afectează calitatea acestui semnal.

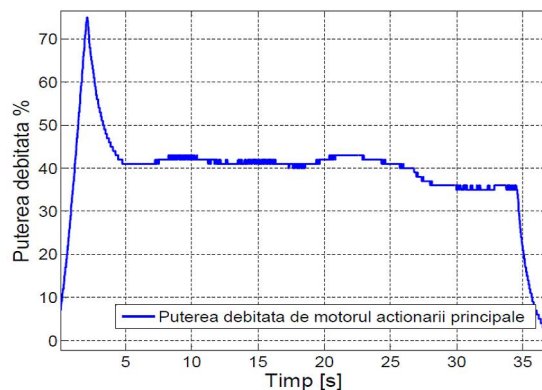


Fig. 0.11. Puterea dezvoltată de motorul arborelui principal

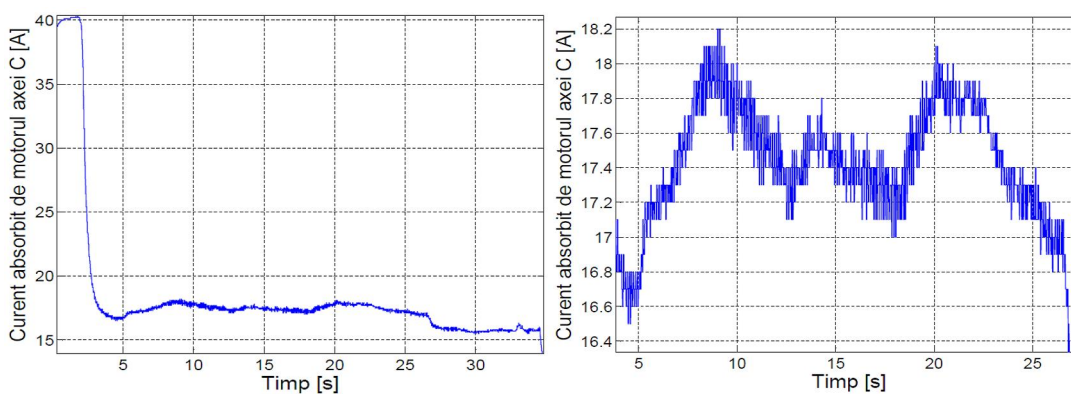


Fig. 0.12. Curentul absorbit de motorul arborelui principal

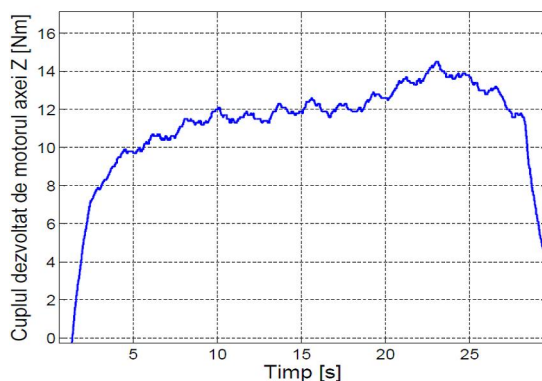


Fig. 0.13. Cuplul dezvoltat de motorul axei Z

Celelalte mărimi înregistrate nu au avut o evoluție importantă. În figura 0.13. se prezintă variația cuplului dezvoltat de motorul axei Z. Se observă că variația cuplului nu corespunde cu variația adaosului de prelucrare.

În timpul ciclului de prelucrare s-a înregistrat de asemenea variația forței de așchiere folosind sistemul de achiziție de date Spider 8. În partea stângă a figurii 0.14. se prezintă evoluția componentei principale a forței de așchiere pe parcursul ciclului de așchiere. Se observă faptul că evoluția componentei principale a forței de așchiere este asemănătoare evoluției adâncimii de așchiere. În figură se evidențiază intervalul de timp în care s-a efectuat operația

de strunjire longitudinală (5-27s). Variația forței care apare după secunda 30 este datorată prelucrării canalului circular prevăzut pentru corelarea sistemelor de măsură.

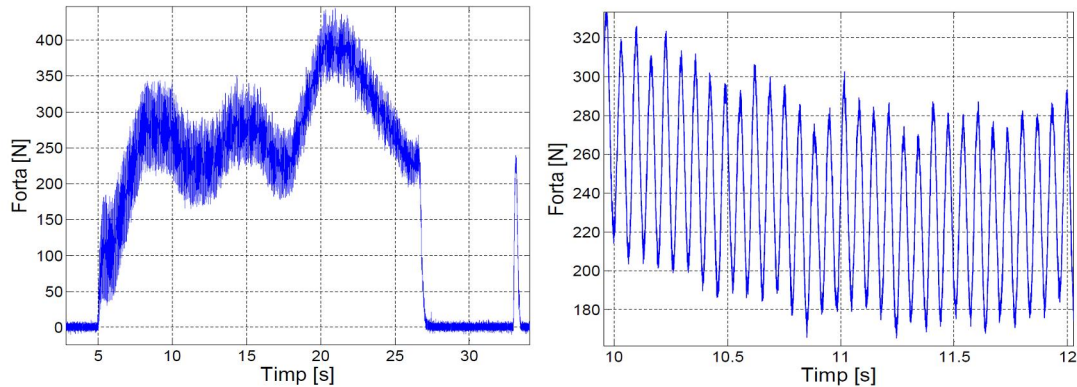


Fig. 0.14. Evoluția componentei principale a forței de așchiere

În partea dreaptă a figurii 0.14. se prezintă un detaliu în care se evidențiază componenta cu evoluție rapidă a forței de așchiere. Se observă faptul că această componentă este armonică, iar frecvența acesteia este de 15Hz, frecvență care corespunde turației arborelui principal care a fost de 800 de rotații pe minut.

În figura 0.15. se prezintă evoluția celor două componente ale forței de așchiere pentru piese prelucrate cu diverse avansuri. Forma pieselor nu a fost aceeași. Se observă totuși o creștere a forței de așchiere cu avansul. Mai mult, din figură se observă faptul că raportul dintre cele două componente ale forței de așchiere este oarecum constant cu toate că s-a modificat atât mărimea adâncimii de așchiere, cât și mărimea avansului. Acest lucru s-a determinat, de asemenea, și prin procesarea datelor mediind cele două componente ale forței și apoi realizând raportul dintre acestea. S-a determinat faptul că, pentru toate piesele, raportul dintre aceste forțe a fost în toate cazurile aproximativ 3.



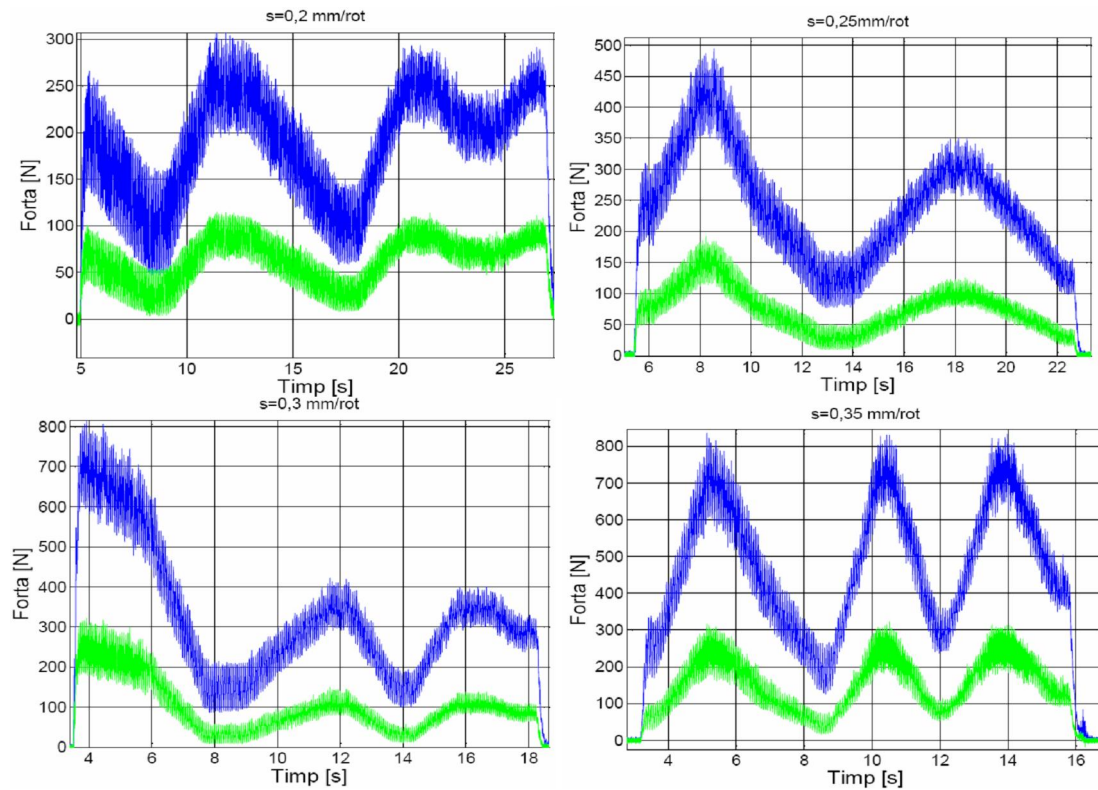


Fig. 0.15. Evoluția componentelor forței de așchiere pentru diverse avansuri

Mărimea de ieșire a accelerometrului amplasat pe sculă a fost, de asemenea monitorizată, evoluția acesteia pe parcursul întregului ciclu de prelucrare fiind prezentată în figura 0.16.a. În figura 0.16.b se prezintă evoluția mărimii furnizate de accelerometru pentru aceeași fereastră pentru care a fost prezentată și evoluția forței. Se remarcă faptul că nu se mai poate sesiza componenta a cărei variație este datorată erorilor de fixare a semifabricatului. Pentru a determina frecvențele care apar în acest semnal este necesară efectuarea unei analize spectrale folosind transformarea FFT. În sfârșit, în figura 0.16.c se prezintă evoluția mărimii furnizate de accelerometru pentru un interval de timp de 20ms



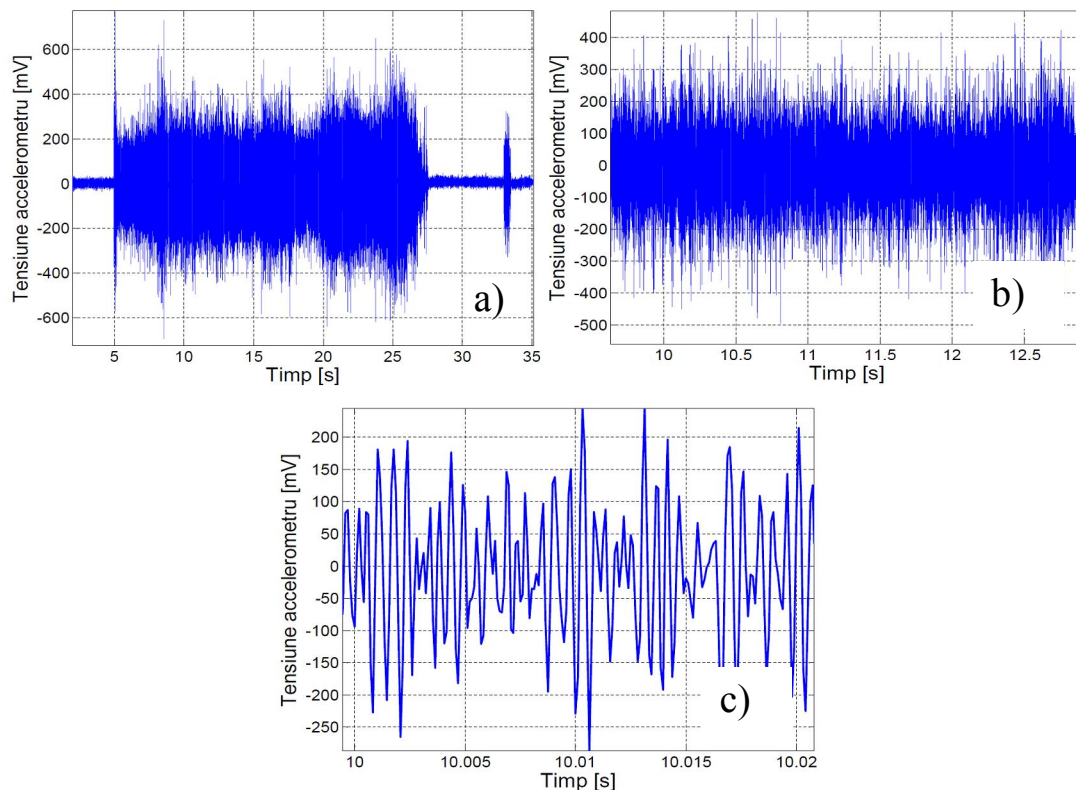


Fig. 0.16. Evoluția mărimii înregistrate de accelerometru

După prelucrarea piesei s-a repetat ciclul de măsurare pentru a se realiza inspecția finală a piesei. Cele două comparatoare ale sistemului de măsură pe mașină sunt deplasate în lungul generatoarei piesei.

În figura 0.17.a se prezintă evoluția pe parcursul ciclului de măsurare a valorilor înregistrate de la unul dintre comparatoare. Piesa măsurată corespunde semifabricatului pentru care s-au prezentat grafice de variație a mărimilor înregistrate pe parcursul ciclului de măsurare inițială precum și a ciclului de prelucrare. Se observă că evoluția acestor valori este oarecum similară cu cea pe care a avut-o adâncimea de așchiere. În prima parte a graficului se observă o variație mai importantă datorată modului în care comparatoarele au fost poziționate pe suprafața piesei. În intervalul de timp corespunzător ultimelor secunde ale ciclului de măsurare se observă o variație a graficului datorată întâlnirii canalului circular care a fost prelucrat anterior pentru a sincroniza sistemul de coordonata al piesei corespunzător ciclului de măsurare cu sistemul de coordonate al piesei corespunzător ciclului de măsurare.

În figura 0.17.b se prezintă același lucru ca și în figura 0.17.a, însă fără a evidenția intervalul în care comparatorul a fost poziționat pe suprafața piesei. Se observă că variația deviației dimensionale este destul de importantă depășind 40 de micrometri.

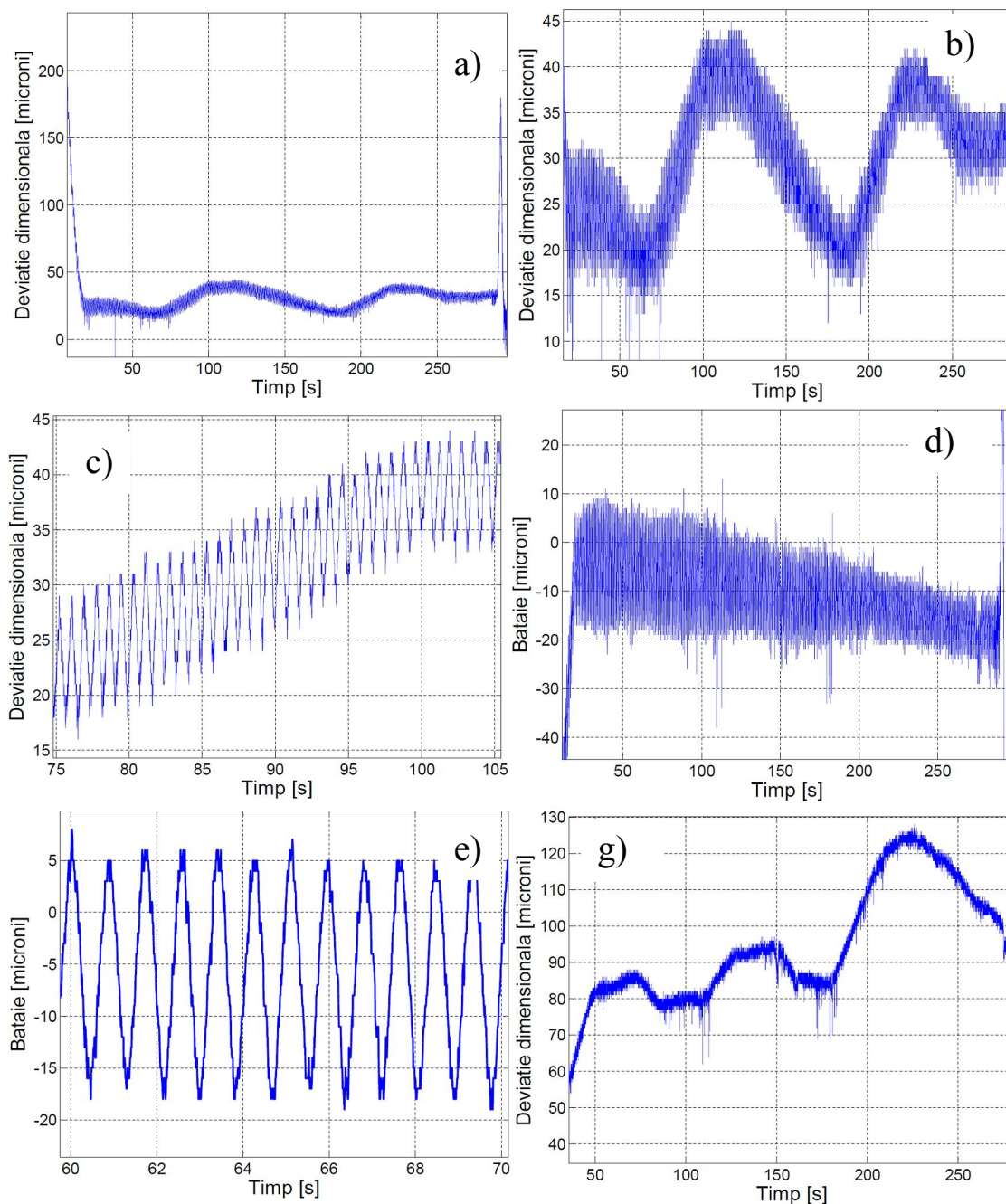


Fig. 0.17. Măsurarea piesei folosind sistemul de măsură „on machine”

În figura 0.17.c se prezintă evoluția deviației dimensionale punctuale pe un interval redus de timp. În figură se observă același fenomen datorat excentricității ca și în cazul în care s-a analizat variația adaosului de prelucrare.

Diferența dintre mărimile furnizate de cele două comparatoare este prezentată în figura 0.17.d. Se observă faptul că variația bătăii este asemănătoare celei a adaosului de prelucrare. Putem trage concluzia că erorile de fixare ale semifabricatului s-au transferat asupra piesei finite. În urma prelucrării a rezultat o piesă a cărei axă de rotație este diferită de axa de rotație a arborelui principal, axele fiind disjuncte.

Diferența dintre măsurimile furnizate de cele două comparatoare este prezentată, de asemenea, și în figura 0.17.e, în care variația bătăii se expune pentru un interval de timp redus. În final am prezentat deviația dimensională pe diametru în figura 0.17.d. Se observă că această deviație este importantă. Cu toate că sania transversală a mașinii a fost poziționată pe axa X cu o eroare de circa 5 micrometri, eroarea de proces a înregistrat o valoare maximă de peste 120 micrometri. Piesa a fost prelucrată folosind un regim de așchiere nu foarte intens, în sensul că, avansul a fost de 0,2 mm/rot. Un alt element pe care îl putem remarca în diagramele prezentate în figură este apariția unor salturi în evoluția variabilelor înregistrate. Aceste salturi sunt datorate neregularităților de pe suprafeței piesă care au „agățat” comparatoarele.

## Determinarea relațiilor cauzale cu algoritmi RRelief și Corelation Feature Subset Evaluation

În vederea determinării relațiilor cauzale, s-au utilizat algoritmi de selectare a atributelor descriși în capitolul 3. Astfel, folosind algoritmul Corelation Feature Subset Evaluation s-au determinat grupări de atribute care să nu fie corelate între ele, dar să influențeze variabila deviație dimensională. Algoritmul Corelation Feature Subset Evaluation a fost rulat de sub pachetul software Weka [Witten2005], care este un software specializat în machine learning. Algoritmul a fost rulat pentru identificarea relațiilor cauzale în cazul fiecărei piese, pentru antrenare luându-se considerare toate piesele prelucrate până la momentul prelucrării exemplarului curent. Având în vedere faptul că numărul de atribute pe care l-am luat în considerare nu este foarte ridicat, s-a preferat o metodă de căutare exhaustivă a perechii de atribute care să modeleze interdependența dintre variabile.

În mod frecvent algoritmul a identificat relații cauzale din care au făcut parte următoarele atribute:

- mărimea adaosului de prelucrare,
- valoarea componentei principale a forței principale,
- coordonata curentă a axei Z,
- coordonata curentă a axei C.

Deseori algoritmul a selectat atribute care nu sunt considerate de noi atât de relevante cum ar fi: valoarea cuplului dezvoltat de motorul axei Z, valoarea puterii debitate de motorul acționării principale.

*Tabelul 0.4. Valoarea medie a meritului calculat pentru fiecare variabilă utilizând algoritmul algoritmul Rrelief*

Variabila	Merit	Procent merit %
Componenta principală a forței $F_1$	0,011588	21,63919
Adâncimea de așchiere A	0,011027	20,59159
Componenta forței corespunzătoare avansului $F_2$	0,010861	20,2816
Cota Z	0,007227	13,49555
Cota C	0,005482	10,23697
Suma adaosului de prelucrare	0,002413	4,505985
Cuplul dezvoltat motorul axei Z	0,002266	4,23148
Cuplul dezvoltat de motorul arborelui principal	0,001676	3,129727
Puterea dezvoltata de motorul arborului principal	0,000578	1,079345

Curent absorbit de motorul arborelui principal	0,000433	0,808575
--	----------	----------

Algoritmul Relief a dat rezultate mai bune în sensul că, în general, acesta a identificat corect importanța atributelor, însă nu a exclus atributele interdependente. Dezavantajul utilizării algoritmului Relief este legat de timpul mare de execuție, mai ales atunci când baza de date pe care acesta este antrenat este foarte mare. Am antrenat algoritmul RRelief folosind doar datele corespunzătoare piesei precedente. În tabelul 0.4 se prezintă valoarea medie a meritului calculat pentru fiecare variabilă. Am antrenat algoritmul folosind doar atributele prezentate în tabel. O serie de atribute au fost măsurate direct, altele, au fost construite de baza unor atribute măsurate. Astfel, s-a construit un atribut prin care se evaluează suma mărimii adaosului de prelucrare, atribut care am dorit să modeleze erorile datorate încălzirii sculei și piesei în timpul procesului de așchiere. Cele mai influente mărimi determinate de algoritmul Rrelief au fost componentele forței de așchiere precum și adaosul de prelucrare. De asemenea, algoritmul a identificat ca influente și coordonatele axelor Z și C. Totuși, hiba algoritmului Rrelief este aceea că nu exclude atributele care sunt interdependente. Pentru determinarea atributelor interdependente putem folosi matricea de corelație (vezi tabelul 0.5) sau chiar algoritmul Corelation Feature Subset Evaluation, însă excluzând atributele care, conform algoritmului Rrelief, au obținut un scor scăzut. Astfel, din tabelul 0.4 putem concluziona faptul că, suma procentului pentru componentele irelevante este în cazul nostru de 15%.

Tabelul 0.5. Matricea de corelație a atributelor

	C	Z	Adâncime	F1	F2	Deviație	Suma adâncime	Cuplu arbore	Curent arbore	Putere arbore	Cuplu axa Z
C	1	0,026	0,077	0,100	0,088	0,059	0,999	0,035	-0,03	-0,03	-0,03
Z	0,026	1	-0,58	-0,58	-0,58	-0,675	0,040	0,148	-0,03	-0,02	-0,16
Adâncime	0,077	-0,58	1	0,994	0,992	0,982	0,064	0,466	0,041	0,035	0,126
F1	0,100	-0,57	0,994	1	0,999	0,982	0,088	0,437	0,039	0,033	0,124
F2	0,088	-0,57	0,992	0,999	1	0,980	0,076	0,428	0,041	0,036	0,125
Deviație	0,059	-0,67	0,982	0,982	0,980	1	0,046	0,383	0,044	0,038	0,142
Suma adâncime	0,999	0,040	0,064	0,088	0,076	0,046	1	0,036	-0,030	-0,030	-0,033
Cuplu arbore	0,035	0,148	0,466	0,437	0,428	0,383	0,036	1	0,034	0,020	0,021
Curent arbore	-0,03	-0,03	0,041	0,039	0,041	0,044	-0,030	0,034	1	0,999	0,988
Putere arbore	-0,03	-0,02	0,035	0,033	0,036	0,038	-0,030	0,020	0,999	1	0,987
Cuplu axa Z	-0,03	-0,16	0,126	0,124	0,125	0,142	-0,033	0,021	0,988	0,987	1

## Control bazat pe modelare analitică

În vederea modelării deviației dimensionale am utilizat modele liniare obținute prin regresie. Aceste modele prezintă avantajul faptului ca sunt foarte simple, ușor de obținut, potrivite pentru modelarea deviațiilor dimensionale datorate deviațiilor elastice ale sistemelor tehnologice. Dezavantajul acestor modele este dat de faptul că au performanțe scăzute în ceea ce privește modelarea fenomenelor neliniare. După cum se observă totuși în tabelul 0.5, deviația dimensională este foarte corelată cu mărimea adâncimii de așchiere și cu forța de așchiere. Având în vedere aceste considerente considerăm că modelele liniare sunt potrivite pentru modelarea deviațiilor dimensionale. În tabelul 0.6 se prezintă rezultatele obținute prin modelare liniară. S-a modelat dependența deviației dimensionale în funcție de adâncimea de așchiere. Modelul liniar a fost determinat prin regresie, luând în considerare doar datele corespunzătoare piesei anterioare. S-au considerat datele corespunzătoare pieselor prelucrate cu avansul de 0,2 mm/rot. Pe prima linie a tabelului se evidențiază piesele pe care s-au construit modelele liniare. Pe linia a doua se specifică valoarea medie a erorii deviației dimensionale corespunzătoare piesei pe care s-a construit modelul. Pe linia trei se prezintă abaterea medie pătratică a deviației dimensionale pentru piesa pe care s-a construit modelul. Modelul liniar obținut este evaluat folosind liniile trei și patru, linii pe care se prezintă media și abaterea erorii de modelare. Pentru fiecare valoare a adâncimii de așchiere se calculează deviația dimensională folosind modelul. Astfel, media erorii de modelare reprezintă media diferenței dintre valoarea prognozată a deviației dimensionale și valoarea măsurată. Se observă că pentru toate piesele media erorii de modelare este 0. Acest lucru este datorat faptului că termenul liber al modelului liniar este egal cu media deviațiilor dimensionale. Pe linia a cincea se prezintă piesa pe care s-a aplicat modelul liniar. Liniile șase și șapte au aceeași semnificație cu liniile doi și trei, cu specificația că aceste linii se referă la piesa pe care se aplică modelul. Pe liniile opt și nouă se prezintă media erorii de prognoză a deviației dimensionale, respectiv abaterea medie pătratică a aceleași erori. Pe linia zece se prezintă îmbunătățirea acurateței ca fiind egală cu raportul dintre media deviației dimensionale care apare dacă nu se aplică corecții și media deviației dimensionale apărute în cazul în care se corectează deviația dimensională folosind modelul liniar obținut cu datele piesei precedente. Pe următoarea linie se prezintă îmbunătățirea preciziei care este definită ca raportul dintre abaterea medie pătratică corespunzătoare deviației dimensionale ce apare dacă nu se aplică corecții și abaterea medie pătratică corespunzătoare deviației dimensionale apărute în cazul în care se corectează deviația dimensională folosind modelul liniar obținut cu datele piesei precedente. Eroarea maximă reprezintă maximumul deviației dimensionale care se calculează pe baza mediei deviației  $\bar{d}$  și pe baza abaterii medii pătratice  $\sigma$  a deviației dimensionale cu relația:

$$E_{\max} = |\bar{d}| + 3 \cdot \sigma$$

Pe ultima linie se prezintă rata de reducere a erori care reprezintă raportul dintre eroarea maximă apărută în cazul în care nu s-ar fi aplicat corecții și eroarea maximă apărută în situația în care eroarea ar fi fost corectată.

Din analiza datelor din tabel se observă în situația în care nu s-ar fi corectat deviația dimensională, valoarea medie a erorii ar fi fost cuprinsă între 29 și 73 de microni. Prin modelarea erorii, valoarea medie a erorii s-a redus, fiind cuprinsă între -21 și 15 microni. De asemenea, abaterea medie pătratică fără corecții a fost cuprinsă în intervalul 4,53 și 12,34. Prin corecție, abaterea medie pătratică a erorii s-a redus, fiind cuprinsă în intervalul 1,51 și 4,45. Se constată o reducere a erorii de la 3 la 6,72 ori. În figura 0.18, se prezintă în formă grafică, rezultatele modelării erorilor de proces folosind un model analitic de tipul  $e=f(z,c,A)$ .

În figura se evidențiază, de asemenea și mărimea erorilor datorate fixării care reprezintă bătaia față de suprafața de referință.

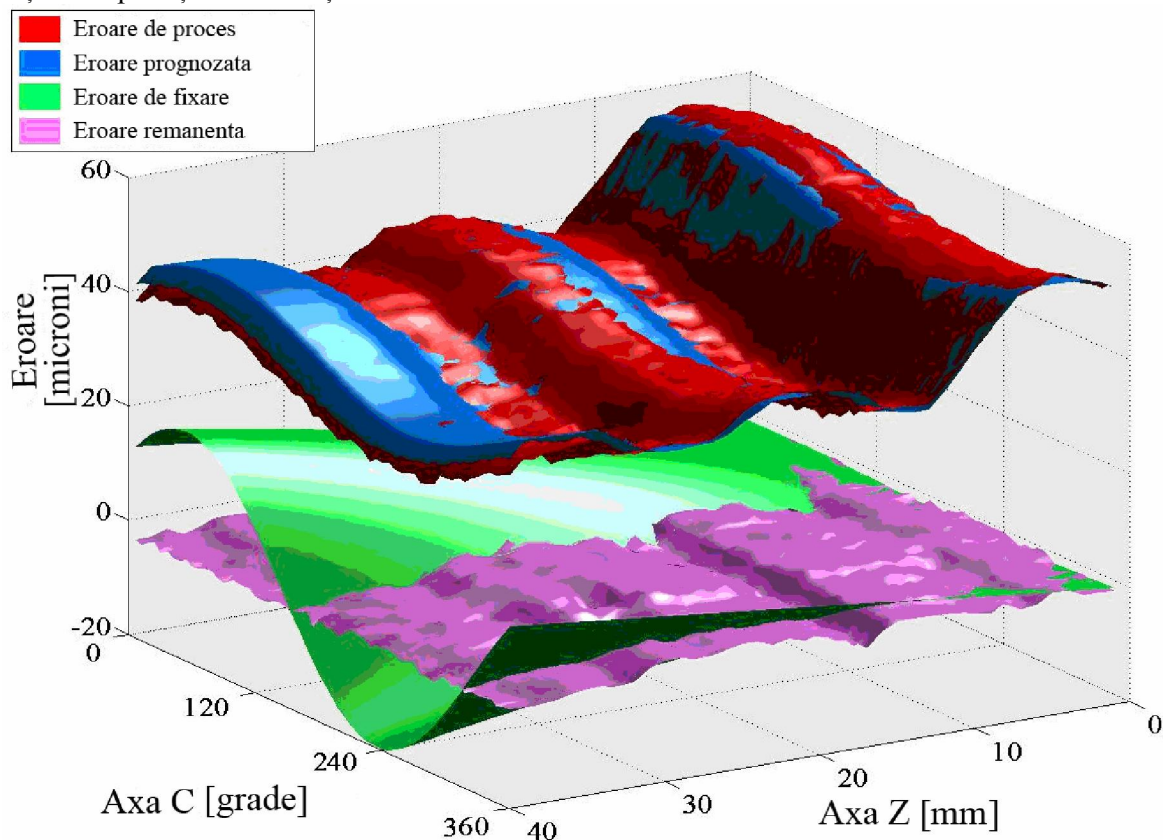


Fig. 0.18. Prognoza erorilor de proces

Tabelul 0.6. Rezultate obținute în urma aplicării unui model liniar care are drept parametru adâncimea de așchiere. Avansul cu care au fost prelucrate piesele 0,2mm/rot

Piesa	1	2	5	9	13	15	18	20
Deviație medie fără corecție	41.73	29.87	39.80	56.46	62.82	62.08	69.15	72.94
Abatere medie pătratică fără corecție	7.34	7.51	10.82	4.58	12.34	11.90	10.81	9.33
Media erorii de modelare	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Abatere medie pătratică a erorii de modelare	1.39	1.44	2.07	2.47	2.41	2.41	3.15	4.07
Piesa pe care s-a aplicat modelul	2	5	9	13	15	18	20	24
Deviație medie fără corecție	29.87	39.80	56.46	62.82	62.08	69.15	72.94	56.13
Abatere medie pătratică fără corecție	7.51	10.82	4.58	12.34	11.90	10.81	9.33	10.31
Deviație medie cu corecție	-3.28	8.31	-8.75	15.89	10.48	-4.96	7.86	-20.9
Abatere medie pătratică cu corecție	1.51	2.10	3.00	4.06	2.73	4.45	4.07	2.38
Îmbunătățire acuratețe	9.10	4.79	6.46	3.95	5.92	13.93	9.28	2.68

Îmbunătățire precizie	4.98	5.16	1.53	3.04	4.36	2.43	2.30	4.33
Eroare maximă fără corecție	52.41	72.25	70.22	99.84	97.79	101.58	100.94	87.07
Eroare maximă cu corecție	7.80	14.60	17.74	28.05	18.67	18.30	20.06	28.07
Rată de reducere a erorii	6.72	4.95	3.96	3.56	5.24	5.55	5.03	3.10

Folosind o procedură de căutare exhaustivă s-au testat mai multe tipuri de modele, folosind pentru regresie datele corespunzătoare:

- Ultimei piese;
- Ultimelor două piese;
- Ultimelor trei piese;

În tabelele 0.7., 0.8. și 0.9. se prezintă rezultatele acestor teste.

*Tabelul 0.7. Rezultate obținute în cazul utilizării unui model liniar antrenat cu datele corespunzătoare ultimei piese*

Structura modelului	$\varepsilon = f(A)$	$f(F_1)$	$f(z,c,A)$
Rata de reducere a erorii	3,51	3,09	3,31
Structura modelului	$\varepsilon = f(z,c,F_1)$	$\varepsilon = f(z,c,F_1,A)$	
Rata de reducere a erorii	2,78	3,26	

*Tabelul 0.8. Rezultate obținute în cazul utilizării unui model liniar antrenat cu datele corespunzătoare ultimelor 2 piese*

Structura modelului	$\varepsilon = f(A)$	$f(F_1)$	$f(z,c,A)$
Rata de reducere a erorii	3.58	2,98	3,54
Structura modelului	$\varepsilon = f(z,c,F_1)$	$\varepsilon = f(z,c,F_1,A)$	
Rata de reducere a erorii	2,90	3,45	

*Tabelul 0.9. Rezultate obținute în cazul utilizării unui model liniar antrenat cu datele corespunzătoare ultimelor 3 piese*

Structura modelului	$\varepsilon = f(A)$	$f(F_1)$	$f(z,c,A)$
Rata de reducere a erorii	3.59	2,84	3,58
Structura modelului	$\varepsilon = f(z,c,F_1)$	$\varepsilon = f(z,c,F_1,A)$	
Rata de reducere a erorii	2,80	3,06	



## Control bazat modele tip Support Vector Regression

Modelele de tip Support Vector Regression prezintă avantajul flexibilității în ceea ce privește modelarea unor relații care nu sunt liniare prin utilizarea unor funcții kernel de tip gaussian sau polinomial. Pentru modelarea deviațiilor dimensionale am folosit, în această lucrare, funcții kernel de tip gaussian. Dificultatea folosirii tehnicii SVR este legată de faptul că pentru a modela cu acuratețe o funcție este necesară introducerea unor parametri ai modelului care afectează drastic performanțele acestuia. Acești parametri sunt:

- Parametrul aplicației kernel  $\gamma$ ,
- Factorul de regularizare  $C$ ,
- Factorul de insensibilitate  $\varepsilon$ .

Pentru determinarea factorilor  $C$  și  $\varepsilon$  am folosit tehnica de evaluare a zgomotului descrisă în capitolul 3. Mai precis, am modelat dependența deviației dimensionale folosind algoritmul *knn* (*k* nearest neighbours), la care am selectat pentru parametrul *k*, o valoare mică și anume  $k=6$ .

Pentru determinarea parametrului aplicației kernel  $\gamma$  am utilizat o căutare exhaustivă, combinată cu un algoritm de validare încrucișată. Astfel, setul de date folosit pentru antrenarea algoritmului SVR a fost împărțit aleatoriu în 5 părți. Algoritmul a fost antrenat succesiv pe patru din aceste părți, iar apoi, s-au evaluat performanțele de modelare de partea rămasă. Valoarea parametrului aplicației kernel  $\gamma$ , a fost căutată inițial în următoarea mulțime  $\{2^2, 2^3, 2^4, 2^5, 2^6, 2^7, 2^8\}$ . În urma unei analize asupra performanțelor de modelare, am constatat că, selectarea unei valori mici pentru parametrul aplicației kernel  $\gamma$ , conduce la obținerea unei erori reduse de modelare pe setul de date folosit pentru antrenare, dar, apariția unor erori semnificative pe setul de date aferent piesei pentru care se dorește determinarea corecțiilor. Pentru modelarea SVR am folosit pachetul de software Spider [Spider2006] care reprezintă un mediu orientat pe obiecte ce implementează o serie de algoritmi *machine learning*.

În urma aplicării algoritmului, am constatat faptul că performanțele acestuia cresc, dacă se utilizează pentru modelare două piese. În tablele 0.11., 0.12 și 0.13. se prezintă datele sintetice rezultate în urma modelării relației dintre adâncimea de așchiere și deviația dimensională. Prin modelarea erorii folosind modele SVR s-au obținut în general rezultate mai slabe decât în cazul utilizării unor modele liniare. Acest lucru este explicabil datorită faptului că erorile de prelucrare sunt datorate în cazul analizat în special de deformația elastică a sistemului de prelucrare.

Tabelul 0.10. Rezultate obținute în urma aplicării unui model SVR care are drept parametru adâncimea de așchiere. Avansul cu care au fost prelucrate piesele 0,2mm/rot

Piesa pe care a fost construit modelul	1	2	5	9	13	15	18	20
Valoarea parametrului $C$	46.4	38.6	59	75.7	144.4	110.4	149.9	129.4
Valoarea parametrului $\varepsilon$	0.4	0.7	1.4	1.5	6.2	3.7	6.2	4.3
Valoarea parametrului kernel $\gamma$	8	16	8	8	128	8	128	32
Media erorii de modelare	-0.21	0.04	-0.17	-0.63	-0.26	-0.21	-0.61	-0.58
Abatere medie pătratică a erorii de modelare	1.28	1.24	1.77	2.37	2.27	1.96	2.76	3.90



Piesa pe care s-a aplicat modelul	2	5	9	13	15	18	20	24
Deviație medie fără corecție	29.87	39.80	56.46	62.82	62.08	69.15	72.94	56.13
Abatere medie pătratică fără corecție	7.51	10.82	4.58	12.34	11.90	10.81	9.33	10.31
Deviație medie cu corecție	-9.73	11.03	-8.55	7.73	10.70	-4.30	7.17	21.07
Abatere medie patratică cu corecție	8.85	8.52	3.97	13.22	3.21	5.93	4.52	3.08
Îmbunătățire acuratețe	-3.07	3.61	-6.61	8.13	5.80	-16.09	10.18	-2.66
Îmbunătățire precizie	0.85	1.27	1.15	0.93	3.71	1.82	2.06	3.35
Eroare maximă fără corecție	52.41	72.25	70.22	99.84	97.79	101.58	100.94	87.07
Eroare maximă cu corecție	36.27	36.59	20.46	47.39	20.32	22.10	20.73	30.31
Rată de reducere a erorii	1.44	1.97	3.43	2.11	4.81	4.60	4.87	2.87

Tabelul 0.11. Rezultate obținute în cazul utilizării unui model SVR antrenat cu datele corespunzătoare ultimei piese

Structura modelului	$\varepsilon = f(A)$	$f(F_1)$	$f(z, c, A)$
Rata de reducere a erorii	2,63	2,82	2,33
Structura modelului	$\varepsilon = f(z, c, F_1)$	$\varepsilon = f(z, c, F_1, A)$	
Rata de reducere a erorii	2,25	2,11	

Tabelul 0.12. Rezultate obținute în cazul utilizării unui model SVR antrenat cu datele corespunzătoare ultimelor 2 piese

Structura modelului	$\varepsilon = f(A)$	$f(F_1)$	$f(z, c, A)$
Rata de reducere a erorii	3.01	2,90	3,63
Structura modelului	$\varepsilon = f(z, c, F_1)$	$\varepsilon = f(z, c, F_1, A)$	
Rata de reducere a erorii	2,48	2,41	

Tabelul 0.13. Rezultate obținute în cazul utilizării unui model SVR antrenat cu datele corespunzătoare ultimelor 3 piese

Structura modelului	$\varepsilon = f(A)$	$f(F_1)$	$f(z, c, A)$
Rata de reducere a erorii	2,54	2,74	2,47
Structura modelului	$\varepsilon = f(z, c, F_1)$	$\varepsilon = f(z, c, F_1, A)$	
Rata de reducere a erorii	2,41	2,32	

## Control bazat pe modelare neuronală

În această lucrare, am modelat relația dintre deviația dimensională și celelalte variabile utilizând rețele neuronale la care numărul de neuroni aflați la stratul ascuns a fost fixat la 6. Funcția de transfer pentru neuronii de pe stratul ascuns a fost de tip tangențial sigmoid, iar pentru ceilalți neuroni s-a folosit o funcție de transfer de tip liniar. Datele de antrenare a algoritmului au fost divizate în trei părți astfel:

- 60% din date au fost folosite pentru antrenarea modelului,
- 10% din date au fost folosite pentru testarea performanțelor de modelare,
- 30% din date au fost folosite pentru validarea modelului.

Pentru antrenare a datelor s-a folosit algoritmul backpropagation. Pentru a nu supraantrena rețeaua neuronală algoritmul de antrenare a fost oprit atunci când eroarea de modelare pe setul de date de validare a fost minimă. Performanțele modelului au fost testate pe setul de date de test.

În tabelele 0.14., 0.15 și 0.17. se prezintă performanțele diferitelor structuri de modele pentru seturi de date alcătuite din una sau mai multe piese.

*Tabelul 0.14. Rezultate obținute în cazul utilizării unui model neuronal antrenat cu datele corespunzătoare ultimei piese*

Structura modelului	$\varepsilon = f(A)$	$f(F_1)$	$f(z,c,A)$
Rata de reducere a erorii	3,12	2,95	2,87
Structura modelului	$\varepsilon = f(z,c,F_1)$	$\varepsilon = f(z,c,F_1,A)$	
Rata de reducere a erorii	2,26	2,49	

*Tabelul 0.15. Rezultate obținute în cazul utilizării unui model neuronal antrenat cu datele corespunzătoare ultimelor două piese*

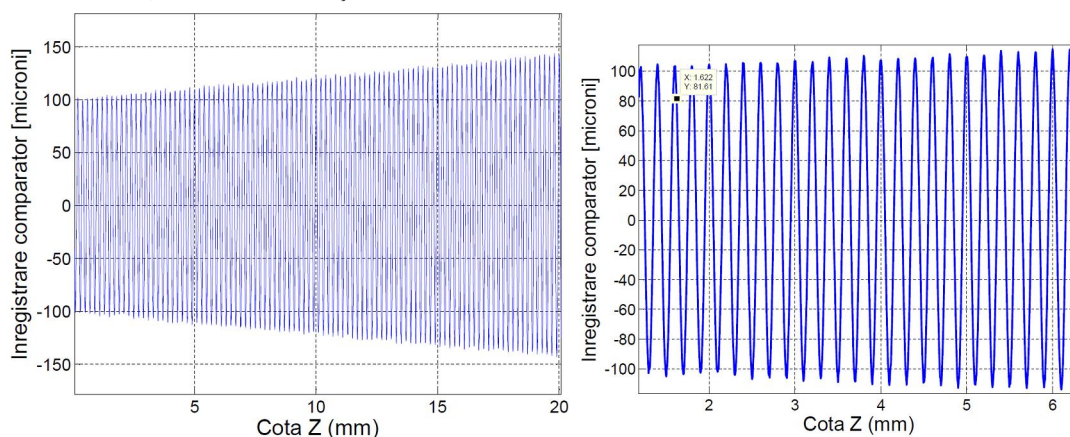
Structura modelului	$\varepsilon = f(A)$	$f(F_1)$	$f(z,c,A)$
Rata de reducere a erorii	3,38	2,96	2,70
Structura modelului	$\varepsilon = f(z,c,F_1)$	$\varepsilon = f(z,c,F_1,A)$	
Rata de reducere a erorii	2,11	2,43	

*Tabelul 0.16. Rezultate obținute în cazul utilizării unui model neuronal antrenat cu datele corespunzătoare ultimelor trei piese*

Structura modelului	$\varepsilon = f(A)$	$f(F_1)$	$f(z,c,A)$
Rata de reducere a erorii	3,30	2,96	2,73
Structura modelului	$\varepsilon = f(z,c,F_1)$	$\varepsilon = f(z,c,F_1,A)$	
Rata de reducere a erorii	2,10	2,45	

*Experimente de control al erorilor de sistem*

Pentru testarea metodei de control adaptiv al erorilor de sistem, propusă în capitolul 3.3.4 s-au folosit date sintetice generate folosind valori cunoscute pentru parametri care descriu poziția disjunctă a axei arborelui principal în raport cu axa de rotație a semifabricatului. Aceste date sintetice sunt compuse din valorile succesive pe care le-ar fi avut axele C și Z ale mașinii pe parcursul ciclului de măsurare, completate cu valorile măsurate de un comparator care explorează piesa, comparator poziționat pe direcția axei Y. În figura 0.19., se prezintă sub formă grafică un astfel de set de date obținut, considerând faptul că, suprafața de referință are forma cilindrică, iar parametrii au fost setați pentru următoarele valori:  $x_0=0,1$  [mm];  $y_0=0$  [mm],  $m=0$ ;  $l=0,0021$ . Valoarea unghiului corespunzător cosinusului director l, pentru cazul prezentat în figură, a fost de 89,88 grade. Ca și în cazul datelor colectate din experimente fizice, se observă faptul că, bătaia piesei nu este constantă, ea având o creștere monotonă.



*Fig. 0.19. Variația mărimii corespunzătoare comparatorului (date sintetice)*

Am preferat să folosim date obținute în urma simulărilor astfel încât să putem valida algoritmul de identificare a parametrilor erorii de fixare. Pentru validarea metodei, în această lucrare vom prezenta date obținute simulării operației de identificare a parametrilor conului la 400 de mm față de poziția de fixare în strung, unghiul la vârf al conului este egal cu 30 de grade. Pentru a simula situația reală în care măsurarea se realizează cu un dispozitiv care introduce erori, am adăugat la valorile obținute de la comparator, un nivel de zgomot. Am considerat că piesa pentru care se face identificarea este diferită de piesa nominală că:

- unghiul real al conicității (care va fi în continuare notat cu  $a/2$ ) a fost de 15,5 de grade, adică diferit cu un grad de valoarea nominală
- poziția vârfului conului este mult diferită de poziția nominală

Procesul virtual de măsurare a piesei a fost similar situației reale, adică am considerat că piesa este rotită în universal. La fiecare rotație a piesei se realizează doar zece măsurători. De asemenea, concomitent cu rotația piesei, axa Z este deplasată cu un avans egal cu 0,2mm/rot. Am analizat influența lungimi de măsură asupra preciziei de determinare a parametrilor modelului. În tabelul 0.17., se prezintă valorile obținute pentru parametrii modelului în comparație cu valorile lor nominale și cu valorile reale. În cadrul acestei simulări s-a considerat nivelul zgomotului semnalului cules de la comparator ca fiind egal cu 10 microni. Se observă că s-au obținut rezultate bune, foarte apropiate de valorile reale, pentru toți parametrii luați în considerare. O dată cu creșterea lungimi de măsurare, valorile parametrilor

determinate de algoritmul de regresie neliniară sunt mai apropiate de valorile reale. Totuși, diferențele nu sunt semnificative, și, de aceea, considerăm că metoda este potrivită chiar și pentru lungimi de explorare reduse.

*Tabelul. 0.17. Rezultate obținute la identificarea parametrilor corespunzători erorii de fixare pentru diverse lungimi de explorare*

Nominal	Real	Parametri	Lungime explorare [mm]				
			10	20	30	40	50
0	0.05	$X_0^*$ [mm]	0.0507	0.0518	0.0501	0.0501	0.0501
0	0.1	$Y_0^*$ [mm]	0.099	0.1015	0.1001	0.0998	0.0998
0	0.0002	$l^*$	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
0	0.0009	$m^*$	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009
400	402	$k^*$ [mm]	402.0364	401.991	401.9941	401.9986	401.9987
15	15.5	$a^*$ [grade]	15.4975	15.5006	15.5004	15.5001	15.5001

De asemenea, am analizat capacitatea algoritmului de a detecta variația excentricității, pentru aceasta am modificat parametrul  $x_0$  în limite largi. Datele care au fost folosite de algoritmul de regresie neliniară au fost corespunzătoare unei lungimi de măsurare de 30 de mm. Valoarea variabilei X, corespunzătoare mării măsurate de comparator, a fost influențată de zgomot, a cărui valoare a fost de 10 micrometri. Astfel, am constatat faptul că algoritmul a identificat de fiecare dată valori foarte apropiate de cele corecte pentru toți parametrii (tabelul 0.18). În mod similar, s-a procedat și pentru parametrul  $l$  care reprezintă cosinusul director al axei semifabricatului cu axa X a sistemului de coordonate asociat piesei. Rezultatele prezentate în tabelul 0.19.

*Tabelul. 0.18. Rezultate obținute la identificarea parametrilor corespunzători erorii de fixare pentru diverse valori ale lui  $x_0$*

Nominal	Real	Parametri	0,01	0.015	0.02	0.3
0	*	$X_0^*$ [mm]	0.0106	0.0149	0.02	0.3
0	0.01	$Y_0^*$ [mm]	0.0101	0.0099	0.0098	0.0103
0	0.0002	$l^*$	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
0	0.0009	$m^*$	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009
400	402	$k^*$ [mm]	401.9868	401.9941	402.0018	401.9959
15	15.5	$\alpha^*$ [grade]	15.5009	15.5004	15.4999	15.5003

*Tabelul. 0.19. Rezultate obținute la identificarea parametrilor corespunzători erorii de fixare pentru diverse valori ale cosinusului director al axei semifabricatului cu piesa*

Nominal	Real	Unghi $l$	89,99 0.0002	89,95 0.0009	89,85 0.0026	89,5 0.0087
0	0.01	$X_0^*$	0.0103	0.0105	0.0097	0.0104
0	0.01	$Y_0^*$	0.0103	0.0096	0.0098	0.01
0	*	$l^*$	0.0002	0.0009	0.0026	0.0087
0	0.0009	$m^*$	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009
400	402	$k^*$	401,9898	401,9876	401,999	401,99
15	15,5	$a^*$	15.5007	15.5009	15.5001	15.5001

În tabelul 0.20 se prezintă o evaluare a metodei de identificare pentru diverse valori ale zgomotului. Zgomotul a fost modelat folosind funcția de generare de numere pseudo-aleatorii cu distribuție uniformă din Matlab. Pentru fiecare valoare generată pentru mărimea X s-a adăugat valoarea zgomotului pentru care diferența dintre valoarea medie și valoarea maximă este cea aferentă fiecărei coloane a primei linii a tabelului 0.20. Se observă că metoda de identificare este robustă, în sensul că este relativ insensibilă la zgomot.

Tabelul. 0.20. Rezultate obținute la identificarea parametrilor corespunzători erorii de fixare pentru diverse valori ale zgomotului care afectează sistemul de măsură

Nominal	Real	Zgomot	2 $\mu\text{m}$	10 $\mu\text{m}$	20 $\mu\text{m}$	50 $\mu\text{m}$
0	0.01	$X_0^*$	0.0101	0.0095	0.0099	0.0107
0	0.01	$Y_0^*$	0.0101	0.0094	0.0102	0.0123
0	0.0026	$I^*$	0.0026	0.0026	0.0026	0.0026
0	0.0026	$m^*$	0.0026	0.0026	0.0026	0.0027
400	402	$k^*$	401,9953	401,994	402,0039	402,0326
15	15.5	$\alpha^*$	15,5003	15,5004	15,4997	15,4977

### Bibliografie Cap III

- [ANRE2008] **Agencia Națională de Reglementare în Domeniul Energiei România - Date referitoare la energia electrica furnizata în 2008 necesare etichetării.** - Disponibil pe [www.anre.ro/activitati.php?id=319](http://www.anre.ro/activitati.php?id=319). Accesat pe 3-03-2009
- [Apostu1998] . **Cristian Apostu - Cercetări privind reglarea pozițională a sistemelor de prelucrare cu comandă numerică** - Teză de doctorat. Galați 1998
- [Bandy 2005] . **H. T. Bandy M. A. Donmez D. E. Gilsinn C. Han M. Kennedy A. Ling N. Wilkin K. Yee** - *A Methodology for Compensating Errors Detected by Process-Intermittent Inspection* - National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, MD 20899.NISTIR 6811
- [Barata 2001] . **José Barata, L.M. Camarinha-Matos, Raymond Boissier, Paulo Leitão, Francisco Restivo and Mohammed Raddadi** - *INTEGRATED AND DISTRIBUTED MANUFACTURING, A MULTI-AGENT PERSPECTIVE* - roceedings of 3rd Workshop on European Scientific and Industrial Collaboration, 27-29 June, Enschede, Netherlands, pp. 145-156.
- [Bing-hai 2004] . **Zhou Bing-hai, Xi Li-feng, Yu Chuan-meng** - *DCOM and MMS-based control software architecture for automated manufacturing system* - The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2006) 27: 951-959, ISSN 0268-3768 (Print) 1433-3015 (Online)
- [Blanco2004] . **Paulo M. P. A. Blanco, Marco A. Poli, Marcos R. Pereira Barretto** - *DISTRIBUTED OBJECT TECHNOLOGIES IN MANUFACTURING EXECUTION SYSTEMS* - ABCM Symposium Series in Mechatronics, Vol 1, pp 580-589, 2004
- [Boser 1992] . **Boser B.E., Guyon I.M., and Vapnik V.N** - *A training algorithm for optimal margin classifiers.* In: *Haussler D. (Ed.), - Proceedings of the Annual Conference on Computational Learning Theory* . 1992. ACM Press, Pittsburgh, PA, pp. 144-152.
- [Bravo 2005] . **Bravo U, Altuzarra O, López de Lacalle LN (2005)** - *Stability limits of milling considering the flexibility of the workpiece and the machine.* - Int J Mach Tools Manuf 2005 45:1669-1680. ISSN 0890-6955

9. [Budak 2007] . **E. Budak, E. Ozlu** - *Analytical Modeling of Chatter Stability in Turning and Boring Operations: A Multi-Dimensional Approach* - Annals of the CIRP Vol. 56/1/2007, ISSN 0007-8506
10. [Carlson 2006] . **Shane A. Carlson, W. Edward Red and C. Gregory Jensen** - *Development of a Variational Part Model Using In-Process Dimensional Measurement Error* - Computer-Aided Design & Applications, Vol. 3, Nos. 1-4, 2006, pp 405-414,(ISSN 1686-4360)
11. [Carrino 2002] . **L. Carrino, G. Giorleo, W. Polini, U. Prisco** - *Dimensional errors in longitudinal turning based on the unified generalized mechanics of cutting approach. Part II: Machining process analysis and dimensional error estimate* - International Journal of Machine Tools & Manufacture 42 (2002) 1517–1525, ISSN 0890-6955
12. [Cherkassky 2004] . **Vladimir Cherkassky, Yunqian Ma** - *Practical selection of SVM parameters and noise estimation for SVM regression* - Neural Networks ,Volume 17 , Issue 1 (January 2004), Pages: 113 - 126, 2004 ,ISSN:0893-6080
13. [Cho 2006] . **Cho Myeong-Woo, Kim Gun-Hee, Seo Tae-Il, Hong Yeon-Chan ,Cheng H.Harry** - *Integrated machining error compensation method using OMM data and modified PNN algorithm* - International Journal of Machine Tools & Manufacture 46 (2006) 1417–1427, ISSN 0890-6955
14. [Choi 2003] . **J.-P. Choi, S.-J. Lee and H.-D. Kwon** - *Roundness Error Prediction with a Volumetric Error Model Including Spindle Error Motions of a Machine Tool* - The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2003) 21:923–928, ISSN 0268-3768
15. [Corpus 2004 a] . **CORPUS William T. ; ENDRES William J. ;** - *Added stability lobes in machining processes that exhibit periodic time variation, part 2: Experimental validation* - Journal of manufacturing science and engineering ISSN 1087-1357, 2004, vol. 126, no3, pp. 467-474 [8 page(s) (article)] (23 ref.)
16. [Corpus 2004 b] . **CORPUS William T. ; ENDRES William J. ;** - *Added stability lobes in machining processes that exhibit periodic time variation, part 1: An analytical solution* - Journal of manufacturing science and engineering ISSN 1087-1357, 2004, vol. 126, no3, pp. 475-480 [6 page(s) (article)] (9 ref.)
17. [Cortes 1995] . **Corinna Cortes, Vladimir Vapnik** - *Support vector networks,* - Machine Learning, vol. 20, pp. 273-297, 1995, ISSN 0885-6125 (Print) 1573-0565 (Online)
18. [Donaldson 1972] . **Donaldson, R.R.** - *A Simple Method for Separating Spindle Error from Test Ball Roundness Error.* - CIRP Annals, vol.21/1, 1972, p.125.
19. [Dong2005] . **Ming Dong, F. Frank Chen** - *Petri net-based workflow modelling and analysis of the integrated manufacturing business processes* - The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2005) 26: 1163–1172, ISSN 0268-3768 (Print) 1433-3015 (Online)
20. [Eung-Suk 2005] . **Lee Eung-Suk, Sub Suk-Hwan and Shon Jin-Wook** - *A Comprehensive Method for Calibration of Volumetric Positioning Accuracy of CNC-Machines* - nternational journal, advanced manufacturing technology ISSN 0268-3768
21. [Fan1999] . **Yushun Fan , Wei Shi And Cheng Wu** - *Enterprise wide application integration platform for CIMS implementation* - Journal of Intelligent Manufacturing (1999) 10, 587-601, ISSN 0956-5515 (Print) 1572-8145 (Online)
22. [Fines 2007] . **Fines M. John, Arvin Agah** - *Machine tool positioning error compensation using artificial neural networks* - Engineering Applications of Artificial Intelligence 2007, ISSN:0952-1976
23. [Fung 2003] . **Fung H.K. Eric, Wong Y.K, Ho H.F, Mignolet P. Marc** - *Modelling and prediction of machining errors using ARMAX and NARMAX structures* - Applied

Mathematical Modelling, Volume 27, Issue 8, August 2003, Pages 611-627 ISSN: 0307-904X.

24. [Gao 2006] . **Wei Gao, Yoshikazu Arai , Atsushi Shibuya , Satoshi Kiyono , Chun Hong Park** - *Measurement of multi-degree-of-freedom error motions of a precision linear air-bearing stage* - Precision Engineering 30 (2006) 96–103, ISSN 0141-6359

25. [Giacomo 2004] . **Benedito Di Giacomo, Benedito Di Giacomo, Fabricio Tadeu Paziani** - *REVERSAL TECHNIQUE APPLIED TO THE MEASUREMENT OF STRAIGHTNESS ERRORS* - ACBM Symposium Series in Mechatronics, vol 1, pp 479-484 2004

26. [Gilsin 2002] . **D.Gilsin, H.Bandy, A. Ling** - *A spline algorithm fo modelling cutting errors on turning centers* - Journal of Intelligent Manufacturing, 13, 391-401,2002, ISSN: 0956-5515 (print version) ISSN: 1572-8145 (electronic version)

27. [Gilsinn 2006] . **D.E. Gilsinn, B. Balachandran** - *Stability of Diamond Turning Processes That Use Round Nosed Tools* - Journal of manufacturing science and engineering,2001, vol. 123, no4, pp. 747-748 ISSN 1087-1357

28. [Gunasekaran2000] . **A. Gunasekaran, H. B. Marri and B. Lee** - *Design and Implementation of Computer Integrated Manufacturing in Small and Medium-Sized Enterprises: A Case Study* - The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2000) 16:46–54, ISSN 0268-3768

29. [Hall 2000] **Hall, M** - *Correlation-based feature selection of discrete and numeric class machine learning.* - In Proceedings of the International Conference on Machine Learning, pages 359-366, San Francisco, CA. Morgan Kaufmann Publishers

30. [Hanson 2000] . **HANSON Reed D, TSAO Tsu-Chin** - *Periodic sampling interval repetitive control and its application to variable spindle speed noncircular turning process* - Journal of dynamic systems, measurement, and control ISSN 0022-0434 CODEN JDSMAA 2000, vol. 122, no3, pp. 560-566 (18 ref.)

31. [Hsieh 2008] . **Jung-Fa Hsieh** - *NC data generation for 6-axis machine tools to produce a helical drill* - The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2008) 36:535–546, ISSN 0268-3768 (Print) 1433-3015 (Online)

32. [Hsu 2007] . **Y.Y. Hsu, S.S. Wang** - *Mapping geometry errors of five-axis machine tools using decouple method* - International Journal of Precision Technology 2007 - Vol. 1, No.1 pp. 123 - 132, ISSN (Online): 1755-2079 - ISSN (Print): 1755-2060

33. [Huang2007] . **Chi-Yu Huang, Kai Cheng, Alan Holt** - *An integrated manufacturing network management framework by using mobile agent* - The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2007) 32: 822–833, ISSN 0268-3768 (Print) 1433-3015 (Online)

34. [Ibaraki 2001] . **Ibaraki, S., Kakino, Y., Lee, K., Ihara, Y., Braasch, J., & Eberherr, A.,** - *Diagnosis and compensation of motion errors in NC machine tools by arbitrary shape contouring error measurement* - Proceedings of the LANDMAP 2001 Conference, 2001.

35. [Jayaram 2000] . **S. Jayaram, S. G. Kapoor, R. E. DeVor** - *Analytical Stability Analysis of Variable Spindle Speed Machining* - J. Manuf. Sci. Eng. -- August 2000 -- Volume 122, Issue 3, 391-398, ISSN 1087-1357

36. [Jywe 2001] . **Wen-Yuh Jywe and Chien-Hong Liu** - *Application of Ball Bar System and Genetic Algorithms for CNC Lathe Contouring Compensation* - The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2001) 17:189–195, ISSN 0268-3768 (Print) 1433-3015 (Online)

37. [Kim 2005] . **S.-M. Kim, S.-K. Lee** - *Spindle Housing Design Parameter Optimization Considering Thermo-Elastic Behaviour* - The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2005) 25: 1061–1070, ISSN 0268-3768 (Print) 1433-3015 (Online)

38. [Kim 2007] . **Jinho Kim, Dongik Shin, Deokwon Yun, and Changsoo Han** - *The Analysis of Radial/Axial Error Motion on a Precision Rotation Stage* - INTERNATIONAL JOURNAL OF ELECTRICAL, COMPUTER, AND SYSTEMS ENGINEERING VOLUME 1 NUMBER 4 2007 ISSN 1307-5179
39. [Kim2004] . **Dong-Sung Kim; Haas, Z.J.** - *Virtual factory communication system and its application to networked factory machine* - Industrial Electronics Society, 2004. IECON 2004. 30th Annual Conference of IEEE Volume 3, Issue , 2-6 Nov. 2004 Page(s): 2389 - 2393
40. [Kononenko 1997] **I.Kononenko, S.J.Hong** - *Attribute selection for modeling* - Future Generation of Computer Systems, November 1997 ISSN 0176-739X,13, p. 181-195, 1997
41. [Kou1998] . **Chung-Hsien Kuo, Han-Pang Huang and Min-Chin Yeh** - *Object-Oriented Approach of MCTPN for Modelling Flexible Manufacturing Systems* - The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (1998) 14:737-749, ISSN 0268-3768 (Print) 1433-3015 (Online)
42. [Kubat 1998] . **Miroslav Kubat** - *Decision trees can initialize radial-basis function networks* - IEEE Transaction on Neural Networks, 9 (5) pp. 813–824, 1998. ISSN: 1045-9227.
43. [Kyoung 1999] . **Kyoung Gee Ahn and Dong Woo Cho** - *Proposition for a Volumetric Error Model Considering Backlash in Machine Tools* - The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 15, Number 8 / July, 1999
44. [Lamikiz 2008] . **A. Lamikiz & L. N. López de Lacalle & O. Ocerin & D. Díez & E. Maidagan** - *The Denavit and Hartenberg approach applied to evaluate the consequences in the tool tip position of geometrical errors in five-axis milling centres* - The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2008) 37:122–139 , ISSN 0268-3768 (Print) 1433-3015 (Online)
45. [Lee 1997] . **R.-S. Lee and C.-H. She** - *Developing a Postprocessor for Three Types of Five-Axis Machine Tools* - The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (1997) 13:658-665, ISSN 0236-3768(Print) 1433-3015(Online)
46. [Lee 1998] . **E. S. Lee and H. G. Wi** - *A Comprehensive Technique for Measuring the Three- Dimensional Positioning Accuracy of a Rotating Object* - The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (1998) 14:330-335, ISSN 0268-3768 (Print) 1433-3015 (Online)
47. [Lee2003] . **Kichang Lee, Hanil Jeong, Chankwon Park, Jinwoo Park** - *Construction and performance analysis of a Petri net model based on a functional model in a CIM system* - The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2004) 23: 139–147 , ISSN 0268-3768 (Print) 1433-3015 (Online)
48. [Levi1999] . **Meir H. Levi, Marios P. Klapsis** - *CIMOSA: open system architecture for CIM*, - Computers in Industry, Volume 40 , Issue 2-3 (November 1999), Pages: 267 - 277, ISSN:0166-3615
49. [Li 2000] . **X. Li, P. K. Venuvinod and M. K. Chen** - *Feed Cutting Force Estimation from the Current Measurement with Hybrid Learning* - The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 16: 859-862, 2000, ISSN 0238-3768
50. [Li 2001 a] . **Li X.** - *Real-Time Prediction of Workpiece Errors for a CNC Turning Centre, Part 1. Measurement and Identification* - The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2001) 17:649–653, ISSN 0268-3768 (Print) 1433-3015 (Online)
51. [li 2001 B] . **X. Li** - *Real-Time Prediction of Workpiece Errors for a CNC Turning Centre, Part 2. Modelling and Estimation of Thermally Induced Errors* - The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2001) 17:654–658, ISSN 0268-3768 (Print) 1433-3015 (Online)



52. [Li 2001c] . **X. Li** - *Real-Time Prediction of Workpiece Errors for a CNC Turning Centre, Part 4. Cutting-Force-Induced Errors* - The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2001) 17:659–664, ISSN 0268-3768 (Print) 1433-3015 (Online)
53. [Li 2001d] . **X. Li** - *Real-Time Prediction of Workpiece Errors for a CNC Turning Centre, Part 3. Cutting Force Estimation Using Current Sensors* - The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2001) 17:665–669, ISSN 0268-3768 (Print) 1433-3015 (Online)
54. [Li 2001e] . **X. Li, P. K. Venuvinod, A. Djorjevich and Z. Liu** - *Predicting Machining Errors in Turning Using Hybrid Learning* - The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2001) 18:863–872, ISSN 0268-3768 (Print) 1433-3015 (Online)
55. [Li 2004] . **Z.Z. Li · Z.H. Zhang · L. Zheng** - *Feedrate optimization for variant milling process based on cutting force prediction* - The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2004) 24: 541–552, ISSN 0268-3768 (Print) 1433-3015 (Online)
56. [Lin 2003] . **Y. Lin, Y. Shen** - *Modelling of Five-Axis Machine Tool Metrology Models Using the Matrix Summation Approach* - The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2003) 21:243–248, ISSN 0268-3768 (Print) 1433-3015 (Online)
57. [Lin 2005] . **Chien-Chang Lin · Jui-Liang Her** - *Calibrating the volumetric errors of a precision machine by a laser tracker system* - The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2005) 26: 1255–1267, ISSN 0268-3768 (Print) 1433-3015 (Online)
58. [Liu2008] . **Quansheng Liu & Xiaoyan Sun & S. M. Mahdavian & Songlin Ding** - *Establishment of the model for flexible manufacturing system based on CORBA and IDEF0* - The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2008) ISSN 0268-3768 (Print) 1433-3015 (Online)
59. [Marin 2009] **Florin Bogdan Marin** - *Modelarea holonică a cinematicii sistemelor de prelucrare reconfigurabile* Teza de doctorat. 2009. Universitatea Dunarea de Jos din Galati
60. [Marri1998] . **H. B. Marri, A. Gunasekaran and R. J. Grieve** - *An Investigation into the Implementation of Computer Integrated Manufacturing in Small and Medium Enterprises* - The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (1998) 14:935-942, ISSN 0268-3768 (Print) 1433-3015 (Online)
61. [Mei 2006] . **C. Mei, J.G. Cherng, Y. Wang** - *Active Control of Regenerative Chatter During Metal Cutting Process* - Journal of manufacturing science and engineering 998, vol. 120, pp. 674-683
62. [Mittal 2007] . **Rutash Mittal** - *New systems in Computer Integrated Manufacturing* - Proceedings of National Conference on Challenges & Opportunities in Information Technology (COIT-2007) RIMT-IET, Mandi Gobindgarh. March 23, 2007.
63. [Mize 2000] . **Christopher D. Mize, John C. Ziegert** - *Neural network thermal error compensation of a machining center* - Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology 24 (2000) 338–346, Precision Engineering on ScienceDirect(Opens new window) ISSN: 0141-6359
64. [Nagalingam 2008] . **Sev V. Nagalingam, Grier C.I. Lin** - *CIM—still the solution for manufacturing industry* - Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Volume 24, Issue 3, June 2008, Pages 332-344, ISSN: 0736-5845
65. [Namachchivaya 2003] . **N. Sri Namachchivaya and R. Beddini** - *Spindle Speed Variation for the Suppression of Regenerative Chatter* - J. Nonlinear Sci. Vol. 13: pp. 265–288 (2003), ISSN: 0938-8974 (print version) ISSN: 1432-1467 (electronic version)
66. [National Research Council 1998] . **Committee on Visionary Manufacturing Challenges Board on Manufacturing and Engineering Design Commission on**

- Engineering and Technical Systems National Research Council - Visionary manufacturing challenges for 2020.** - Washington, DC: National Academy Press; 1998. p. 156
67. [Ngoi 2000] . **B. K. A. Ngoi and C. S. Chin** - *Self-Compensated Heterodyne Laser Interferometer* - The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2000) 16:217–219, ISSN 0268-3768 (Print) 1433-3015 (Online)
68. [Ojha 2005] . **D.K. Ojha, U.S. Dixit** - *An economic and reliable tool life estimation procedure for turning* - The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2005) 26: 726–732, ISSN 0268-3768 (Print) 1433-3015 (Online)
69. [Olgac 2005] . **Olgac, N. and Sipahi, R.** - *A unique methodology for chatter stability mapping in simultaneous machining*, - Journal of Manufacturing Science and Engineering , 2005, 127(4), 791—800, ISSN: 1087-1357
70. [OMAC 1999] . - *Open Modular Architecture Controls (OMAC) User's Group, 1999. Business Justification of Open Architecture Control*
71. [Orr 1999] . **Mark J. H. Orr, Kunio Takezawa, Alan Murray, Seishi Ninomiya, Mari Oide si Tom Leonard** - *Combining regression trees and radial basis function networks* - International Journal of Neural Systems 1999, ISSN: 0129-0657
72. [Othman 2006] . **Khalifa, Othman; Densibali, Amirasyid; Faris, Waleed** - *Image processing for chatter identification in machining processes* - The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 31, Numbers 5-6, December 2006 , pp. 443-449(7), ISSN 0268-3768 (Print) 1433-3015 (Online)
73. [OZLU 2007 a] . **OZLU E ; BUDAK E.** - *Analytical modeling of chatter stability in turning and boring operations-Part I: Model development* - Journal of manufacturing science and engineering 2007, vol. 129, no4, pp. 726-732, ISSN: 1087-1357
74. [OZLU 2007 b] . **OZLU E ; BUDAK E.** - *Analytical Modeling of Chatter Stability in Turning and Boring Operations—Part II: Experimental Verification* - Journal of manufacturing science and engineering 2007, vol. 129, no4, 733-739 , ISSN: 1087-1358
75. [Pahk 2002] . **H. J. Pahk, S. W. Lee** - *Thermal Error Measurement and Real Time Compensation System for the CNC Machine Tools Incorporating the Spindle Thermal Error and the Feed Axis Thermal Error* - The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2002) 20:487–494, ISSN 0268-3768 (Print) 1433-3015 (Online)
76. [Polini 2003] . **W. Polini. U. Prisco** - *The estimation of the diameter error in bar turning: a comparison among three cutting force models* - The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2003) 22: 465–474, ISSN 0268-3768 (Print) 1433-3015 (Online)
77. [Ptaszynski 2006] . **Wojciech Ptaszynski, Roman Staniek** - *Positioning accuracy of NC machine tools assigned to HSM* - 5th International Conference on Advanced Engineering Design : AED '2006. - Praga, 2006
78. [Raksiri 2002] . **Raksiri, C.,M Parnichkun** - *Kinematic and geometric error verification and compensation of a three axes vertical machining center.* - Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Industrial Technology, Bangkok, Thailand, vol. 2, pp. 1008–1012.
79. [Raksiri 2004] . **Raksiri Chana, Manukid Parnichkun** - *Geometric and force errors compensation in a 3-axis CNC milling machine* - International Journal of Machine Tools & Manufacture 44 (2004) 1283–1291, ISSN: 0890-6955.
80. [Ramesh 2003] . **R. Ramesh, M.A. Mannan , A.N. Poo** - *Thermal error measurement and modelling in machine tools. Part I. Influence of varying operating conditions* - International Journal of Machine Tools & Manufacture 43 (2003) 391–404, ISSN: 0890-6955.

81. [Segonds 2004] . **Segonds S., Landon Y., Mousseigne M., Lagarrigue P.** - *The characterisation of the dimensional change of the Z-axis in NC turning* - The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2004) 23: 800–805, ISSN 0268-3768 (Print) 1433-3015 (Online)
82. [SEI2003] . **Carnegie Mellon Software Engineering Institute** - *Advanced Engineering Environments for Small Manufacturing Enterprises: Volume I* - TECHNICAL REPORT CMU/SEI-2003-TR-013 ESC-TR-2003-013
83. [Shahabi2007] . **H. H. Shahabi & M. M. Ratnam** - *On-line monitoring of tool wear in turning operation in the presence of tool misalignment* - The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2007 718-724, ISSN 0268-3768 (Print) 1433-3015 (Online)
84. [Sharma2008a] . **Vishal S. Sharma, Suresh Dhiman, Rakesh Sehgal, S. K. Sharma** - *Estimation of cutting forces and surface roughness for hard turning using neural networks* - Journal of Intelligent Manufacturing 2008, ISSN 0956-5515 (Print) 1572-8145 (Online)
85. [Sharma2008b] . **Vishal S. Sharma · S. K. Sharma · Ajay K. Sharma** - *Cutting tool wear estimation for turning* - Journal of Intelligent Manufacturing 2008 ISSN 0956-5515 (Print) 1572-8145 (Online)
86. [Smith 2005] . **Gregory C. Smith, Samson S. Lee** - *A method for detecting tool wear on a CNC lathe using a doppler radar detector* - The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2005) 25: 270–280, ISSN 0268-3768 (Print) 1433-3015 (Online)
87. [Soliman 1998] . **SOLIMAN E. ; ISMAIL F.** - *A control system for chatter avoidance by ramping the spindle speed* - Journal of manufacturing science and engineering ISSN 1087-1357, 1998, vol. 120, no4, pp. 674-683 (14 ref.)
88. [Spider2006] . - *The Spider toolbox. VI.71. Iunie 2006* - Disponibil la <http://www.kyb.tuebingen.mpg.de/bs/people/spider> . Accesat în Februarie 2008.
89. [Staniek 2004] . **Staniek R., Ptaszynski W., Twardowski P.** - *Static and Dynamic Accuracy of NC Machine Tools Assigned to HSM* - Proc. of International Congress MATAR Praha 2004, vol.1, s. 215-220
90. [Suk 1998] . **Suk-Hwan Suh, Eung-Suk Lee and Se-Yong Jung** - *Error Modelling and Measurement for the Rotary Table of Five-axis Machine Tools* - The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (1998) 14:656-663 ISSN 0268-3768 (Print) 1433-3015 (Online)
91. [Tsai2005] . **Ming Piao Tsai, James T. Lin** - *Web-based distributed manufacturing control systems* - The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2005) 25: 608–618, ISSN 0268-3768 (Print) 1433-3015 (Online)
92. [Tseng 2002] . **Pai-Chung Tseng, J.-L. Ho** - *A Study of High-Precision CNC Lathe Thermal Errors and Compensation* - The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2002) 19:850–858, ISSN 0268-3768 (Print) 1433-3015 (Online)
93. [Tseng1997] . **Pai-Chung Tseng** - *A Real-Time Thermal Inaccuracy Compensation Method on a Machining Centre* - The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (1997) 13:182-190, ISSN 0268-3768 (Print) 1433-3015 (Online)
94. [Venkatesh1997] . **Kurapati Venkatesh, Mengchu Zhou, Reggie J. Caudill** - *Design of artificial neural networks for tool wear monitoring* - Journal of Intelligent Manufacturing (1997) 8, 215-226, ISSN: 0956-5515 (print version) ISSN: 1572-8145 (electronic version)
95. [Venuvinod 2007] . **P. K. Venuvinod and W. L. Jin** - *Three dimensional cutting force analysis based on the lower boundary of shear zone: Part 1: Single edge oblique cutting* - Int. J. Precision Technology, Vol. 1, No. 1, 2007, ISSN 0890-6955

96. [Vergidis2006] . **K Vergidis, A Tiwari and B Majeed** - *Business process improvement using multi-objective optimisation* - BT Technology Journal, Vol 24 No 2, 2006, ISSN: 1358-3948 (print version) ISSN: 1573-1995 (electronic version)
97. [Wang 2002] . **Charles Wang** - *Non-circular Contouring Measurement for Servo Tuning and Dynamic Performance of a CNC Machine* - Proceedings of the 2002 Japan-USA Symposium on Flexible Automation, Hiroshima, Japan, July 15-17, 2002
98. [Witten2005] . **Ian H. Witten and Eibe Frank** - *Data Mining: Practical machine learning tools and techniques, 2nd Edition*, - Morgan Kaufmann, San Francisco, 2005. ISBN-10: 0120884070
99. [Yang 2004] . **S.-H. Yang, K.-H. Kim, Y. K. Park , S.-G. Lee** - *Error analysis and compensation for the volumetric errors of a vertical machining centre using a hemispherical helix ball bar test* - The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2004) 23: 495–500, ISSN 0268-3768 (Print) 1433-3015 (Online)
100. [Yang 2005] . **J.G. Yang, Y.Q. Ren, G.L. Liu, H.T. Zhao, X.L. Dou, W.Z. Chen si S.W. He** - *Testing, variable selecting and modeling of thermal errors on an INDEX-G200 turning center* - The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2005) 26: 814–818, ISSN 0268-3768 (Print) 1433-3015 (Online)
101. [Yee 1992 a] . **K.W. Yee** - *Alternative Designs of a Real-Time Error Corrector for Machine Tools with "Encoder Position Feedback* - NISTIR 4832, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 1992.
102. [Yee 1992 b] . **K.W. Yee and R.J. Gavin** - *Implementing Fast Part Probing and Error Compensation on Machine Tools* - NISTIR 4447, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 1992.
103. [Yilmaz 2002] . **Alpay Yilmaz, Emad AL-Regib, Jun Ni** - *Machine Tool Chatter Suppression by Multi-Level Random Spindle Speed Variation* - Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2002, Vol. 124, ISSN: 1087-1357
104. [Zhang2008] . **Lianfeng (Linda) Zhang · Jianxin (Roger) Jiao** - *Modeling production configuration using nested colored object-oriented Petri-nets with changeable structures* - Journal of Intelligent Manufacturing, ISSN 0956-5515 (Print) 1572-8145 (Online)
105. [Zhan-Qiang 1999] . **Liu Zhan-Qiang** - *Repetitive Measurement and Compensation to Improve Workpiece Machining Accuracy* - The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (1999) 15:85–89, ISSN 0268-3768 (Print) 1433-3015 (Online)

## C. Prezentarea in extenso a rezultatelor obtinute

### Lucrari stiintifice elaborate si publicate

**1) Optimal feedrate scheduling for a reconfigurable lathe**, Epureanu A., Marin F.B., Marinescu V., Banu M., Constantin I., Proceedings of 10th WSEAS International Conference on AUTOMATIC CONTROL, MODELLING and SIMULATION (ACMOS '08), 2008 (indexata ISI)

ISI Web of Knowledge<sup>SM</sup>
Take the next step

All Databases | Select a Database | Web of Science | Additional Resources

Search | Search History | Marked List (0)

ALL DATABASES

<< Back to results list
Record 1 of 1 >>

### Optimal feedrate scheduling for a reconfigurable lathe

Print
E-mail
Add to Marked List
Save to **EndNote** Web
Save to **EndNote**, **RefMan**, **ProCite**
more options

**Author(s):** Epureanu A (Epureanu, A.)<sup>1</sup>, Marin FB (Marin, F. B.)<sup>1</sup>, Marinescu V (Marinescu, V.)<sup>1</sup>, Banu M (Banu, M.)<sup>1</sup>, Constantin I (Constantin, I.)<sup>1</sup>

**Editor(s):** Demiralp M; Mikhael WB; Caballero AA; Abatzoglou N; Tabrizi MN; Leandre R; GarciaPlanas M; Choras RS

**Source:** ACMOS '08: PROCEEDINGS OF THE 10TH WSEAS INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTOMATIC CONTROL, MODELLING AND SIMULATION **Book Series:** ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING **Pages:** 108-113 **Published:** 2008

**Times Cited:** 0 **References:** 7 [Citation Map](#) beta

**Conference Information:** 10th WSEAS International Conference on Automatic Control, Modelling and Simulation  
Istanbul, TURKEY, MAY 27-30, 2008  
WSEAS

**Abstract:** This paper presents a virtual machining algorithm that optimizes federate scheduling aiming to improve the efficiency of cutting process. The manufacturing machine considered is a reconfigurable machine, configured as lathe with a specific architecture. A geometric searching procedure is proposed to find the parameter values corresponding to cutter locations along tool path during generation of the final surface.

**Document Type:** Proceedings Paper

**Language:** English

**Author Keywords:** feedrate scheduling; reconfigurable machining system; numerical control; optimal control; virtual machining

**KeyWords Plus:** 5-AXIS MILLING MACHINE; TOOL PATH; OPTIMIZATION

**Reprint Address:** Epureanu, A (reprint author), Dunarea Jos Univ, Mfg Sci & Engn Dept, 47 Domneasca St, Galati, Romania

**Addresses:**  
1. Dunarea Jos Univ, Mfg Sci & Engn Dept, Galati, Romania

**Publisher:** WORLD SCIENTIFIC AND ENGINEERING ACAD AND SOC, AG LOANNOU THEOLOGOU 17-23, 15773 ZOGRAPHOU, ATHENS, GREECE

**IDS Number:** BIB19

**ISBN:** 978-960-6766-63-3

## Optimal feedrate scheduling for a reconfigurable lathe

EPUREANU A., MARIN F.B., MARINESCU V., BANU M., CONSTANTIN I.  
 Manufacturing Science and Engineering Department  
 Dunarea de Jos University  
 47, Domneasca St., Galati  
 ROMANIA  
 alexandru.epureanu@ugal.ro

*Abstract:* - This paper presents a virtual machining algorithm that optimizes federate scheduling aiming to improve the efficiency of cutting process. The manufacturing machine considered is a reconfigurable machine, configured as lathe with a specific architecture. A geometric searching procedure is proposed to find the parameter values corresponding to cutter locations along tool path during generation of the final surface.

*Key-Words:* - feedrate scheduling, reconfigurable machining system, numerical control, optimal control, virtual machining

### 1 Introduction

Nowadays, companies building manufacturing machines must face fast changes happening on technical, commercial and economical fields. These emerging evolutions are the following:

- economy globalization, with the consequence the emphasis of competition;
- individualization of needs, what means products customization;
- capital dynamization, generating high requirements concerning investment efficiency;
- high versatility of small companies, for fast adaptation to market. At the time, the companies responses to these changes are based on the idea of extending some of the attributes of classic manufacturing system to define reconfigurability. Whereas Dedicated Manufacturing Systems (DMSs) have been designed to produce a specific part and Flexible Manufacturing Systems (FMSs) are designed to accommodate a large variety of parts even though the parts are not specified at the system design stage, the Reconfigurable Manufacturing Systems (RMSs) combines the advantages of DMS and FMS providing a suitable solution [1][2]. It is defined the new peculiar manufacturing system, reconfigurable manufacturing system, using six key characteristics: *i)* universality; *ii)* convertibility; *iii)* integrability; *iv)* scalability; *v)* diagnosability; *vi)* customisation. These systems are designed to adapt manufacturing to mixed products and volumes. The reconfigurable machine is conceived with standard and inter-operable components including actuated modules, fixtures and tools to be assembled into the machine with arbitrary architecture and degrees of freedom. The informations describing modules and tools (for instance, the shape of the tools and the

modules geometry) are stored in the machine database.

The reconfigurable "plug-and-play" machine kinematics and dynamic modeling algorithms need to be developed. These algorithms are the basis for the control and simulation of reconfigurable manufacturing system. The concept of machine configuration optimization is introduced for the effective use of the rapidly reconfigurable machine. In this paper we are introducing a new approach for optimal federate scheduling applied to reconfigurable machine with specific architecture.

Feedrate schedule optimization problems are the subject to several possible criterions, building the framework for surface generating model. The common restriction used in feedrate scheduling is constant material removal rate (MRR), [3]. In the MRR based approach, feedrate is dependent to either average or instantaneous volumetric removal rate. Secondly, the restrictions are based on the process mechanics [4]. In this case using force based models, the feedrate is set to values which keep either average or instantaneous machining forces to an allowable level. These models computes either MRR or force values as a minimum allowable values, and are maintained at a constant level during processing.

The disadvantages of keeping at allowable level are in the first place, the efficiency is lowered and secondly, the optimization is incomplete performed, as it does not take into account several variables in the process such as chip width (determining risk of chatter), roughness or chip thickness (determining force overloading).

Commonly used CAM programs and NC code generators are based on geometric and volumetric analysis, but they do not concern the current blank

surface shape to be processed. CAM software considers only the nominal dimensions inputted from CAD model [5][6][7].

Also planning the isoparametric tool path it is addressed to considerable long paths (due to the G-code limitation and the nowadays machine control system architecture) and not for adjacent cutter location resolution.

It is critical, but often difficult, to select optimal cutting conditions to achieve high productivity while maintaining high quality of parts.

Generating the optimal cutting conditions scheduling, described by NC programs, to produce the required geometry involves determination of the optimal cutter paths and machining parameters. The common practice is to set machining parameters such as feed rate, to constant value for the number of cutter paths, using machinability handbooks and experience of skilled machinist. The selected parameters are often so excessive limited that efficiency is very low for the machining process.

In this paper, a searching algorithm is proposed to find the parameter incremental values of all cutter locations along tool path for the generation of final surface. The proposed algorithm includes the following two main steps: evaluating blank real surface shape and searching for adjacent non-isoparametric cutter locations, in the conditions to meet the the restrictions.

The algorithm shall be embedded in a virtual machining system that optimizes machining process, based on geometric simulation, to improve the process efficiency, under the assumption of reconfigurable machines architecture.

Besides the efficient cutting condition scheduling goal, there is the advantage by using such virtual machining system, represented by the optimized choosing of the tool for a specific operation and a specific blank. The example given is taking into account a reconfigurable machine configured as a lathe. However, the algorithm may be extended to all cutting processing.

Paper has the following structure: section 2 present the problem formulation, section 3 contains the problem solution and section 4 summarizes the main conclusions achieved.

## 2 Problem Formulation

### 2.1 Variables and terms definition

We formulate the problem of optimizing the values of cutting processing parameters to improve process efficiency.

In order to formulate the problem, to identify the issues involved and to find a solution, we need to define several variables according to our approach.

As shown in Fig.1, the insert cutting edge profile is divided defining remarkable  $m$  points. We are addressing to a current remarkable point on the cutting edge as  $j$  point. Similarly as depicted in Fig.2 the workpiece profile is divided in remarkable  $n$  points and we are referring to a current remarkable point on the workpiece profile as  $i$  point.

Current cutter location is described by  $(i,j)$  pair; while  $i$  is defining the current point on the workpiece profile (cutter location),  $j$  is current point on the cutting edge profile (cutter profile). Another variable in our optimization program is the variable  $k$ , which is the indexing variable for  $(i,j)$  pair. As described below, the reconfigurable machine is configured as lathe with an additional degree of freedom represented by rotation of the tool assembly ( $\varphi$  angle).

Our search algorithm is using as reference the previous cutter location  $(k-1)$ , as shown in Fig.2, representing the last selected cutter location. Consequently, every  $k$  position is associated with the  $\varphi(k)$ ,  $Z(k)$  and  $X(k)$  variable values.

In the proposed search algorithm we use the current  $L$  variable which is the length of active cutting edge (PQ arc), as seen in Fig.2.

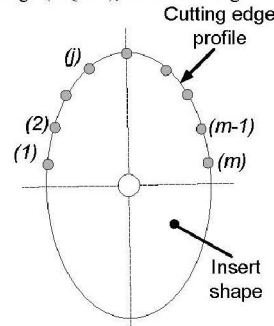


Fig.1 Insert shape

According to our approach there are several data to be used as input data:

Firstly, workpiece profile and cutting edge profile is inputted from their CAD models, as we assume that all tool modules are described in the database stored in the reconfigurable machine information system.

Secondly, the blank profile is determined by on-machine measurement. Thirdly, it is inputted the restricted variables: allowable force  $-F_a$ , allowable  $L$



10th WSEAS Int. Conf. on AUTOMATIC CONTROL, MODELLING & SIMULATION (ACMOS'08), Istanbul, Turkey, May 27-30, 2008

$-L_{a_s}$ , allowable chip thickness -  $a_a$ , allowable roughness  $-R_a$ .

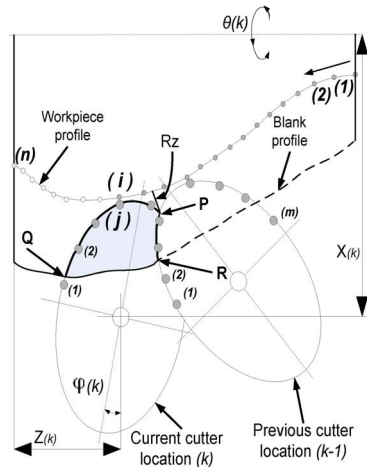


Fig.2 Current and previous cutter locations

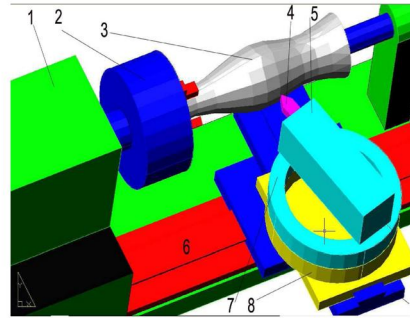


Fig.3 The reconfigurable lathe

The hardware modules (main spindle, tool holder, etc) are designed as “plug and play” and are controlled directly, by-passing the post processing phase of G-code generation. The control of the modules is performed by sending simultaneously successive position of controlled variables  $X(k)$ ,  $Z(k)$ ,  $\theta(k)$  and  $\phi(k)$  computed from  $(i, j)$  pair.

Part surface generation it is performed by moving tool profile along helicoidally generating path, obtained by combining revolution of the part and the translation of the tool. The helicoidally path it is divided, as described above, by coordinates computing of a many successive  $(i, j)$  pair points to control motors that performs movement of the machine modules.

## 2.2 Reconfigurable lathe description

For a better understanding, the reconfigurable lathe hardware configuration and the control system is described below.

Our proposed architecture for the reconfigurable lathe is composed of virtual processing planning system, machining database, and “plug-and-play” hardware modules.

The reconfigurable lathe considered is build out of four independent modules, numerical controlled, with independent sensor and motors. These modules are main spindle, carriage, and the rotary tool assembly. The reconfigurable lathe, configured for cutting of longitudinal profiles, as shown in the picture, is made of the following parts: bed 1, main spindle 2, workpiece 3, cutting tool 4, tool holder 5, carriage 6, rotary tool assembly 7, cross-slide 8, slideway 9. The supplementary degree of freedom represented by rotation of cutting tool is an advantage for tool positioning because by using interpolation for X and Z axes and the rotation of the tool it can be achieved peculiar surface processing. Configuration with rotary assembly tool parallel with the axis of the spindle can be used for processing complex surfaces such as poly-excentric surfaces, or cams.

## 2.3 Problem statement

Our objective is to determine  $(i, j)$  pair under the criteria of locally chip area maximization.

While the optimization criteria in the MRR and force model are the MRR and the force respectively, in our approach the search criterion is the locally chip area maximized.

In the above two approaches the variable for controlling the process is the feedrate, whereas we are using two distinct variables, cutter location (point  $i$ ) and cutter profile (point  $j$ ). The cutter profile variable is controlled by the additional freedom degree represented by rotary tool assembly.

In the case of MRR model the restricted variable is the chip area which is set to a minimum allowable level ( $A < A_a$ ), and in the case of force model, the restricted variable is the force ( $F < F_a$ ). Our approach defines four restrictions: ( $A_a > A(i, j)$ ,  $R_a > R(i, j)$ ,  $a_a > a(i, j)$ ,  $L_a > L(i, j)$ ). Concerning system monitoring our approach considers on-machine blank profile measurement.

The search technique used in our approach is exhaustive search by virtual machining.



### 3 Problem Solution

The main idea of the optimization algorithm is that, starting with the current  $i$  point on the part profile, generated by  $j$  point on the tool, the next  $i$  cutter location and the next  $j$  cutter profile are searched, taking into account the restrictions defined by the above restrictions, with the objective of maximizing chip area, in order to increase productivity.

For generation of certain  $i$  point on the workpiece profile, the tool must be positioned tangent to this profile in a  $j$  point.

For this current cutter position, it is computed the values of controlled variables  $A_{ij}$ ,  $L_{ij}$ ,  $a_{ij}$ ,  $R_{ij}$ . Afterwards it is checked the active cutting edge is intersecting blank profile. In the positive case the four restrictions are tested. The accepted positions are stored.

Fig.4 depicts the generation sequence for final workpiece surface, using optimization algorithm. The point  $i=21$  on the workpiece profile and the point  $j=16$  on the cutting profile describes the previous cutter location used for the searching of next cutter location to be reached when the workpiece is rotated with 360 degrees.

To achieve this, it is tested one at a time tool position for  $i=22$  and the cutter locations that verify restrictions are stored. The simulation it is finalized when it is found a  $i$  point on the final surface profile, for which all  $j$  points on the tool profile does not verify the four restrictions. Afterwards, it is searched pair points for which chip area is maximized for the given points ( the found pair is represented by points  $i=25$  and  $j=15$ ). The optimization algorithm is continued searching the next point referred to the last  $(i,j)$  pair location.

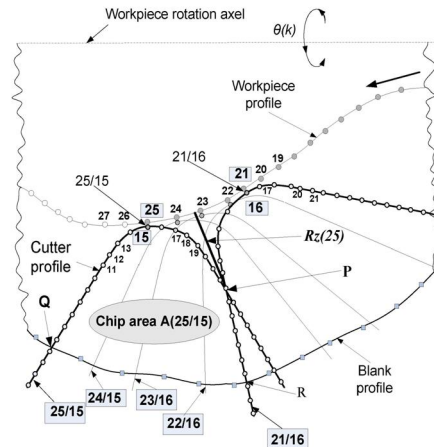


Fig.4 An example for search loop

Trajectory from point pair ( $i=21$ ,  $j=16$ ) to point pair ( $i=25$ ,  $j=15$ ), it is described by the points  $i=22, 23, 24$ , dividing the helix resulted from one revolution, in four intermediary steps, with coordinate  $X$ ,  $Z$  and  $\Delta\theta$ . All intermediary  $(i,j)$  pair coordinates are stored with their restricted variables.

In sort, as shown in Fig.4, the proposed algorithm contains the following steps.

Preparatory steps:

- 1) workpiece and tool CAD model are inputted;
- 2) the blank profile is on-machine measured;
- 3) the restricted variables values are inputted in the virtual manufacturing program.

Scheduling optimizing steps:

- 4) the tool profile it is positioned tangent with the final workpiece profile, successively in all points on the tool.
- 5) the four restriction for all tool positions are tested and for each one the computing results are stored.;
- 6) when all conditions are denied, then it is selected the intermediary position with maximum area;
- 7) the algorithm is repeated starting with 1) until the tool reaches the end of the workpiece profile; the software output is the  $(i,j)$  pair coordinates;
- 9) by processing cinematic configuration of the lathe the control variables values -  $X(k)$ ,  $Z(k)$ ,  $\theta(k)$  and  $\varphi(k)$  are obtained and then send to the modules .

10th WSEAS Int. Conf. on AUTOMATIC CONTROL, MODELLING & SIMULATION (ACMOS'08), Istanbul, Turkey, May 27-30, 2008

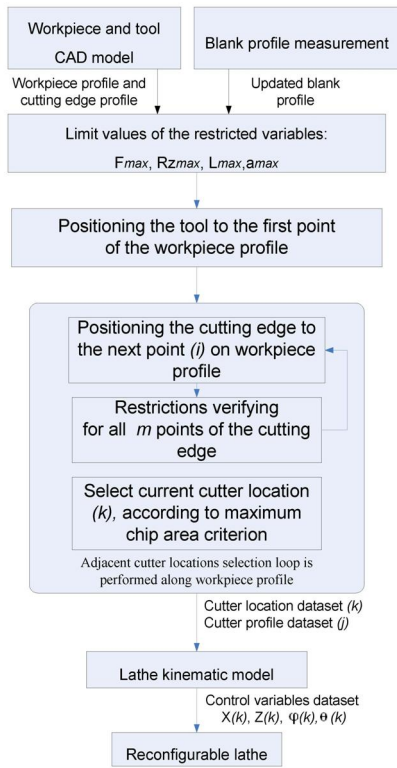


Fig.5 Algorithm basic steps

Algorithm testing was performed using the software developed in this research.

It is important to note that the experimental tests shown in the Fig.6 was executed using arbitrary scale and on few sequences, for an acceptable picture accuracy.

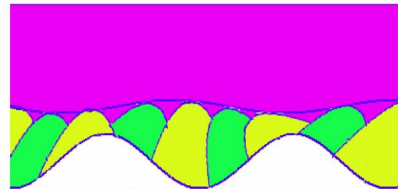
As shown in Fig.6, a) a image is representing the successive positions of the cutting edge using our algorithm and lathe architecture, whereas in b) and c) images it was simulated constant MRR based approach with a classical lathe architecture.

The yellow and green area depicts the cutting tool successive position.

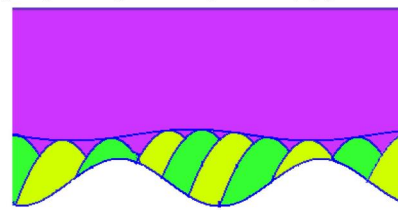
It was noticed an average efficiency improvement up to 20%, resulting a higher cutting productivity. Firstly, compared with the classical case, the additional freedom degree represented by rotary tool assembly is useful for an increased productivity. Secondly, the testing for the four restrictions, instead of one or two, assures that the process is correctly performed according to the specifications.

As seen in Fig.7, when the control is based on MRR approach, and there is no limitation concerning the length of the active cutting edge, it is possible to emerge a situation could cause instable process (chatter).

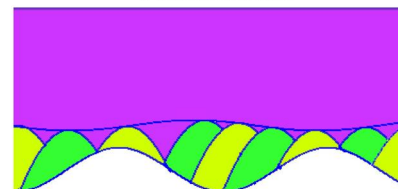
Furthermore, there is the possibility to undermine the roughness or chip width allowable values.



a) Proposed algorithm sequences -F,L,a,R restricted



b) MRR based algorithm sequences F and R restricted



c) MRR based algorithm F only restricted

Fig.6 Graphical representation of the cutter location and cutter profile during virtual machining

Some histograms is given bellow to demonstrate the performances of the algorithm. In the Fig.7 it is shown the situation seen in Fig.6, c showing the roughness, chip width and cutting edge length variations for each cutter location, to demonstrate the necessities of more than one or two restrictions.

Since chip width, active cutting edge length and roughness values are greater than the allowable values for the given example, (see Fig.7, a,b,c respectively), all four variables are required for the establishment of feedrate scheduling. It can be stated that is compulsory requirement for using more than

one restriction, in terms of process stability and technical specification.

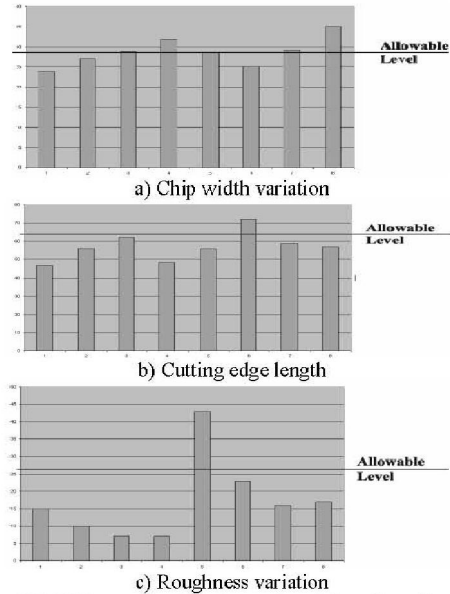


Fig.7 Histograms showing undermining allowable levels

#### 4 Conclusion

Compared with the classical case, the additional degree of freedom represented by rotary tool assembly is determining a 20% productivity increase.

The computation of all four restrictions instead of one or two assures that the process is correctly performed according to the specifications, and the processing parameters are in the allowable range.

#### Acknowledgement

The authors gratefully acknowledge the financial support of the Romanian Ministry of Education and Research through grant PN-II-ID\_653/2007.

#### References:

- [1] R. Galan, J. Racero, I. Eguia, J.M. Garcia, A systematic approach for product families formation in Reconfigurable Manufacturing Systems, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 23, 2007, 489–502
- [2] Jaspreet Dhupia, Bartosz Powalka, Reuven Katz, A. Galip Ulsoy, Dynamics of the arch-type reconfigurable machine tool, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 47, 2007, 326–334
- [3] X.I. Hwan Pyo Moon, Equivolometric offsets for 2D machining with constant material removal rate, *Computer Aided Geometric Design International 2007 Elsevier B.V*, Vol.X, No.X, 2007
- [4] Jeong Hoon Ko, Won Soo Yun, Dong-Woo Cho, Off-line feed rate scheduling using virtual CNC based on an evaluation of cutting performance, *Computer-Aided Design* 33, 2003, 383-393
- [5] Stanislav Makhanov, Optimization and correction of the tool path of the five-axis milling machine Part 1. Spatial optimization, *Mathematics and Computers in Simulation* 75, 2007, 210-230
- [6] Stanislav Makhanov, Optimization and correction of the tool path of the five-axis milling machine Part 2: Rotations and setup, *Mathematics and Computers in Simulation* 75, 2007, 231-250
- [7] B.S. Soa, Y.H. Jung b., T.R. Kurfess c, S.M. Hwang, 5-Axis machining speed enhancement by step length optimization, *Journal of Materials Processing Technology* 187–188 75, 2007, 2-5

2) **Online learning for batch machining control**, Marinescu V., Constantin I., Epureanu A., Banu M., Marin F.B., Proceedings of 10th WSEAS International Conference on AUTOMATIC CONTROL, MODELLING and SIMULATION (ACMOS '08), 2008 (indexata ISI).

ISI Web of Knowledge<sup>SM</sup>
Take the next step

---

All Databases
Select a Database
Web of Science
Additional Resources

---

[Search](#) | [Search History](#) | [Marked List \(0\)](#)

---

**ALL DATABASES**

---

[<< Back to results list](#)
[Record 1 of 1](#) [▶](#)

---

Online learning for batch machining control

Print
E-mail
Add to Marked List
Save to **EndNote@Web**
Save to **EndNote@, RefMan, ProCite**
more options

**Author(s):** [Marinescu V \(Marinescu, V.\)<sup>1</sup>](#), [Constantin IC \(Constantin, I. C.\)<sup>1</sup>](#), [Epureanu A \(Epureanu, A.\)<sup>1</sup>](#), [Banu M \(Banu, M.\)<sup>1</sup>](#), [Marin FB \(Marin, F. B.\)<sup>1</sup>](#)

**Editor(s):** [Demiralp M](#); [Mikhael WB](#); [Caballero AA](#); [Abatzoglou N](#); [Tabrizi MN](#); [Leandre R](#); [GarciaPlanas M](#); [Choras RS](#)

**Source:** ACMOS '08: PROCEEDINGS OF THE 10TH WSEAS INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTOMATIC CONTROL, MODELLING AND SIMULATION **Book Series:** ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING **Pages:** 114-118 **Published:** 2008

**Times Cited:** 0 **References:** 8 [Citation Map](#) beta

**Conference Information:** 10th WSEAS International Conference on Automatic Control, Modelling and Simulation Istanbul, TURKEY, MAY 27-30, 2008  
WSEAS

**Abstract:** Batch manufacturing is a widely used technique in today economy. The conceptual change of the way in which the manufacturing machines are controlled is the most important aspect in which is possible to In conform with the market demands so their reconfigurability would not affect competitiveness. The problem to be solved in this paper consists in a control method development for predictive control based on prediction of the controlled variables deviation values in respect with their programmed values. The basic idea is to use the data set obtained by monitoring the process during the manufacturing of the previous workpieces and during the current workpiece in order to predict the controlled variable value. The method proposed consists in determining of the causal relation between one controlled variable and the monitored variables and then predicting its value in order to compensate the deviation from the program.

**Document Type:** Proceedings Paper

**Language:** English

**Author Keywords:** in cycle online learning; reconfigurable machining system; adaptive control; predictive control; error compensation

**KeyWords Plus:** ERROR; TOOL

**Reprint Address:** Marinescu, V (reprint author), Dunarea Jos Univ, Mfg Sci & Engn Dept, 47 Domneasca St, Galati, Romania

**Addresses:**  
1. Dunarea Jos Univ, Mfg Sci & Engn Dept, Galati, Romania

**Publisher:** WORLD SCIENTIFIC AND ENGINEERING ACAD AND SOC, AG LOANNOU THEOLOGOU 17-23, 15773 ZOGRAPHOU, ATHENS, GREECE

**IDS Number:** BIB19

**ISBN:** 978-960-6766-63-3



## Online learning for batch machining control

MARINESCU V., CONSTANTIN I. C., EPUREANU A., BANU M., MARIN F.B.  
 Manufacturing Science and Engineering Department  
 Dunarea de Jos University  
 47, Domneasca St., Galati  
 ROMANIA  
 alexandru.epureanu@ugal.ro

*Abstract:* -Batch manufacturing is a widely used technique in today economy. The conceptual change of the way in which the manufacturing machines are controlled is the most important aspect in which is possible to conform with the market demands so their reconfigurability would not affect competitiveness. The problem to be solved in this paper consists in a control method development for predictive control based on prediction of the controlled variables deviation values in respect with their programmed values. The basic idea is to use the data set obtained by monitoring the process during the manufacturing of the previous workpieces and during the current workpiece in order to predict the controlled variable value. The method proposed consists in determining of the causal relation between one controlled variable and the monitored variables and then predicting its value in order to compensate the deviation from the program.

*Key-Words:* - in cycle online learning, reconfigurable machining system, adaptive control, predictive control, error compensation

### 1 Introduction

The characteristic aspects of the actual mechanical parts market are: *i)* the volume of orders has a lowering tendency; *ii)* the tendency of product customization implies accentuated diversity of shapes, dimensions and mechanical characteristics for the products solicited by the market; *iii)* the manufacturing machines flexibility and the reconfigurability tends to be the main characteristics which determine the manufacturers profitability; *iv)* the main direction in which is possible to progress in order to adjust the manufacturing machines to the market requirements is to change at conceptual level the manner in which they are controlled so the reconfigurability of the control system, according to the orders imposed by the market, to be done in technical and economical circumstances that do not affect the competitiveness.

This is why small batch manufacturing is widely used in today's economy. An appropriate solution for small batch manufacturing is to use of reconfigurable machines. But after reconfiguration stage, behavior of the reconfigurable machining system is generally unknown. The models for the manufacturing processes are also unknown. A lot of time must be spend in order to identify these unknown models because during system and process identification several experiments must be conducted. Moreover, the manufacturing system behavior is changing in time. This change implies

modification of both the model parameters and the causal relations between the model variables.

The solution reported in the literature in order to solve this problem consists in using an adaptive control system. Generally, for an adaptive control system the model structure remains unchanged but the parameters of the model are changed in order for a better modeling of the reality.

The identification is a repetitive and frequent process which requires stopping the machine, launching of specific experimental programs and numerical data processing. This requires time thus affects efficiency.

Solutions reported in the literature for model parameter evaluation are based on several algorithms. In most cases these algorithms consists in two stages:

- obtaining of experimental dataset from the sensor system and
- fitting the system model over the dataset.

For obtaining the dataset several solutions are proposed:

- 1-manufacturing process is stopped and then measurements are made upon the system [1], [2],
- 2-machining and measuring of test workpieces [3],
- 3-current workpiece is measured during its machining [4],
- 4-measurement is made during the entire batch manufacturing [5].

Model fitting over the dataset is usually done using analytical techniques [6], techniques based on

artificial neural network or on genetic algorithms [7].

The main drawbacks which emerge from applying the techniques reported in the literature are: 1-some of them are time consuming techniques requiring the machine stop and launching specific procedures,

2-model parameters evaluation require many experiences (neural network case) thus the first workpieces have no benefit from using the adaptive system,

3-some of the approaches are used only to control a single variable thus other important components will remain uncontrolled and will affect in a negative way the output control,

4-in all the cases it is assumed that the model causal relations remain unchanged even though this assumption is not always confirmed in practice.

In this paper an online learning algorithm is proposed in order to overcome these drawbacks. The algorithm is applied as a single whole to determine several models which describe different aspects of the system behavior such as machining errors, tool wear, or process stability for example.

Moreover, the dataset is filled only using the monitoring system, without stopping the process or using a test workpiece.

A feature of the proposed algorithm is that includes in a unitary manner both the model update and model use for corrections estimation.

Each algorithm running consists in determination of the causal relations between state variables and in generation of the best linear model describing manufacturing system and process. The model is then used for preventive control of the current workpiece so that its deviations are compensated. Thus the control error is actually the prediction error. Algorithm is permanently run during the batch machining so it can detect the systems evolution.

The algorithm design allows its use with few previous workpiece, because it includes a procedure for working with small datasets.

The remainder of this paper is organized in four sections. Formulation of the problem is presented in section 2. The proposed algorithm along with the results of simulations using artificial data and data resulted from laboratory experiments are presented in section 3. A comparative analysis of the results obtained using the algorithm and the results obtained using a neural network technique is also presented in section 3. Section 4 contains the main research conclusions.

## 2 Problem Formulation

The problem solved in this paper arises from the following remarks:

1- In manufacturing process the measurement of the process controlled variables can be sometime done with big delay in respect with to the control action; thus a classical control approach based on error driven controllers does not always avoid the appearance of rejection parts.

2-After reconfiguration stage, the reconfigurable machining system is not known and the model for the machining process is not available.

3- The model parameters values and the causal relations on which the model is based change during the batch manufacturing.

The problem to be solved in this paper consists in development of a method for predictive control, based on prediction of deviation of the controlled variables values with respect to their programmed values. Also the control must be adaptive for discerning manufacturing system and process dynamics.

The basic idea is to use the dataset obtained by monitoring the process during the manufacturing of the previous workpieces and during the current workpiece in order to predict the controlled variable value. The predicted value will be used for minimizing its difference with respect to the programmed value. For this purpose a specific online learning algorithm should be used.

Moreover, the proposed method involves integration of the system behavior identification stage with the resulted model using stage for obtaining the predicted values.

Finally, instead of using global models, the simple, local and ephemeral models will be preferred.

## 3 Problem Solution

### 3.1 Control scheme

Using reconfigurable machining systems for batch production involves some variables to be predicted and compensated. As the mathematical models are unknown, the control algorithm should consist in three phases:

- Learning phase- consisting in identification of the causal relation between the predicted variable, which will be called variable of interest, and the other variables,
- Prediction phase- consisting in variable of interest value determination,

- Compensation phase- representing the action for difference nulling between the programmed value and the predicted value.

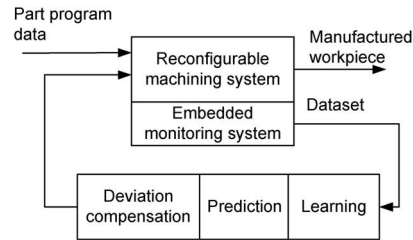


Fig 1. Scheme of predictive control based on online learning

We shall consider several machining cycles which will produce several workpieces. The machining surface will be divided in several zones (I, II, III, IV in Fig. 2). Each zone length is adopted so that the correction required is constant over the entire zone.

Each work cycle will be divided in a number of stages (figure 2) which are: measuring stages or prediction and compensation stages for each zone in which the part was divided.

Workpiece number	Stage	Variables						
		V1	V2	V3	V4	V5	V6	
n	4		○					variable of interest current stage
	3			•				
	2				⊕			
	1					•	•	
n-1	7		•					Work cycle
	6	⊕						
	5							
	4		⊕					
	3			•				
	2				⊕			
	1					•	•	

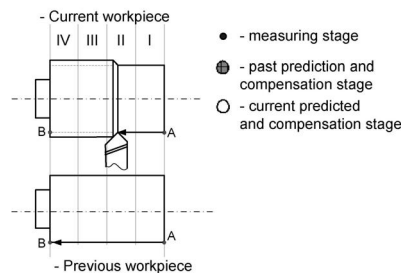


Fig 2. Dataset filling and exploiting

During a measuring stage the variable values are measured using sensors embedded on machine. During a prediction stage only one variable, the variable of interest, will be predicted and compensated in order to null the deviation from the programmed value, before its appearance in the process. Finally for each variable of interest, a measuring stage will be performed in order to record the real value of the variable. A specific online learning algorithm will be used for identifying the model of the variable of interest. The dataset used by the algorithm is composed by the variables values recorded from the current workpiece until the current stage and also for all previous workpieces.

Let us consider a simple workpiece which is turned and tool path AB is divided in four zones (figure 2). In current moment the cutting tool machines the zone II. During the process six variables  $V_1..V_6$  are monitored. All the variables are measured and some of them ( $V_1$ ,  $V_2$  and  $V_4$ ) are predicted and then compensated based on their predicted values. The workcycle was divided in seven stages which three are prediction and compensating stages and four are measuring stages. For instance, stage 1 is a measuring stage which consists in measuring  $V_5$  and  $V_6$  variables. If for the current workpiece, the current stage is a prediction and compensation one, the variable of interest value would be predicted using a specific online learning algorithm which use the measured values during the current work cycle until the current stage and all the records from the dataset which contain the measured values for all the past workcycles. For the case shown in Fig. 2, the current stage is 4, the variable of interest is  $V_2$ , the variables for which the values were already measured are  $V_3$ ,  $V_5$  and  $V_6$ . A model will be build using these variables values and also using all the variables values recorded for the previous workpieces.

### 3.2 The proposed online learning algorithm

The proposed algorithm consists in the following steps:

- In the first step the normalization of the dataset is performed. Also the time evolution of the system is compensated. In practice the evolution of the variables values is quite monotonous and slowly varying with respect to the time period required for the entire batch manufacturing. Thus a linear model would fit properly the time evolution for the entire dataset. In this linear model, the time variable will be measured by the workpiece index number. The model structure will be:

$$\hat{V}_i(t) = a_i \cdot t + b_i \quad (1)$$

where  $i$  denotes the order number of the variable,  $\hat{V}_i(t)$  is the evaluated value of the variable  $V_i(t)$ ,  $t$  is the index number of the workpiece and  $a_i$  and  $b_i$  are constants, specific for variable  $V_i$ . All the variables will be compensated using the following formula:

$$V_{ic}(t) = V_i(t) - \hat{V}_i(t) \quad (2)$$

where  $V_{ic}(t)$  is the compensated value of the variable  $V_i(t)$ .

A new dataset which will contain the time compensated values for all the variables will be filled.

- In the second step all the monitored variables will be structured in all the possible combinations. Each combination contains a group of variables which always includes the variable of interest. These variable groups represent all the possible causal relations. For instance, in the example presented in Fig. 2, the variable of interest  $V_2$  could be modeled only using the measured in current workcycle variables  $V_3(n)$ ,  $V_5(n)$  and  $V_6(n)$ . This is why the causal relation can appear on one of the following groups:

$(V_2-V_3)$ ,  $(V_2-V_5)$ ,  $(V_2-V_6)$ ,  $(V_2-V_3, V_5)$ ,  $(V_2-V_3, V_6)$ ,  $(V_2-V_5, V_6)$ ,  $(V_2-V_3, V_5, V_6)$

- In the third step for each variables group a data subset will be filled by selecting from the entire dataset only the data corresponding to a number of  $k$  workpieces. These  $k$  workpieces will be selected so their Euclidian distance to current workpiece, corresponding to the selected variables group, taking in account only the selected group's variables, would have the smaller values.

- In the fourth step for each data subset a linear model is fitted. This model should have as variables only those contained in this variables group. The coefficients of the linear model are computed using least square criterion.

- The next step implies the evaluation of each model. This evaluation is based on the deviation for each value of interest from the selected subset.

- In the sixth step the best linear model for fitting the causal relation between the variable of interest and the rest of monitored variables is selected. The model is the one for which the standard deviation of the variable of interest values is the lowest.

- The final step consists in the compensation action. The difference between the predicted value and the programmed value of the variables of interest is compensated.

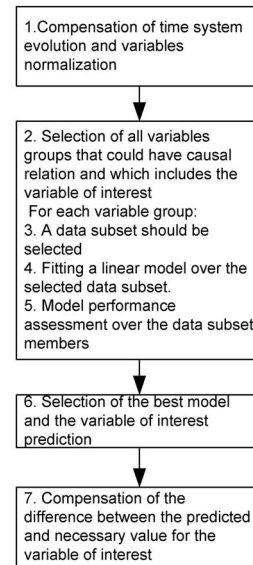


Fig. 3. The proposed online learning algorithm.

### 3.3 Numerical and physical simulation results

The proposed control method was applied on artificial data and on data obtained from batch manufacturing in laboratory conditions. The obtained results were compared with the results obtained by using ANN models and best NN model facility.

#### Results obtained by simulation with artificial data

For a small number of previous manufactured workpieces best NNmodel did not identified the correct causal relation,

For a larger number of previous manufactured workpieces best NNmodel did identify the correct causal relation but the prognosis performance was low.

The proposed algorithm identified the correct causal relation in all the cases and the variable of interest was predicted with a average of 10% error.

#### Results obtained by data obtained from batch manufacturing in laboratory conditions

The physical simulations consisted in straight turning of a batch of 81 workpieces having the shape shown in Fig. 4.



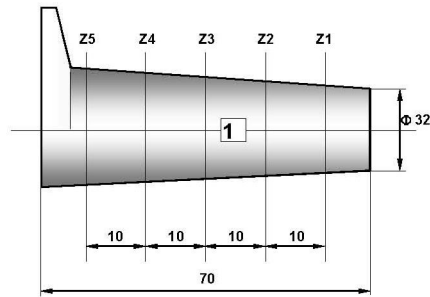


Fig 4. The blank used for simulation

During the machining several variables were monitored: cutting force, temperature of the cutting tool, power consumption in cutting process.

By applying the proposed algorithm, the average value of the workpiece errors decreased with more than a size range and the standard deviation decreased with 38%.

#### 4 Conclusions

The research shown in this article pointed out the following conclusions:

- taking in account the time evolution of the system behavior, both with respect to the causal relations between the state variables and to the parameter values of the model, is important because it significantly increase the overall control performance,
- the proposed algorithm works well for all the batch workpieces even for the first machined workpieces,
- the general character of the approach permits the algorithm to be applied irrespectively of the nature of the controlled variable,
- the reduced running time required by the algorithm allows its use for online correction,
- good results were obtained by applying the algorithm for the predictive dimensional control in turning processes.

#### Acknowledgement

The authors gratefully acknowledge the financial support of the Romanian Ministry of Education and Research through grant PN-II-ID\_653/2007.

#### References:

- [1] A. Caballero-Ruiz, Leopoldo Ruiz Huerta, Tatiana Baidyk, Ernst Kussul Geometrical error analysis of a CNC micro-machine tool,

*Mechatronics, Volume 17, Issues 4-5, May-June 2007, Pages 231-243*

- [2] S.-H. Yang, K.-H. Kim, Y.K. Park and S.-G. Lee, Error analysis and compensation for the volumetric errors of a vertical machining centre using a hemispherical helix ball bar test, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* Volume 23, Numbers 7-8/ April, 2004
- [3] S. Segonds, Y. Landon, M. Mousseigne and P. Lagarrigue, The characterization of the dimensional change of the Z-axis in NC turning, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 23,
- [4] Ho-Sang Kim, Eui-Jung Kim, Feed-forward control of fast tool servo for real-time correction of spindle error in diamond turning of flat surfaces, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 43, Issue 12, September 2003, Pages 1177-1183 ,
- [5] X. Li, Real-Time Prediction of Workpiece Errors for a CNC Turning Centre, Part 4, Cutting-Force-Induced Errors, *The International The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 17, Number 9 / May, 2001
- [6] P.-C. Tseng and J.-L. Ho, A Study of High-Precision CNC Lathe Thermal Errors and Compensation, *The International The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 19, Number 11 / June, 2002
- [7] H. Pahk and S.W. Lee, Thermal Error Measurement and Real Time Compensation System for the CNC Machine Tools Incorporating the Spindle Thermal Error and the Feed Axis Thermal Error *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 20, Number 7 / September, 2002
- [8] L. Jian and L. Hongxing, Modeling system error in batch machining based on genetic algorithms, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* Volume 43, Issue 6, May 2003, Pages 599-604

3) **Holonic based approach to machine vision**, Marin F.B., Epureanu A., Banu M., Marinescu V., Constantin I., Proceedings of 10th WSEAS International Conference on AUTOMATIC CONTROL, MODELLING and SIMULATION (ACMOS '08), 2008 (indexata ISI)

ISI Web of Knowledge<sup>SM</sup>
Take the next step

All Databases
Select a Database
Web of Science
Additional Resources

Search
Search History
Marked List (0)

**ALL DATABASES**

<< Back to results list
Record 1 of 1 >>

### Holonic based approach to machine vision

Print
E-mail
Add to Marked List
Save to EndNote<sup>Web</sup>
Save to EndNote, RefMan, ProCite

more options

**Author(s):** Marin FB (Marin, F. B.), Epureanu A (Epureanu, A.), Banu M (Banu, M.), Marinescu V (Marinescu, V), Constantin I (Constantin, I)

**Editor(s):** Demiralp M; Mikhael WB; Caballero AA; Abatzoglou N; Tabrizi MN; Leandre R; GarciaPlanas M; Choras RS

**Source:** ACMOS '08: PROCEEDINGS OF THE 10TH WSEAS INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTOMATIC CONTROL, MODELLING AND SIMULATION **Book Series:** ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING **Pages:** 255-260 **Published:** 2008

**Times Cited:** 0 **References:** 11 📄 Citation Map beta

**Conference Information:** 10th WSEAS International Conference on Automatic Control, Modelling and Simulation  
Istanbul, TURKEY, MAY 27-30, 2008  
WSEAS

**Abstract:** This paper presents an image processing procedure to detect and measure the insert and blade holder profiles and positions. A holonic approach is considered in this paper whereby objects identification in the scene is performed by basic regions (color based identification) merging in wider regions to meet geometrical description. Specifying relationships between the image components and formulating queries that search for objects, their other associated characteristics, is performed by a language for this specific problem. The proposed method is shown to be effective and suitable for the unmanned measurement of insert and blade holder online identification. Moreover, the proposed approach has the potential to deal with scene object identification problems.

**Document Type:** Proceedings Paper

**Language:** English

**Author Keywords:** tool condition monitoring; machine vision; holonic distributed intelligence; reconfigurable machining system; holarchy

**KeyWords Plus:** SEGMENTATION; SYSTEMS; IMAGE

**Publisher:** WORLD SCIENTIFIC AND ENGINEERING ACAD AND SOC, AG LOANNOU THEOLOGOU 17-23, 15773 ZOGRAPHOU, ATHENS, GREECE

**IDS Number:** BIB19

**ISBN:** 978-960-6766-63-3

## Holonic based approach to machine vision

MARIN F.B., EPUREANU A., BANU M., MARINESCU V., CONSTATIN I.  
 Manufacturing Science and Engineering Department  
 Dunarea de Jos University from Galati  
 Domneasca St. 47  
 ROMANIA  
 alexandru.epureanu@ugal.ro <http://www.ugal.ro>

*Abstract:* - This paper presents an image processing procedure to detect and measure the insert and blade holder profiles and positions. A holonic approach is considered in this paper whereby objects identification in the scene is performed by basic regions (color based identification) merging in wider regions to meet geometrical description. Specifying relationships between the image components and formulating queries that search for objects, their other associated characteristics, is performed by a language for this specific problem. The proposed method is shown to be effective and suitable for the unmanned measurement of insert and blade holder online identification. Moreover, the proposed approach has the potential to deal with scene object identification problems.

*Key-Words:*- Tool condition monitoring, Machine vision, Holonic distributed intelligence, Reconfigurable machining system, Holarchy

### 1 Introduction

Previously, we proposed a new lathe architecture with the reconfigurable machining system in mind. The reconfigurable virtual processing presume knowing the insert profile, in order to perform virtual processing. The new lathe architecture specific feature is represented by a additional rotation degree of cutting holder. As represented in Fig.1, our optimization algorithm presumes knowing remarkable points on the cutter tool in order to improve cutting process performance.

The reconfigurable architecture needs that the new tools introduced to be measured and their description to be stored in the data base system.

The some, there is the issue of collision detection in the simulation phase, where the blade holder profile needs to be known. These goals are to be reached using machine vision techniques.

In order to identify unknown tools to be stored in the system, we need to design a robust on-machine vision-based measuring system for unknown environments. The first aim is to identify remarkable points on the cutter in the commonly situation of tool error positioning. Another aim is to optimize utilization of rest tool life travel in order to minimize production costs. Once useful values for parameters describing the degree of tool wear from a measuring process is known, the control of the machine tool will be performed accordingly.

In this paper we propose a new approach for machine vision procedure in order to achieve objects identification in the scene by reaching two goals:

- (i) partition the image into homogeneous regions, and
- (ii) accurately track the boundary for each object, based

on certain geometric properties described by a specific language and measure it. Our aim is the identification of insert tool, blade holder profiles and than to identify remarkable points on the profiles.

The application of machine vision to measurement of tool has been of great interest in the research community in recent years [1][2]. Several solutions have been proposed, such as geometric descriptors [3] necessary information to carry out the classification or threshold-independent edge detection method based on moment invariance [4].

Most of the researches used well known techniques and algorithm from artificial vision field. Whereas other TCM (Tool condition monitoring) approach aim is to measure insert chip profile, we also need to identify several components of the scene.

Segmentation, defining the action of grouping process in which the component of a group is similar with respect to some features, is a very important part of image processing. An image comprising boundaries is a much higher level representation of the scene, as it represents the information explicitly. One segmentation method is region growing, by grouping elemental area which share as common feature into large connected "regions", aiming that the regions found to correspond to real-world object. While the proposed algorithm in the literature criteria for the merging is the color, we need to define certain conditions besides color, such as geometric description, defined by a "ambiguous" language.

In the last decade, researchers have developed numerous approaches concerning segmentation including Markov Random Field [5], pre-segmentation

and hierarchical representation [6], or the Image Foresting Transform [7]. Our proposed algorithm is using the holonic concept to reach these aims.

The new holonic concept has been introduced by the philosopher Arthur Koestler. He noted that in every order of existence the non-interacting entities did not exist and parts and wholes in an absolute sense do not exist in the domain of life. Consequently, the relation that entities can be seen to lie in is defined as holarchy. He called systems of such entities Open Hierarchical Systems (OHS) and these have subsequently been called holarchies. Every identifiable unit of organization comprises more basic units while at the same time is forming a part of a larger unit, being subject of a part of a larger unit. A holon, as Koestler defined the term, is an identifiable part of a system that has a unique identity, but is made up of sub-ordinate parts being a larger whole.

Parts and wholes in an absolute sense do not exist in the domain of life. "The [holarchy] is open-ended in the downward, as it is in the upward direction".

Shop floor control architectures have been proposed to describe manufacturing future factory using holonic manufacturing concept [8][9][10][11]. To apply these ideas towards new manufacturing systems, several research programs have been started (Intelligent manufacturing system -IMS-program proposed by Japan) or Next Generation Manufacturing (NGM) and Visionary Manufacturing Challenges for 2020 (VMC2020) projects funded by United States. However, the general trend is to apply holonic concept to the shop floor level only, and not at the machine control level.

There are several similarities with multi agent concept such as basic features: autonomy, beliefs, desires, and intentions (BDI), cooperation and coordination, organization, communication, negotiation.

According to us, the difference between holons and agents is represented by the additional features of holons comparing to agents - the recurrence defining holarchies. In this sense, one holon is formed of subordinated several holons, that may be formed of other subordinated holons. There are several reciprocal features of the holon defining interacting capability: is autonomous to their subordinated holons, is dependent to its higher levels holons, and is autonomous and acts in co-ordination with other holons on the some level.

The permeability between holons are however limited by the relations between them. For instance, considering the society model described by Koestler, the cells building tissue of an organ (a holarchy of cells), do not interact with an another organ (holarchy of tissues).

As far as we are concerned, a holon may be a computational entity or a computational entity associated with a physical part, such as translation hardware module in a machine.

We consider that the merging of machine vision and holonic distributed intelligence is a very important step toward high performance algorithms to identify scene.

A holonic approach is considered in this paper whereby objects identification in the scene is performed by basic regions (color based identified) merging in wider regions to meet geometrical description. Specifying relationships between the image components and formulating queries between holons that search for objects, is performed by a language specific for this specific problem. However, the holonic based approach for artificial vision may be used in other application with multi objects scene.

## 2 Problem Formulation

In this study we will focus on the problem of object recognition in the scene in order to identify insert and blade holder profiles. We need to identify unknown tool without the help of operator, building an unmanned measurement system.

In the Fig.1 is depicted the remarkable points identification problem. Our proposed optimization algorithm presumes knowing remarkable points on the insert in order to improve cutting processing. The optimization algorithm implies knowing exact position of the remarkable points on the insert in order to process using the additional rotation freedom degree. The issue is that every mounting of the cutter on the machine will imply error positioning. Primarily issue to be solved, the identification of remarkable points on the profile is the must have for our proposed lathe architecture control. Secondly, we need to identify blade holder profile in order to solve collision problems. The insert is described by the exact position of remarkable points on its profile. As a inference, we need to know the exact position of the remarkable points, and not the profile points position only. The position of the remarkable points cannot be determined as a translations error only, but is determined by the rotation error as well. Consequently using contour only detection algorithm in the condition of unknown scene is not appropriate. The position 1, depicted in black, as shown in Fig.1 is describing the ideal position and the remarkable points 1,2,3..n. The second position it is representing the real position of cutter with positioning errors and its remarkable 1',2',3'..n' points. The remarkable points needs to be identified, in their successive order, and the coordinates needs to be calculated reported to the camera reference point, which is known. Further, the remarkable points coordinates in the machine reference system is calculated by the intermediary of camera reference coordinates and tool holder coordinates (outputted by the sensors of X and Z axes).



10th WSEAS Int. Conf. on AUTOMATIC CONTROL, MODELLING & SIMULATION (ACMOS'08), Istanbul, Turkey, May 27-30, 2008

In order to identify remarkable points on insert profile and blade holder profile, we need to identify objects in the scene.

Object recognition is a fundamental task of machine vision, usually deals with the following situation: one observes a scene, extracts some features, and uses them to assert if certain objects are present in the scene, and what are their accurate positions. In the basic form of this task, called localization, the identity of the object is known. A different and more difficult task is identification, where the information about the object is its membership in some known shapes of objects. The identification task is to discover both the shape and the position of the target object. If the objects are identified by certain colors and/or intensity the objects are easier to be identified.

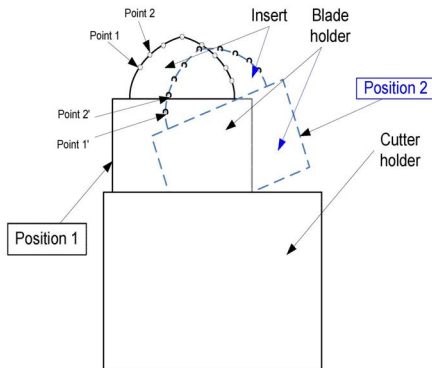


Fig.1 Cutter remarkable points identification scene

In our case, there are different types of cutter and insert, and the issue, from the artificial vision algorithm point, is that there are a vast variety of colors and geometric configuration. As seen in Fig.2 the scene is composed of varying colors areas, and we encounter in the practice tools that interact with coolant, have small rust areas, the insert color is modified due to hard working condition, etc. We aim to identify insert profile, measure the profile, identify positioning relative to a point in the scene, identify blade holder and measure its profile.

Also, our proposed reconfigurable lathe architecture implies inputting new cutter information in the database system. As a consequence, it is a challenge to build an unmanned measurement system. There is also the issue of describing the scene in order to identify objects. Traditionally, it is the aim to establish "correspondence" between different images of the same scene, that is to determine which region in one image corresponds to which or region in another image, to identify different

object in the scene. Such corresponding points or regions are then used to triangulate the position.



Fig.2 Cutter scene

### 3 Problem Solution

Usually in order to identify objects, the algorithm starts scanning from the first pixel of the first column. This scanning is repeated for all the rows to detect the contour of the profile.

According to our approach the holons are placed randomly in the scene, and their first task (individual goal) is to determine objects with the some color features.

The geometric matching process consists of two stages: identifying regions and merging the regions and building the objects. During the regions identification stage, the holons scans the image starting with their position until they occupy the area with the some color. In the second stage the holons negotiate to form new holons (which occupies objects to be searched), as described by an "ambiguous" language description. The language describing the scene is using relevant information, the some human perception acknowledge visual information to describe scene. Geometric matching algorithm extracts geometric features from the language describing the scene. The algorithm organizes and stores these features and the spatial relationships between these features in a manner that facilitates faster searching in the inspection image. For instance, our scene could be described as being composed of two objects, one with triangular or rectangular, and a second object with a greater area than the first one, of cvasi-rectangular form. However the language is not subject to this paper and will be further developed in our research.

As seen in Fig.8, the algorithm have identified two objects described by the language. The blur contour is the image resulted and the contours of the regions are drawn with blank lines.

In the case tested, will be simply to describe a cutting tool as being divided by insert and blade holder. In Fig.5 is represented the basic steps to follow in the scene identification according to our proposed holonic approach. Consecutively, the holons select regions (the state of the scene is depicted in Fig.2), the holons

negotiate with their neighbors the unification, and they precede unification if agreed by partner holons. Afterwards regions that do not belong to any holons (the areas showing significantly color difference and considerable small size) are embedded in existing holons. The final step is to identify objects and measure them.

In the Fig.3 is showed the intermediary step of occupying regions by the holons. Holons 42 and 6 are occupying the regions with the some color features and will form a new holon, holon no 264 (depicted in Fig. 4), representing an area with the some characteristics. The some holon 31 along with other holons will form a new holon, "the red region holon". The other holons, such as holon no 77 are going to scan further to occupy regions.

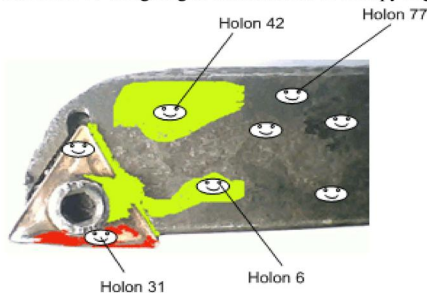


Fig. 3. Holons occupying regions intermediary step

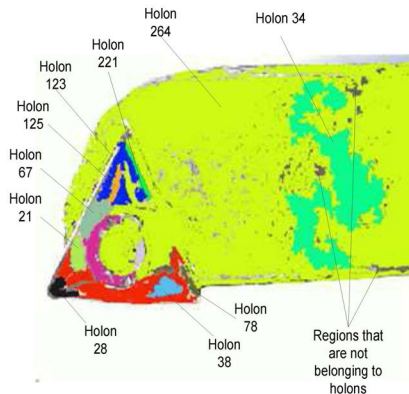


Fig. 4 Holons regions after the first stage

As depicted in Fig.4, in the first stage the holons are scanning the image and identify regions. The yellow, green, red, blue, etc areas are the regions identified by holons, so when referring to an region, we use the name of the holon occupying it. An intermediary step is to be completed between the two stages, as there are regions not belonging to any holons. These regions are those regions with a considerable variation of color with

considerable small area. The regions will be subject to negotiation between neighbor holons and included in their region.

In the second stage the holons are negotiating with all neighbor holons to form a new holon, representing the object identified (insert or blade holder). As seen in Fig.6 three neighbor holons negotiated and reached the conclusion that by their unification will result a new holon (Holon 221) which is a object to be searched. It is to be noted that the negotiation process is done only between neighbors not between all holons. After forming a new holon, this will continue negotiation with other neighbor holons.

They have a common goal as a group and that is to devise the scene in the recognizable objects, the insert and the blade holder.

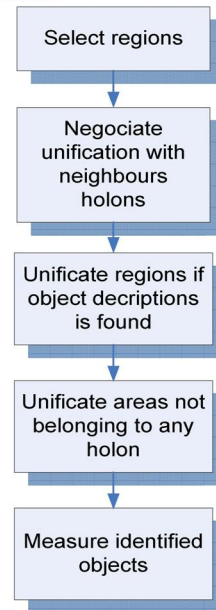


Fig.5 Conceptual algorithm using holonic approach

The holons will work under certain conditions which specifies the geometric description (common goal), and that of identifying a regions with the some color features (individual goal). A soft constraint is a rule to decide among several alternatives. To better compute the possible unifications of the holon, it is necessary to associate possible searched objects to each possible alternative.

10th WSEAS Int. Conf. on AUTOMATIC CONTROL, MODELLING & SIMULATION (ACMOS'08), Istanbul, Turkey, May 27-30, 2008

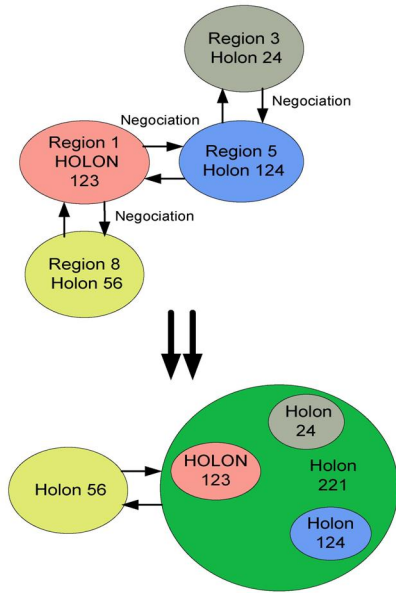


Fig.6 Holon negotiation to form new holon

One holon takes into account these alternatives in order to decide whether to accept a “merging” proposal or not. The negotiation is composed of several small negotiations where geometric features are discussed individually.

Holons do have some objectives such as a minimizing the number of regions in the scene and getting the best geometric feature description possible. It is noticed that in our test case there are two levels of holarchies. One is represented by the colour regions holons, composed of holons occupying the some colour area, the second one, the object holons composed of holons occupying several regions (of different colour).

The third is the tool holon composed of two holons, cutter holon and blader holder holon. The importance of holarchy recurrence is obvious in the second stage. There are two situation to be considered: two or more holons are in the some objects area, when due to their “merging” features will form a new holon (composed of several holons), with the only individual goal to identify region, and secondly, holons observe that there are areas not belonging to any holons, which implies that one holon will “born” another holon to occupy the area. In the Fig.7 it is represented the holarchy recurrence feature, as three holons, are merging into one, they

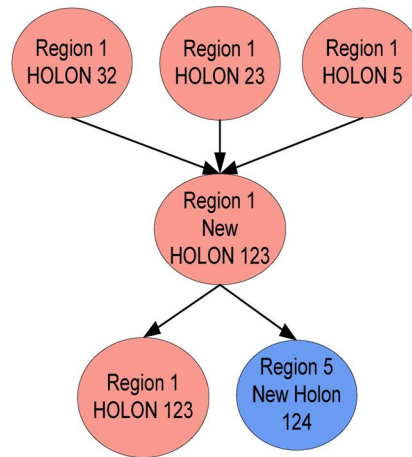


Fig.7 Holon recurrence

negotiate and consider that their united areas will form an object searched. Relatively to other situation, one holon may divide into two, as there is a neighbor area not belonging to any holon. As stated above, some holarchy permeability is limited. For instance a “red region holon” will not be able to be a part of “blue holarchy”, but the “blue holarchy” and the “red holarchy”, along with other holarchies, are forming the “cutter region holarchy”.

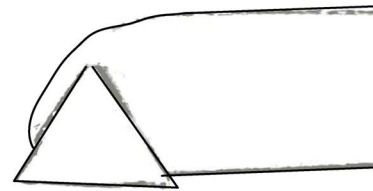


Fig.8 Two objects identified by their geometric description

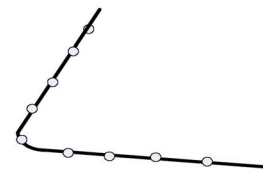


Fig.9 The remarkable points on the cutter profile

In the Fig.8 it is shown the objects identified as insert and blade holder. The remarkable points are successfully identified on the cutter profile using holonic distributed intelligence concept as seen in Fig.9. The points on cutter are used to compare with previous profile (if is not

10th WSEAS Int. Conf. on AUTOMATIC CONTROL, MODELLING & SIMULATION (ACMOS'08), Istanbul, Turkey, May 27-30, 2008

the first time when tool is identified) and the tool wear is determinate. The results of proposed approach for unmanned scene identification showed that the proposed algorithm in this paper is affective for an on-machine unmanned tool measurement.

#### 4 Conclusion

A classical approach of cutting tool identification using machine vision fails to provide precision identifying of unknown tools, in the condition of various colors that might represent scene. A holonic approach is considered in this paper whereby objects identification in the scene is performed by basic regions (color based identified) merging in wider regions to meet geometrical description by intermediary of holons. Specifying relationships between the image components and formulating queries that search for objects, their other associated characteristics, is performed by a language for this specific problem. The proposed method is shown to be effective and suitable for the unmanned measurement of insert and blade holder. Moreover, the proposed approach also has the potential to deal with scene object identification problems.

Several topics remain to be studied in the future. First, a methodology to rapidly refine the language describing scene in order to accurately identify other objects needs to be developed. Second, since the identification of the scene is based on single non-moving camera it is a challenge to identify a 3D space using several cameras. Third, stress must be put on the development of the inter-negotiation language between holons.

#### Acknowledgement

The authors gratefully acknowledge the financial support of the Romanian Ministry of Education and Research through grant PN\_II\_ID\_653/2007.

#### References:

- [1] H. H. Shahabi & M. M. Ratnam, In-cycle monitoring of tool nose wear and surface roughness of turned parts using machine vision, *International Journal Adv Manufacturing Technology*, 2008
- [2] K. Niranjana Prasad, B. Ramamoorthy, Tool wear evaluation by stereo vision and prediction by artificial neural network, *Journal of Materials Processing Technology*, 43-52, 2000
- [3] M. Castejoa, E. Alegrea, J. Barreiroa, L.K. Hernandez, On-line tool wear monitoring using geometric descriptors from digital images, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 47, 43-52, 2007
- [4] W.H. Wang, G.S. Hong\*, Y.S. Wong, Flank wear measurement by a threshold independent method with sub-pixel accuracy, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 199-207, 43-52, 2005
- [5] Dongxiang Xu, Jenq-Neng Hwang, Segmentation of Multi-Channel Image with Markov Random Field, *Journal of VLSI Signal Processing* 31, 45-55, 2002
- [6] Pablo Arbela, Laurent Cohen, A Metric Approach to Vector-Valued Image Segmentation, *International Journal of Computer Vision* 69(1), 119-126, 2006
- [7] Felipe P.G. Bergo, Alexandre X. Falcão, Paulo A.V. Miranda, Leonardo M. Rocha, Automatic Image Segmentation by Tree Pruning, *Journal Mathematic Imaging Vision* 141-162, 2006
- [8] Radu F. Babiceanu, F. Frank Chen, Development and applications of holonic manufacturing systems: a survey, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 17, 111-131, 2006
- [9] Fan-Tien Cheng, Chih-Feng Chang, Shang-Lun Wu, Development of holonic manufacturing execution systems, *Journal of intelligent manufacturing*, 253-267, 2004
- [10] M. K. Tiwari, Samrat Mondal, Application of an Autonomous Agent Network, *Journal Math Imaging Vision* 29- 141, 2007
- [11] Nebil Buyurgan, Can Saygin, An integrated control framework for flexible manufacturing systems, *International Journal Adv Manufacturing* 1248-1259, 2005



**4) Manufacturing machines – a holonic approach**, Epureanu A., Marin F.B., Marinescu V., Banu M., Constantin I., Proceedings of 10th WSEAS International Conference on AUTOMATIC CONTROL, MODELLING and SIMULATION (ACMOS '08), 2008 (indexata ISI)

ISI Web of Knowledge<sup>SM</sup>
Take the next step

All Databases
Select a Database
Web of Science
Additional Resources

Search
Search History
Marked List (0)

ALL DATABASES

<< Back to results list
Record 3 of 31 >>

Manufacturing machines - a holonic approach

Print
E-mail
Add to Marked List
Save to **EndNote** Web
Save to **EndNote**, **RefMan**, **ProCite**
more options

**Author(s):** Epureanu A (Epureanu, A.)<sup>1</sup>, Marin FB (Marin, F. B.)<sup>1</sup>, Marinescu V (Marinescu, V)<sup>1</sup>, Banu M (Banu, M.)<sup>1</sup>, Constantin I (Constantin, I)<sup>1</sup>

**Editor(s):** Demiralp M; Mikhael WB; Caballero AA; Abatzoglou N; Tabrizi MN; Leandre R; GarciaPlanas M; Choras RS

**Source:** ACMOS '08: PROCEEDINGS OF THE 10TH WSEAS INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTOMATIC CONTROL, MODELLING AND SIMULATION **Book Series:** ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING **Pages:** 261-266 **Published:** 2008

**Times Cited:** 0 **References:** 10 Citation Map beta

**Conference Information:** 10th WSEAS International Conference on Automatic Control, Modelling and Simulation  
Istanbul, TURKEY, MAY 27-30, 2008  
WSEAS

**Abstract:** Our paper objective is to propose a new concept of holonic control applied to reconfigurable machines. The research aims by holonic approach of reconfigurable manufacturing system to obtain radically new, self-adaptive, rapidly reconfigurable, holonic machines for batch industrial production in open-ended and rapid changing real-market environments. The holonic concept can be applied on both hardware and software levels. The generic holon is defined as a computational entity or a computational entity associated with a physical part. In the paper is show an example of how holonic approach can be implemented by developing the next generation of manufacturing machines.

**Document Type:** Proceedings Paper

**Language:** English

**Author Keywords:** reconfigurable manufacturing systems; system architecture; open architecture control; holonic structures; self-programming; holarchy

**KeyWords Plus:** SYSTEMS

**Reprint Address:** Epureanu, A (reprint author), Dunarea Jos Univ Galati, Mfg Sci & Engr Dept, Domneasca St 47, Galati, Romania

**Addresses:**  
1. Dunarea Jos Univ Galati, Mfg Sci & Engr Dept, Galati, Romania

**Publisher:** WORLD SCIENTIFIC AND ENGINEERING ACAD AND SOC, AG LOANNOU THEOLOGOU 17-23, 15773 ZOGRAPHOU, ATHENS, GREECE

**IDS Number:** BIB19

**ISBN:** 978-960-6766-63-3

## Manufacturing machines – a holonic approach

EPUREANU A., MARIN F.B., MARINESCU V., BANU M., CONSTANTIN I.  
 Manufacturing Science and Engineering Department  
 Dunarea de Jos University from Galati  
 Domneasca St. 47  
 ROMANIA  
 alexandru.epureanu@ugal.ro http://www.ugal.ro

*Abstract:* - Our paper objective is to propose a new concept of holonic control applied to reconfigurable machines. The research aims by holonic approach of reconfigurable manufacturing system to obtain radically new, self-adaptive, rapidly reconfigurable, holonic machines for batch industrial production in open-ended and rapid changing real-market environments. The holonic concept can be applied on both hardware and software levels. The generic holon is defined as a computational entity or a computational entity associated with a physical part. In the paper is show an example of how holonic approach can be implemented by developing the next generation of manufacturing machines.

*Key-Words:* - Reconfigurable manufacturing systems, System architecture, Open architecture control, Holonic structures, Self-programming, holarchy.

### 1 Introduction

Nowadays, companies building manufacturing machines must face fast changes happening on technical, commercial and economical field. These evolutions emerging are the following:

- economy globalization, with the consequence the emphasis of competition;
- individualization of needs, what means products customization;
- capital dynamics, generating high requirements concerning investment efficiency;
- the high versatility of small companies, ready for fast adaptation to market.

These evolutions imply a new economic balance between, economy, technology and society. Its bound is based on company capacity for a fast reaction with minimum investment, not only to market new requirements, but also to dynamics of these requirements, described by:

- high frequency of introducing the new products;
- increasing products variety along with reducing of orders volume;
- changing concerning governments legislation (for instance those connected to environment and product safety);
- changing concerning technologies used in manufacturing.

At the time, the companies' responses to these changes are based on the idea to extend some of the attributes of classic manufacturing system which define reconfigurability.

As solution it was proposed a new paradigm, called reconfigurable machining system [RMS] [1]. A reconfigurable machining system is designed for rapid

change in structure both in hardware and software components. An RMS consists of modular hardware components, for instance a translation hardware module or rotation module. The system architecture is open to embed new types of modules or to build architecture. The system is capable of changing architecture by selecting different modules and assembling them in a desired configuration.

We are suggesting a new approach for this general concept, in order to obtain a good reaction of the industrial environment represented by investment to integrate the concept in the industry. Until now the literature has made very brief reports on applications of holonic modeling of manufacturing enterprises, of shop floor control systems, of material handling and of logistics systems [2][3][4][5]. We propose that the concept of holonic system to be applied to the machine itself, as it implies at least 90% of the technical implications and 80% of the economic implications of the physical objects manufacturing process.

The literature reports the concept of reconfigurable machine, based on the idea that several modules can form together a machine [6]. The paper proposes a new paradigm, the holonic reconfigurable (HR) manufacturing machines based on the idea of modules being regarded as adaptronic, autonomous, cooperative and intelligent entities, represented by intelligent holons, capable of communicating with one another and with the human operator.

The literature points out the notion of knowledge-based holon in the sense that the holon is knowledge-based controlled [7][8][9]. We need to develop the cognition-based holons, characterized by instinctual and social behavior associated with the capabilities of creating

knowledge on-line, of reasoning and applying the results reached on-line.

Unlike the present CNC manufacturing machines, the HR manufacturing machines to be developed will have the following capabilities: self-organization, self-programming (the part-program contains a target list, not a guidelines list), self-optimization (by interholonic negotiation) and preventive self-adaptation (stability, accuracy and costs). That is why the HR manufacturing machines represent the next generation of manufacturing machines.

Our research aims to develop a new generation of manufacturing machines for helping instrument manufacturers and machine builders to stay ahead in competition regarding the responsiveness to the changing mix and volume demands and the efficiency in small batch industrial production of the physical objects, through reducing the lead-time, reducing the capital waste, increasing the scalability within a wide range, holistically minimizing the cost and improving the quality control techniques.

We defined the machine-holon as either a computational entity or a computational entity associated with a physical part, such as translation hardware module in a machine.

Our paper objective is to propose a new concept, leading to create radically new, self-adaptive, and rapidly reconfigurable, holonic machines for batch industrial production in open-ended and rapid changing real-market environments and show an example of how they can be implemented by developing the next generation of manufacturing machines.

## 2 Problem Formulation

The research scope is to achieve a new paradigm – holonic reconfigurable machines – on the basis of which the part manufacturing machines are to be re-conceived. Scope can be reached through:

1. Conceptual development of the holonic reconfigurable machines, based on a new paradigm;
2. Application of the holonic reconfigurable machines class for development of the next generation manufacturing machines;
3. Development of tools and methods for modeling, set-up and use of the next generation manufacturing machine as adaptive-mechatronic (“adaptronic”) system;
4. Development of modules and application of their usage for configuration of a next generation manufacturing machine able to ensure reduction of the ramp-up time, reduction of energy consumption and increase of accuracy, relative to the present generation of manufacturing machines.

## 3 Problem Solution

### 3.1 Key ideas

The development of the proposed new paradigm can be based on the following key ideas:

1. *Reconfigurable machines instead of flexible systems* – Flexible manufacturing systems easily adapt to market changes in which they include a great number of specialized modules (non-convertible) that can meet all needs. As one single module is used among all those available in a given moment, the capital invested in the other modules is capital waste.

Unlike these, the reconfigurable machines are made up of modules showing all a high degree of convertibility. As a result, the number of necessary modules is reduced, thus reducing the capital waste as well. The fact that the modules show a great range of addressability and a high degree of convertibility represents the basis of hardware architecture reconfiguration.

2. *The machine modules to be mechatronic systems* – This means that each module represents one degree of freedom of the machine (considered as multi-arms robot) and it is a mechatronic system which integrated sensors, actuator, control and mechanical structure.

3. *The machine modules are intelligent holons* – Each module is an independent building block and has interfaces for mechanical, electrical and informational connections. The modules must be autonomous (able to plan and execute the plan), cooperative (able to negotiate with one or more modules a plan and associate for developing this plan) and intelligent (capable of self-cognition by self-identification, learning and reasoning), i.e. to be cognition-based intelligent holons.

4. *The machine must have a distributed knowledge, cognitive and learning system*, which are based on the idea that the machine operation during machining of a piece represent the best experience that may be used for extracting knowledge by data mining techniques. As soon as knowledge is extracted, it should be applied for better process control and consumption reduction. For example, by monitoring the holons during first  $k$  parts machining and by extracting information from the data thus obtained, the actual holons models can be obtained. These models may be used for predicting the behavior of the holons during machining of the part  $k+1$ . Deviations from the initial plan that may appear can thus be compensated, which means that the control is not only adaptive but predictive as well. The residual deviations after  $k+1$  part machining do not depend on the holon behavior neither on process intensity, but of the accuracy of the behavior prognosis. In this way the process is better controlled and can be intensified and developed in one stage, avoiding the two usual stages:

rough and finish. This results in considerable decrease in both energy and raw materials consumption.

5. *The models used for identification shall be simple, local and temporal* – During processing of a batch of  $p$  objects, the difference between the  $p$  blanks is not too high. Moreover, re-identification is performed at small time intervals (e.g. after processing each piece). This makes the machine state variables change very little, always remaining in the vicinity of the operation point. That is why the models describing the holon behavior shall be simple, local and temporal. Being as simple as that, the number of experiences taken to build these models can be reduced to one or two pieces. Thus it is possible to better control the process and significantly reduce consumption even in the case of small batch production.

6. *Replacement the hierarchic control with a holarchic control* – After reconfiguring, a long ramp-up time is necessary to remake the hierarchic control system. If the control system is a holarchic one, the modules may function by unsupervised cooperation, on the basis of a general rules set, without the need of designing and executing of a special top-down control system. The holarchic control represents the basis of the reconfigurability of the machine control system and of the “plug-and-play” operation of the machine in case of small batch production.

7. *The machine functioning to be holistically optimized on-line by negotiation among the machine holons* – When two holons cooperate in order to accomplish one task, the task execution is preceded by negotiation between the two holons. Each holon responds to the cooperation needs of the other, and by planning and simulating the task accomplishment, while the performance level is evaluated. If the performance level is not satisfactory, then the way in which they cooperate in task accomplishment is changed and a new simulation is performed, and so on, until the performance reaches the highest level. Before negotiation all possible alternatives of the task achievement plan are identified. Upon completion of the negotiation, one of the alternatives is selected.

8. *The part-program should comprise information regarding the characteristics imposed on the manufactured object* in order to be considered acceptable, and not information on the way in which the functioning cycle of the machine should develop so that the object may have these characteristics – This means that the part-program should contain a list of targets and not a list of instructions. Starting from the targets included in the part-program, the holonic structure of the machine should allow for negotiation of the plan design, plan analysis and plan proper execution. The part-program shall be very simple as it will contain only the targets written in a high-level language. Consequently

the machine programming time shall be much shorter, which is crucial in case of small batch production.

### 3.2 Characteristics of the HR machines

According with the proposed paradigm, the HR machines will have the following seven core characteristics:

a) *Robotic-modular structure* – Holonic reconfigurable machines feature the architecture of a robot with one or more arms. Each arm ends in a gripper which grasps the piece, the tool, measuring device or other elements. Each arm has a number of degrees of freedom: some of them are active and represent simple rotation or translation movements while others are passive i.e. represent possible but blocked movements. A passive degree of freedom is a mechanical interface by means of which the module is connected to another module to form together the machine configuration. Each degree of freedom, active or passive, has a reference system. The relative position of the module reference systems is known. So it is the solid model of the module.

b) *“Adaptronic” concept* – Each module is a mechatronic system integrating an actuator, mechanical structure, sensors and embedded controller. The sensors monitor the state variables of the module, such as effector position and thermo-mechanical field of the module, using sensor fusion techniques. The sensors are periodically read at appropriate frequencies. Between two successive readings the control loop is run once. The adaptive control algorithm provides for two-stage processing of the data sent by the sensors, i.e. the module self-identification and the deviations prediction stage followed by correction (or compensation) of the state variable values.

c) *Cognition based* – With HR machines the part-program is a list of targets containing only information on the result to be obtained by material processing, such as: shape, size, position, micro-geometry of each surface, and not a list of instructions the machine is supposed to follow (which stands for the machine operating cycle). Thus the preparation time taken by the HR machine to execute a new object is fundamentally diminished.

HR machines have the capability of on line self-programming which means that based on the list of targets they can elaborate the list of instructions. For self-programming, certain knowledge is necessary specific both to the new object to be manufactured – such as the relationship between the work piece material, cutting speed and tool wear rate, and to the new machine that emerged by reconfiguration – such as the relationship between dimensional deviations and cutting force. The HR machines include a distributed



cognitive system which, by employing the data and knowledge obtained by the modules during operation, develops reasoning which further generates the knowledge needed for self programming, both those specific to the new object and to the new machine (thus fundamentally reducing the ramp-up time). The reasoning techniques shall be the unsupervised ones, such as case based reasoning. Also the distributed cognitive system provides the knowledge necessary for the HR machine self-organization, self-adaptation and self-optimization, as in the case of the HR machine self-programming.

d) Holonic operated – The modules shaping the machine structure are autonomous and cooperative, which means they are holons able to elaborate, negotiate and execute the plan of achieving the selected target (the list of proposed targets is in the part-program of the manufactured object). A working cycle of a HR machine has as starting point the selection of one of the targets included into the part-program and ends with the achievement of that target, which includes planning, negotiation and execution activities. Thus, all possible alternatives to reach the target are first identified. By selecting one of these possibilities, the planning stage which consists in self-organization, task binning and self-programming is run over. The resulting plan is evaluated in terms of feasibility and, if accepted, the resulting performance is evaluated too. By comparing the performance corresponding to the feasible alternatives, it is accepted the plan reaching the highest performance level. Next the accepted plan is executed, i.e. the task-program execution, predictive stability control, adaptive accuracy control and optimal cost control, resulting in the manufactured object and a brief report.

e) Holarhic controlled – The holon autonomy is given by a set of internal rules which determines its “instinctual” behavior while the holon cooperation is provided by a set of external rules which determines its “social” behavior and forms the machine operating system. The holon “instinct” is embedded into its own control system and represents a fixed characteristic, which is not changed by the holon reconfiguration – for example, the solid model of the holon. The “social” part of the holon does change with the machine reconfiguration. A proper design and development of the holon “instinct” may reduce the “social” to a next-to-negligible level. In this way the holarhic control makes the HR machines work “plug-and-play” and, after its reconfiguration, need a low ramp-up time, which is crucial in assuring responsiveness to changing mix and volume demands.

f) On-line holistic optimized – The part-program of the HR machines contains only information about the requirements imposed to the object (targets), not

information about the working plan the machine has to follow in order to reach these targets. Before starting the machining process leading to the target, the holons pass through the negotiation stage when they conceive/prepare the possible alternatives of the working plan, simulate the running, evaluate the performance and select the best alternative.

g) Reconfigurable and open architecture – Both hardware and software architectures of the HR machines are open, because adding or eliminating a holon modifies the number of holons but not the rules governing their cooperation. Moreover, by on-line self-identification (which is one of the components of the self-adaptation capability) HR machines permanently update the control model so that the structure modification along with the time and space evolution of their behavior does not determine the machine to stop for re-adjusting or re-programming.

### 3.3 HR manufacturing machine structure

This next generation manufacturing machine has the structure of a 3-arms robot; one arm holds and rotates the work-piece, another arm holds the work-piece and the third arm holds the tool or the measuring device.

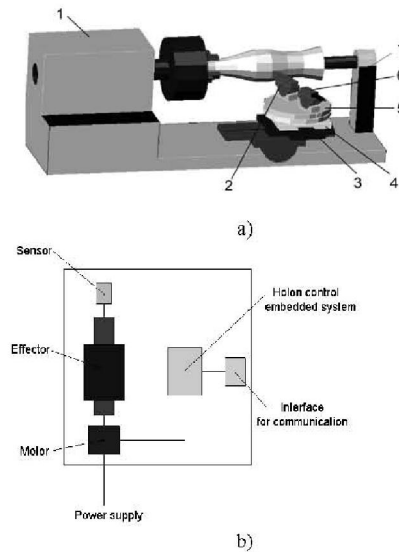


Fig.1 Hardware architecture of configured manufacturing machine (a); the conceptual schemata of a holon (b).

Each degree of freedom is given by a module, such as: longitudinal translation (3), transversal translation (4), tool rotation (5), part rotation (1), loading the tool (2), loading the measuring device (6) and work-piece holding (7). These modules are autonomous, cooperative and intelligent, meaning that they are intelligent holons. Each holon is a mechatronic knowledge based module. For example, a kinematic holon is shown in the fig. 1, b. This holon materializes a degree of freedom that consists in a translation movement. It has an actuator for performing the translation movement, an effector, sensors for monitoring the holon state variables (for example, the effector position), an intelligent embedded control system which implements the holon control algorithms and an interface for communication with other holons.

**3.4 The holon main functions**

Holon embedded control system ensures the following main functions of the holon:

- manages the knowledge, cognitive and learning system of the holon;
- draws the plan for reaching current target of the part-program;
- negotiates with other holons the plan adjustment (negotiation including a virtual running of the plan) thus making self-optimization process of target reaching;
- cooperates with other holons in order to develop the plan;
- registers the consumption (time, energy, materials) occasioned by plan development.

*Self-programing* – Once the current target is known, the HR manufacturing machines make up the instructions list based on the idea of dividing this target into a number of elementary targets so that: *i)* if all elementary targets have been reached, then the current target has been reached; *ii)* to reach one elementary target it is sufficient that, at a certain moment, the participating holons be in a well defined state. The successive values of the participating holons state parameters represent the current target achievement program.

*Self-optimization* – The holons 3, 4 and 5 negotiate the plan of generating the surface profile and adopt the plan for which the highest performance level can be reached. After plan validation, these holons cooperate to displace the tool along the surface profile, whereas the holons 1 and 2 cooperate to machine the surface (Fig. 1.).

The self-optimization by negotiation takes place according to the flow-chart introduced in figure 3 and consists of:

- starting from the target input in the part-program, the possible alternatives of reaching this target are

identified; for example which of the available tools shall be used is a criterion for the identification of the possible alternatives;

- one alternative is selected out of the identified ones;
- drawing the target reaching plan;
- the feasibility of this plan is evaluated and, if proven not feasible (for example if it leads to collisions between the module systems), then the alternative is rejected and another alternative will be selected;
- if the plan is feasible, then the economic performance of the alternative, cost (energy, raw materials, tools wear etc.) and time, is evaluated;

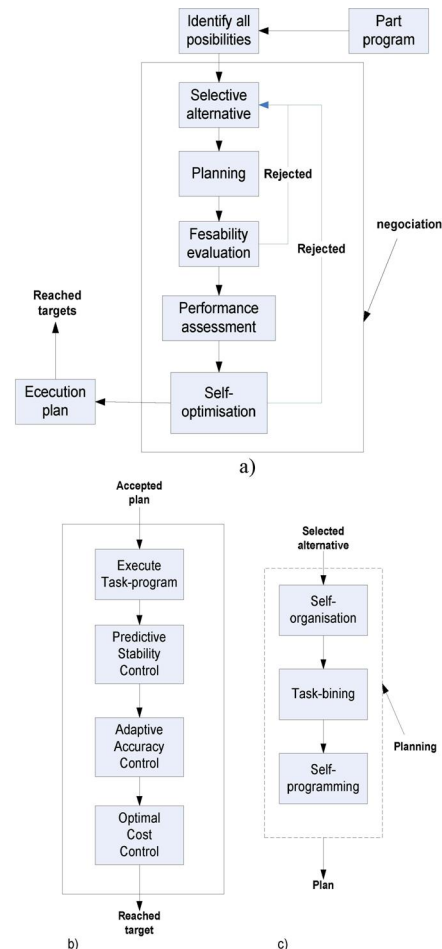


Fig. 3. Flow-chart of the negotiation (a), plan execution (b) and planning (c) processes

10th WSEAS Int. Conf. on AUTOMATIC CONTROL, MODELLING & SIMULATION (ACMOS'08), Istanbul, Turkey, May 27-30, 2008

-taking performance into consideration, all feasible alternatives are analyzed and a decision is taken on the optimal alternative;

-the plan is executed according to the chosen alternative.

#### Self-adaptation

a) Stability – During machining, the tool holon 2 (Fig. 1) monitors the time evolution of the cutting force, permanently processes this signal, and identifies the process, as follows: *i)* if the signal is stochastic, the process is stable, *ii)* if the signal is chaotic, the process is stable but very close to the stability limit and *iii)* if the signal is periodic, the process is unstable. Self-adaptation consists in that if the signal is chaotic, then, preventively, certain holon state variables are modified (cutting speed, for instance) in order to prevent instability occurrence.

b) Costs – The tool holon monitors the tool wear rate, force and other parameters, in order to identify the economic model of the process. Self-adaptation consists in cost minimizing based on this model.

c) Accuracy – After finishing the machining process, the measuring device holon 6 (Fig. 1.) explores the part surface, being displaced in this respect by holons 3, 4 and 5. The coordinates of the explored points are used for making up the geometrical model of the part surface, its comparison with the CAD model and establishing its conformity to requirements.

Self-adaptation consists in that the data thus obtained are used for dimensional identification, the prognosis of deviations that may occur with the next item and the subsequent modification of the plan, so that those deviations to be compensated.

## 4 Conclusion

This paper presented a new approach for developing reconfigurable manufacturing machines. According to the authors, the holonic approach could be the solution of the issues arising in the development of the manufacturing machines. The holonic concept can be applied on both hardware and software levels. Several research directions have been drawn for future development of holonic reconfigurable manufacturing system.

### Acknowledgement

The authors gratefully acknowledge the financial support of the Romanian Ministry of Education and Research through grant PN-II-ID\_653/2007.

### References:

- [1] Z. M. Bi & Sherman Y. T. Lang & M. Verner & P. OrbanX1. Author, Title of the Paper, *Development of*

*reconfigurable machines*, Int J Adv Manuf Technol, 2007.

- [2] Babiceanu R.F and Frank C.F, Development and applications of holonic manufacturing system: a survey, *Journal of Intelligent Manufacturing* 17,111-131, 2006;
- [3] Fan-Tien Cheng, Chih-Feng Chang, Shang-Lun Wu, Development of holonic manufacturing execution systems, *Journal of intelligent manufacturing*, 253-267, 2004
- [4] M. K. Tiwari, Samrat Mondal, Application of an Autonomous Agent Network, *Journal Math Imaging Vision* 29- 141, 2007
- [5] Nebil Buyurgan, Can Saygin, An integrated control framework for flexible manufacturing systems, *International Journal Adv Manufacturing* 1248-1259, 2005
- [6] Reconfigurable manufacturing system Patent No: US 6,349,237 B1;
- [7] Cooperative smart items, USA Patent No: US 6,975,915 B2, European patent No. WO 2004/040489;
- [8] Intelligent machining system USA Patent No: US 5,473,532;
- [9] Paulo Leitão and Francisco Restivo, ADACOR: A Holonic Architecture for Agile and Adaptive Manufacturing Control, *Computers in Industry*, Vol.57, n° 2, pp.121-130, 2006.

## 5) Online adaptive learning system for reconfigurable machine tool, Marinescu V., Constantin I., Epureanu A., Banu M., Marin F.B., WSEAS Journal Transaction on System and Control, 2008, (revista indexata ISI)

WSEAS TRANSACTIONS on SYSTEMS and CONTROL

Marinescu V., Constantin I. C.,  
Epureanu A., Banu M. and Marin F. B.

### Online adaptive learning system for reconfigurable machine tool

MARINESCU V., CONSTANTIN I. C., EPUREANU A., BANU M., MARIN F.B.  
 Manufacturing Science and Engineering Department  
 Dunarea de Jos University  
 47, Domneasca St., Galati  
 ROMANIA  
 alexandru.epureanu@ugal.ro

*Abstract:* -Batch manufacturing is a widely used technique in today economy. The conceptual change of the way in which the manufacturing machines are controlled is the most important aspect in which is possible to conform with the market demands so their reconfigurability would not affect competitiveness. The problem to be solved in this paper consists in a control method development for predictive control based on prediction of the controlled variables deviation values in respect with their programmed values and also to predict the process parameters for which chatter will appear. . The basic idea is to use the data set obtained by monitoring the process during the manufacturing of the previous workpieces and during the current workpiece in order to predict the controlled variable value and to train a classifier algorithm. The method proposed consists in determining of the causal relation between one controlled variable and the monitored variables and then predicting its value in order to compensate the deviation from the program.

*Key-Words:* - online learning system, reconfigurable machining system, adaptive control, predictive control, error compensation, chatter, turning

### 1 Introduction

The characteristic aspects of the actual mechanical parts market are: *i)* the volume of orders has a lowering tendency; *ii)* the tendency of product customization implies accentuated diversity of shapes, dimensions and mechanical characteristics for the products solicited by the market; *iii)* the manufacturing machines flexibility and the reconfigurability tends to be the main characteristics which determine the manufacturers profitability; *iv)* the main direction in which is possible to progress in order to adjust the manufacturing machines to the market requirements is to change at conceptual level the manner in which they are controlled so the reconfigurability of the control system, according to the orders imposed by the market, to be done in technical and economical circumstances that do not affect the competitiveness.

This is why small batch manufacturing is widely used in today's economy. An appropriate solution for small batch manufacturing is to use of reconfigurable machines. But after reconfiguration stage, behavior of the reconfigurable machining system is generally unknown. The models for the manufacturing processes are also unknown. In order to compensate the machined workpiece errors for each machine configuration an error model must be

constructed. Also in order to maximize the productivity the material removal rate must be maximized while maintaining the process stability. In order to increase the productivity the cutting speed must be increased. But by increasing process intensity, forced vibration and increased cutting force may appear. This phenomenon is called chatter. The result of chatter causes several adverse effects, including the lowering life span for tools, inexact dimensions, unsatisfactory surface quality, unacceptable noise and even tool damage. A model for the stability limit must be determined. In order to proper control the cutting process the machining parameters must be properly selected near the stability limit but in the stable domain. A lot of time must be spent in order to identify these unknown models because during system and process identification several experiments must be conducted. Moreover, the manufacturing system behavior is changing in time. This change implies modification of both the model parameters and the causal relations between the model variables.

The solution reported in the literature in order to diminish the machining errors consists in using an adaptive predictive control system. Generally, for an adaptive control system the model structure remains



unchanged but the parameters of the model are changed in order for a better modeling of the reality.

The identification is a repetitive and frequent process which requires stopping the machine, launching of specific experimental programs and numerical data processing. This requires time thus affects efficiency.

Solutions reported in the literature for model parameter evaluation are based on several algorithms. In most cases these algorithms consists in two stages:

- obtaining of experimental dataset from the sensor system and
- fitting the system model over the dataset.

For obtaining the dataset several solutions are proposed:

- 1-manufacturing process is stopped and then measurements are made upon the system [1], [2],
- 2-machining and measuring of test workpieces [3],
- 3-current workpiece is measured during its machining [4],
- 4-measurement is made during the entire batch manufacturing [5].

Model fitting over the dataset is usually done using analytical techniques [6], techniques based on artificial neural network or on genetic algorithms [7].

The main drawbacks which emerge from applying the techniques reported in the literature are: 1-some of them are time consuming techniques requiring the machine stop and launching specific procedures,

2-model parameters evaluation require many experiences (neural network case) thus the first workpieces have no benefit from using the adaptive system,

3-some of the approaches are used only to control a single variable thus other important components will remain uncontrolled and will affect in a negative way the output control,

4-in all the cases it is assumed that the model causal relations remain unchanged even though this assumption is not always confirmed in practice.

The vibration caused by using improper process parameters is a dynamically unstable phenomenon. This phenomenon has been studied for long time, but no approach of modeling this phenomenon for the reconfigurable machine tools is new. Dhupia [9] studied the stability dynamics of the arch-type reconfigurable machine tool. A comparison of frequency response functions and stability lobes of the arch-type reconfigurable machine tool was made for different reconfiguration position. The study revealed that similar dynamic characteristics

exist for different reconfiguration structures. This similarity is possible the dominant mode where chatter occurs is caused by the spindle-tool and tool-tool holder assembly. Moreover, the conclusion was that in order to guarantee constant dynamic behavior in any case, the machine's structural frequencies must be less dominant than the structural frequencies of the spindle, tool and tool holder. So the general approach of the chatter phenomenon may be used for reconfigurable machine tools. The general approach [10, 11] consists in modeling of the dynamics of the system and determining the frequency response functions, by modeling the workpiece, the tool holder and the tool and then the model parameters must be identified. In some papers a predictive control approach is made. In [12] the stability is assessed by using the ratio of the predicted maximum dynamic cutting force to the predicted maximum static cutting force. The cutting force is predicted by using as input parameters workpiece material properties, the tool geometry and the cutting conditions.

Chatter monitoring is done usually by using accelerometers [13], microphones [14], force dynamometers [13,15] or even by measuring the spindle drive current [16]. By using these sensors the stability of the process is assessed. However the in these papers the control of the chatter phenomenon is preventive. The models used for preventive control are often analytical and their structure is obtained by using simplifying hypotheses.

In order to control reconfigurable machine tools we propose a novel control structure. This control structure includes an online learning system which supplies input data to a general operation scheduling algorithm which controls the reconfigurable machine tool hardware structure. The online learning system is used for generating corrections for the machine axes and also for specifying the limit conditions before the chatter phenomenon appearance. The process is monitored and the instability tendencies situations are used for determining the stability limit.

The dataset used for process modeling is filled only using the monitoring system, without stopping the process or using a test workpiece.

The algorithm used for dimensional control includes in a unitary manner both the model update and model use for corrections estimation. Each algorithm running consists in determination of the causal relations between state variables and in generation of the best linear model describing manufacturing system and process. The model is then used for preventive control of the current

workpiece so that its deviations are compensated. Thus the control error is actually the prediction error. Algorithm is permanently run during the batch machining so it can detect the systems evolution.

The algorithm design allows its use with few previous workpiece, because it includes a procedure for working with small datasets.

The remainder of this paper is organized in four sections. Formulation of the problem is presented in section 2. The proposed control structure, the online learning sistem along with the results of simulations using artificial data and data resulted from laboratory experiments are presented in section 3. Section 4 contains the main research conclusions.

## 2 Problem Formulation

The problem solved in this paper arises from the following remarks:

- 1- the classical CNC is not suitable for reconfigurable machine tools because the models of these machine is changing dramatically during the reconfiguration stage and their models is not known in order to properly control the machine
- 2.- the CNC structures are not suitable for chatter predictive control
- 4, The CNCs are not using data obtained from the process in order to improve their performance
- 3- In manufacturing process the measurement of the process controlled variables can be sometime done with big delay in respect with to the control action; thus a classical control approach based on error driven controllers does not always avoid the appearance of rejection parts.
- 3- The model parameters values and the causal relations on which the model is based change during the batch manufacturing.

The problem to be solved in this paper consists in development of novel control system suitable for reconfigurable machine tools which will use a method for predictive control, based on prediction of deviation of the controlled variables values with respect to their programmed values and a method for predictive control of the process stability. Also the control must be adaptive for discerning manufacturing system and process dynamics.

The basic idea is to use the dataset obtained by monitoring the process during the manufacturing of the previous workpieces and during the current workpiece in order to predict the controlled variable

value and to avoid the appearance of chatter phenomenon. The predicted deviation value will be used for minimizing its difference with respect to the programmed value.

Moreover, the proposed method involves integration of the system behavior identification stage with the resulted model using stage for obtaining the predicted values.

Finally, instead of using global models, the simple, local and ephemeral models will be preferred and the stability limit will be determined online.

## 3 Problem Solution

### 3.1 The RMT programming

As depicted in fig. 1 modern CNC machine programming architecture is considering the following data flow. A CAD program is used for workpiece design. Based on the workpiece specification process planning is then performed using a CAPP (Computer Aided Process Planning) software package. Then using a manufacturing process plan as input the part program is generated by a CAM software. The CNC process this program and the result is the finished workpiece. No correction is performed during the machine running. Also the stability of the process is not taken in account. Only the stability of each axis is assured during the machine setup by setting choosing a set of servoparameters. The proposed control system has a similar structure for CAD-CAPP software.

The classical CAM software is replaced by an adaptive CAM which have the advantage of providing the values for technological description of the process and by CAE (Computer Aided Engineering) which performs the simulation of current RMT kinematical configuration. The algorithm computed in the A-CAM is also computed in Algorithm running unit (ARU). The CAM running in process design phase is virtual machining considering nominal values. Consequently, the ARU running on the machine is running with measured values, which are continuously updated. The ARU uses as input parameters the values obtained from the online learning system. This system corrects the dimensional errors and assures the process stability

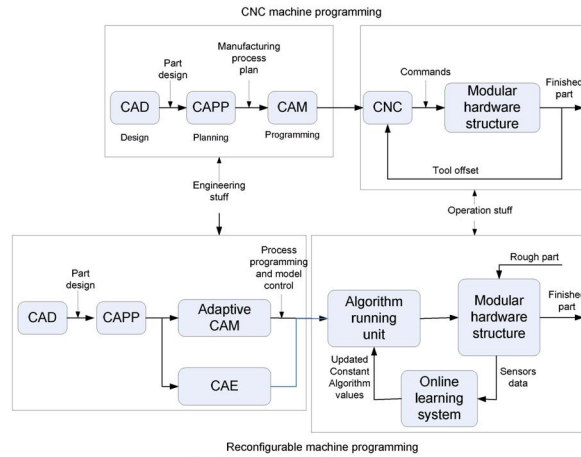


Fig.1 Proposed RMT programming

**3.2 The reconfigurable lathe**

We will describe a reconfigurable lathe structure for exemplification. Our proposed architecture for the reconfigurable lathe is composed of virtual processing planning system, machining database, and “plug-and-play” hardware modules.

The reconfigurable lathe considered is build out of four independent modules, numerical controlled, with independent sensor and motors. These modules are main spindle, X and Z axis assembly, and the rotary tool assembly. The reconfigurable lathe, configured for cutting of longitudinal profiles, as shown in the picture, is made of the following parts: bed 1, main spindle 2, workpiece 3, cutting tool 4, tool holder 5, carriage 6, rotary tool assembly 7, cross-slide 8, slideway 9. Having a supplementary degree of freedom represented by rotation of cutting tool it is an advantage for tool to positioning, and using interpolation for x and z axis and the rotation of the tool it can be achieved peculiar surface processing. Using a configuration with rotary assembly tool parallel with the axel of the spindle, it can be processed surfaces such as poliexcentric revolution surfaces, complex surfaces or cams.

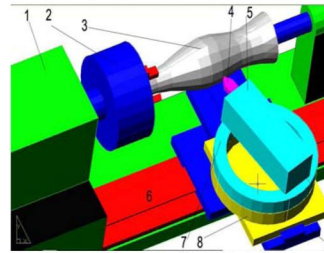


Fig.2 The reconfigurable lathe

The hardware modules (main spindle, tool holder, etc) are design as “plug and play” and are controlled directly using optimal control variable, by-passing the post processing phase of G-code generation. The control of the modules it is performed by sending simultaneously successive position of controlled variables  $X(k)$ ,  $Z(k)$ ,  $\theta(k)$  and  $\phi(k)$  computed from  $(i,j)$  pair.

In order to control the machine, each blank of the current batch is measured using by on-machine measurement. The workpiece profile is inputted form CAM CAD model. So the machining allowance is known for the entire workpiece surface. The algorithm running unit is used

Part surface generation it is performed by moving tool profile along helicoidally generating path, obtained by combining revolution of the part and the

translation of the tool. The trajectory of the helicoidally path is divided, by coordinates computing of a many successive  $(i,j)$  pair points to control motors that performs movement actions of the machine. For each point, the online learning system will generate dimensional correction parameters and also the parameters that will be used as input data for the algorithm running unit. These input parameters will be  $L_a$  (the length of cutting active), allowable chip thickness -  $a_a$  (chip thickness). The learning system controls the stability by correcting the length of the active cutting edge and the cutting speed limits and in order to maintain the process stability. Also an equation for the stability limit will be supplied by the learning system. This equation will be used for validation purposes.

**3.3 The chatter predictive control**

The chatter phenomenon appearance is often a regenerative phenomenon. In the case repetitive machining of the same surface the chatter may appear as a consequence of the previous workcycle. The length of the chatter waves  $\lambda$  fig. 3 will be determined by the variable force  $F$  which is generated by the variability of the machining allowance.

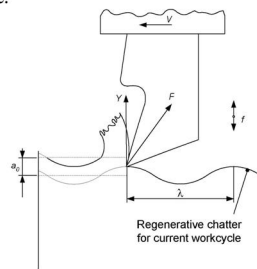


Fig.3. The regenerative chatter phenomenon

The chatter phenomenon appearance may be avoided by properly controlling three parameters: the active length of the cutting tool, the feed rate and the cutting speed. Our purpose is to determine the stability limit in order to supply the parameter  $L_a$  for the algorithm running unit. This algorithm will control the machining process near the stability limit in order to maximize the productivity. We will present briefly the influence of each parameter.

As depicted in figure 4, the active length of the cutting tool has a great influence over the

stability of the machining process. The chatter amplitude exponentially increases with the active length of the cutting tool if over a limit value  $t_{lim}$ .

The value  $t_{lim}$  which must be identify isn't constant for the entire workpiece. It depends of the machine rigidity which is not constant over the entire work space, the workpiece rigidity and the machining parameters affect this value.

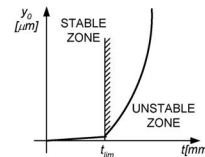


Fig.4. Variation of chatter amplitude with the value of the length of the active cutting edge

In figure 5 the variation of  $t_{lim}$  with the feed rate is showed. Often the feed rate do not have a significative influence.

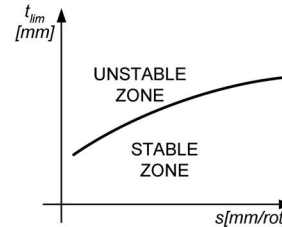


Fig.5. Variation of chatter amplitude with the value of the length of the active cutting edge

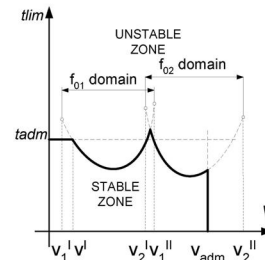


Fig.6. Variation of chatter amplitude with the value of the length of the active cutting

The dependency between the cutting speed and  $t_{lim}$  is complicated. Each dominant characteristic frequency determines the

existence of associate lobe in the diagram. These characteristic frequency must be avoided because the  $t_{lim}$  parameter value is very low in these circumstances.

In order to avoid the chatter appearance a model must be build in order to predict for a certain process parameter (cutting speed, feed rate and cutting length) if the process will be stable or not. In order to model this dependency the machine will be monitored during the entire batch processing. First the input parameters for the algorithm running unit that controls the trajectory will be set by default to low values. Then these parameters will be gradually increased and if chatter appears: firstly the  $t_{lim}$  parameter is decreased by actuating the rotary tool assembly, the feed rate and upon the cutting speed. A database will record each situation encountered during machining... This dataset will be use for training a SVM classifier that will be used for prediction of the stability state. Although other modeling techniques are available [19]

SVM is a supervised learning technique used for regression or classification. Several fields such as medicine, economy and engineering, are using classification techniques [17-18]. In many cases it is necessary to discriminate the results or phenomenon in two classes.

Usually, classification model is trained using observation set  $S = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}$ , where  $x_i \in R^m$  - are vectors containing data used for discrimination and  $y_i \in \{-1, +1\}$  are the labels for each class. In our paper the  $x$  vectors will be represented by the machining parameters. The labels  $y_i$  for each workpiece denote the fact that the process is stable or not. After the model is trained, it can be used for prediction by inputing a vector  $x$  into a decision function  $D(x)$  where  $D: R^m \rightarrow \{-1, +1\}$ . A linear classifier uses a hiperplane  $w \cdot x + b = 0$  for separating the dataset in two classes where  $\cdot$  is the dot product operator,  $w$  is the normal vector of the hiperplane and  $b$  is a bias (Fig. 7). In this paper we will input data in this decision function and we will get an answer referring to the workpiece assessment. SVM classifier determines the vectors from each class with shortest distances from the separation hiperplane. SVM classifier algorithm determines the hiperplane parameters for which these distances are maximized by defining two margin hiperplanes:

$$w \cdot x + b = 1 \text{ and}$$

$$w \cdot x + b = -1.$$

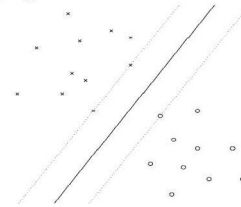


Fig. 7. Linear classification using SVM

If  $w \cdot x + b \leq -1$  then  $y = -1$ , if  $w \cdot x + b \geq 1$  then  $y = +1$ . The decision function is :

$$D(x) = \text{sign}(w \cdot x + b)$$

The algorithm solves the following optimization problem:

$$\text{- maximize the margin} = 2/\|w\|,$$

$$\text{Subject to } y_i(w \cdot x_i + b) \geq 1 \text{ where } i=1..n$$

The problem can be solved in its dual form:

$$\text{-max} \sum_{i=1}^n \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j} \alpha_i \alpha_j y_i y_j x_i \cdot x_j,$$

subject to  $\alpha_i \geq 0$  and  $\sum_{i=1}^n y_i \alpha_i = 0$ . Where  $\alpha$  terms

are the dual representation of the weight vector

$$w = \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i x_i,$$

which is zero for all the vectors that are not located on the margins hiperplanes. The vectors for which  $\alpha_i \neq 0$ , are called support vectors.

The soft margin method allows training data to be mislabeled in order to have a hyperplane that separates data which is linearly inseparable. This method introduces using positive  $\xi_i$  slack variables.

$y_i(w \cdot x_i + b) \geq 1 - \xi_i$ . The optimization problem will be:

$$\min \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^n \xi_i,$$

$$\text{subject to } y_i(w \cdot x_i + b) \geq 1 - \xi_i.$$

The problem can be solved using the Lagrange multipliers:

$$\max \sum_{i=1}^n \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j} \alpha_i \alpha_j y_i y_j x_i \cdot x_j$$

where  $C \geq \alpha_i \geq 0$ , and  $\sum_{i=1}^n y_i \alpha_i = 0$ .

SVM classifier can also be used for non-linear classification by using kernel functions. The algorithm is similar with the linear version except that the dot product used as a measure of similarity is replaced with a nonlinear kernel function,  $K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \phi(\mathbf{x}_i) \cdot \phi(\mathbf{x}_j)$ , which computes the scalar product in a feature space defined by the transformation  $\phi(\mathbf{x})$ . The dimension of the feature space can be very high or virtually infinite. However, using the kernel trick the computation is not done in the feature space. Typical kernel functions are:

-polynomial:  $K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = (\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j + 1)^d$  or

$$K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = (\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j + 1)^d$$

-radial basis function:

$$K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = e^{-\gamma \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|^2}, \gamma > 0, \text{ or}$$

$$K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = e^{-\frac{\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|}{2\sigma^2}}$$

-sigmoid-  $K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \tanh(\kappa \mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j + c)$ .

Using a specific kernel function depends on the dataset structure because the kernel function can be considered as a measure of similarity between the training set data. Each kernel function has a set of parameters which must be properly chosen in order to avoid over fitting. Also the parameter C must be properly selected in order to minimize the prediction error on a test dataset. For selecting the proper parameters a grid search algorithm is used. For each parameter a set of coarse values is supplied, and then using k-fold cross validation method or leave one out method each combination is evaluated. These validation methods are used for dividing the training data in two parts. One part will be used for training the classifier and the other one for testing its performance. In k-fold cross validation the testing data is divided in k parts randomly. Each part will be used for testing the algorithm trained with k-1 folds. In leave one out method is a particular case of k-fold cross validation, k is equal with n the number of training instances. After that a fine search is performed. In both cases the data is divided in training data and test data.

In order to model the stability limit the stability was determined using this relation:

$\lambda = v/f$ , where  $f$  is the frequency with the highest amplitude determined using Fourier analysis, and  $v$  is the cutting speed. By experiments we determined that the system is unstable if  $\lambda$ , in the middle off its variation interval  $\lambda_c = 0.5 \dots 1.8 \text{ mm}$ . Based on

$\lambda$ , value the assesment of the stability is made. We modeled the clasification problem using a RBF kernel. The kernel parameter and C parameter were determined using cross-validation. The SVM accuracy was good over 90%.

For dimensional control we shall consider several machining cycles which will produce several workpieces. The machining surface will be divided in several zones (I, II, III, IV in Fig. 8). Each zone length is adopted so that the correction required is constant over the entire zone.

Each work cycle will be divided in a number of stages (figure 8) which are: measuring stages or prediction and compensation stages for each zone in which the part was divided.

During a measuring stage the variable values are measured using sensors embedded on machine. During a prediction stage only one variable, the variable of interest, will be predicted and compensated in order to null the deviation from the programmed value, before its appearance in the process. Finally for each variable of interest, a measuring stage will be performed in order to record the real value of the variable. A specific online learning algorithm will be used for identifying the model of the variable of interest. The dataset used by the algorithm is composed by the variables values recorded from the current workpiece until the current stage and also for all previous workpieces.

Let us consider a simple workpiece which is turned and tool path AB is divided in four zones (fig 8). In current moment the cutting tool machines the zone II. During the process six variables  $V_1, \dots, V_6$  are monitored. All the variables are measured and some of them ( $V_1, V_2$  and  $V_4$ ) are predicted and then compensated based on their predicted values. The workcycle was divided in seven stages which three are prediction and compensating stages and four are measuring stages. For instance, stage 1 is a measuring stage which consists in measuring  $V_3$  and  $V_6$  variables. If for the current workpiece, the current stage is a prediction and compensation one, the variable of interest value would be predicted using a specific online learning algorithm which use the measured values during the current work cycle until the current stage and all the records from the dataset which contain the measured values for all the past workcycles. For the case shown in Fig. 8, the current stage is 4, the variable of interest is  $V_2$ , the variables for which the values were already measured are  $V_3, V_5$  and  $V_6$ . A model will be build using these variables values and also using all the variables values recorded for the previous workpieces.

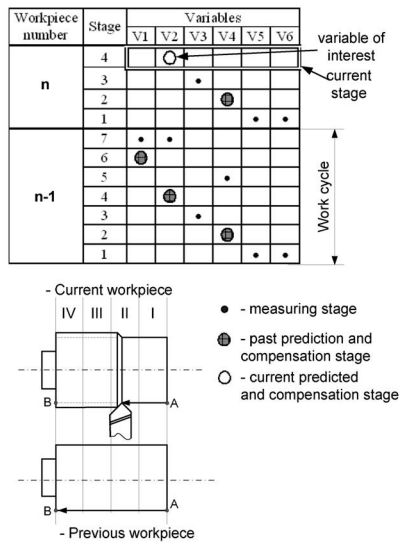


Fig 8. Dataset filling and exploiting

**3.3 The proposed online learning algorithm**

The proposed algorithm consists in the following steps:

- In the first step the normalization of the dataset is performed. Also the time evolution of the system is compensated. In practice the evolution of the variables values is quite monotonous and slowly varying with respect to the time period required for the entire batch manufacturing. Thus a linear model would fit properly the time evolution for the entire dataset. In this linear model, the time variable will be measured by the workpiece index number. The model structure will be:

$$\hat{V}_i(t) = a_i \cdot t + b_i \quad (1)$$

where  $i$  denotes the order number of the variable,  $\hat{V}_i(t)$  is the evaluated value of the variable  $V_i(t)$ ,  $t$  is the index number of the workpiece and  $a_i$  and  $b_i$  are constants, specific for variable  $V_i$ . All the variables will be compensated using the following formula:

$$V_{ic}(t) = V_i(t) - \hat{V}_i(t) \quad (2)$$

where  $V_{ic}(t)$  is the compensated value of the variable  $V_i(t)$ .

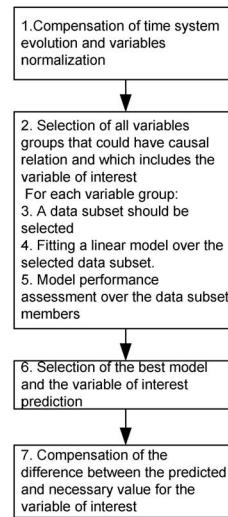


Fig. 9. The proposed online learning algorithm for dimensional control.

A new dataset which will contain the time compensated values for all the variables will be filled.

- In the second step all the monitored variables will be structured in all the possible combinations. Each combination contains a group of variables which always includes the variable of interest. These variable groups represent all the possible causal relations. For instance, in the example presented in Fig. 8, the variable of interest  $V_2$  could be modeled only using the measured in current workcycle variables  $V_3(n)$ ,  $V_5(n)$  and  $V_6(n)$ . This is why the causal relation can appear on one of the following groups:

$$(V_2-V_3), (V_2-V_5), (V_2-V_6), (V_2-V_3, V_5), (V_2-V_3, V_6), (V_2-V_5, V_6), (V_2-V_3, V_5, V_6)$$

- In the third step for each variables group a data subset will be filled by selecting from the entire dataset only the data corresponding to a number of  $k$  workpieces. These  $k$  workpieces will be selected so their Euclidian distance to current workpiece, corresponding to the selected variables group, taking in account only the selected group's variables, would have the smaller values.

- In the fourth step for each data subset a linear model is fitted. This model should have as variables only those contained in this variables group. The

coefficients of the linear model are computed using least square criterion.

- The next step implies the evaluation of each model. This evaluation is based on the deviation for each value of interest from the selected subset.
- In the sixth step the best linear model for fitting the causal relation between the variable of interest and the rest of monitored variables is selected. The model is the one for which the standard deviation of the variable of interest values is the lowest.
- The final step consists in the compensation action. The difference between the predicted value and the programmed value of the variables of interest is compensated.

### 3.3 Numerical and physical simulation results

The proposed control method for dimensional aspect was applied on artificial data and on data obtained from batch manufacturing in laboratory conditions. The obtained results were compared with the results obtained by using ANN models and best NN model facility.

#### Results obtained by simulation with artificial data

For a small number of previous manufactured workpieces best NNmodel did not identified the correct causal relation.

For a larger number of previous manufactured workpieces best NNmodel did identify the correct causal relation but the prognosis performance was low.

The proposed algorithm identified the correct causal relation in all the cases and the variable of interest was predicted with an average of 10% error.

#### Results obtained by data obtained from batch manufacturing in laboratory conditions

The physical simulations consisted in straight turning of a batch of 81 workpieces having the shape shown in Fig. 11.

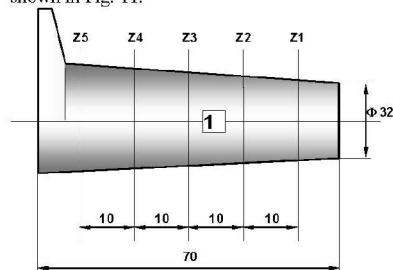


Fig 10. The blank used for simulation

During the machining several variables were monitored: cutting force, temperature of the cutting tool, power consumption in cutting process.

By applying the proposed algorithm, the average value of the workpiece errors decreased with more than a size range and the standard deviation decreased with 38%.

## 4 Conclusions

The research shown in this article pointed out the following conclusions:

- the proposed CNC structure permits integrates the error compensation algorithm and process stability will improve the RMT control
- the proposed procedure for chatter preventive control which is using SVM for stability evaluation is suitable for process control. The results of using this control structure with the stability preventive control were that the productivity increased.
- taking in account the time evolution of the system behavior, both with respect to the causal relations between the state variables and to the parameter values of the model, is important because it significantly increase the overall (dimensional) control performance,
- the proposed algorithm for dimensional control works well for all the batch workpieces even for the first machined workpieces,
- the reduced running time required by the algorithm allows its use for online correction,

### Acknowledgement

The authors gratefully acknowledge the financial support of the Romanian Ministry of Education and Research through grant PN-II-ID\_653/2007.

### References:

- [1] A. Caballero-Ruiz, Leopoldo Ruiz Huerta, Tatiana Baidyk, Ernst Kussul Geometrical error analysis of a CNC micro-machine tool, *Mechatronics, Volume 17, Issues 4-5, May-June 2007, Pages 231-243*
- [2] S.-H. Yang, K.-H. Kim, Y.K. Park and S.-G. Lee, Error analysis and compensation for the volumetric errors of a vertical machining centre using a hemispherical helix ball bar test, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology Volume 23, Numbers 7-8 / April, 2004*



- [3] S. Segonds, Y. Landon, M. Mousseigne and P. Lagarrigue, The characterization of the dimensional change of the Z-axis in NC turning, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 23,
- [4] Ho-Sang Kim, Eui-Jung Kim, Feed-forward control of fast tool servo for real-time correction of spindle error in diamond turning of flat surfaces, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 43, Issue 12, September 2003, Pages 1177-1183,
- [5] X. Li, Real-Time Prediction of Workpiece Errors for a CNC Turning Centre, Part 4. Cutting-Force-Induced Errors, *The International The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 17, Number 9 / May, 2001
- [6] P.-C. Tseng and J.-L. Ho, A Study of High-Precision CNC Lathe Thermal Errors and Compensation, *The International The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 19, Number 11 / June, 2002
- [7] H. Pahk and S.W. Lee, Thermal Error Measurement and Real Time Compensation System for the CNC Machine Tools Incorporating the Spindle Thermal Error and the Feed Axis Thermal Error *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 20, Number 7 / September, 2002
- [8] L. Jian and L. Hongxing, Modeling system error in batch machining based on genetic algorithms, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* Volume 43, Issue 6, May 2003, Pages 599-604
- [9] Jaspreet Dhupia, Bartosz Powalkaa, Reuven Katza and A. Galip Ulsoy, *Dynamics of the arch-type reconfigurable machine tool*, International Journal of Machine Tools and Manufacture Volume 47, Issue 2, February 2007, Pages 326-334
- [10] C.-K. Chen · Y.-M. Tsao - *A stability analysis of regenerative chatter in turning process without using tailstock*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 29 (2006) 29: 648-654
- [11] N. Sri Namachivaya and R. Beddini-Spindle *Speed Variation for the Suppression of Regenerative Chatter*- Journal of Nonlinear Science Vol. 13: pag. 265-288 (2003)
- [12] H. Z. Li, X. P. Li, X. Q. Chen - *A novel chatter stability criterion for the modelling and simulation of the dynamic milling process in the time domain*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 22 (2003) 22: 619-625
- [13] J. R. Pratt and A. H. Nayfeh - Design and Modeling for Chatter Control, *Nonlinear Dynamics* 19: 49-69, 1999, Kluwer Academic Publishers
- [14] N. H. Abu-Zahra and J. H. Lange - Tool Chatter Monitoring in Turning Operations Using Wavelet Analysis of Ultrasound Waves, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 20 (2002) 248-254
- [15] H. B. Lacerda and V. T. Lima- Evaluation of Cutting Forces and Prediction of Chatter Vibrations in Milling, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* no.1 Rio de Janeiro Jan./Mar. 2004
- [16] E. Soliman and F. Ismail - Chatter Detection by Monitoring Spindle Drive Current, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 13 (1997): 27-34
- [17] Bernhard E. Boser, Isabelle M. Guyon, Vladimir N. Vapnik - "A training algorithm for optimal margin classifiers", *Proceedings of the fifth annual workshop on Computational learning theory Pittsburgh*, Pennsylvania, United States, pp. 144 - 152, 1992
- [18] Corinna Cortes, Vladimir Vapnik - "Support-Vector Networks"- *Machine Learning Journal*, 20, pp. 273-297, 1995
- [19] M.M. SALEH, I.L. EL-ALLA and EHAB M.M. Stochastic Finite Element Based on Stochastic Linearization for Stochastic Nonlinear Ordinary Differential Equations with Random coefficients Proc. of the 5th WSEAS Int. Conf. on Non-Linear Analysis, Non-Linear Systems and Chaos, Bucharest, Romania, October 16-18, 2006 104
- [20] Aurel Gontean, Marius Oteşteanu, Sandra Rugină, Georgiana Sârbu-Doagă- Versatile Communication Solution for PLC Based Control Systems, Proceedings of the 2nd WSEAS International Conference on Dynamical Systems and Control, Bucharest, Romania, October 16-17, 2006
- [21] Mi-Young Kim SVM-based Clause-dependency Determination in Syntactic Analysis, Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Applied Computer Science, Tenerife, Canary Islands, Spain, December 16-18, 2006

## 6) Reconfigurable machine tool programming – a new approach, Epureanu A., Marin F.B., Marinescu V., Banu M., Constantin I, WSEAS Journal Transaction on System and Control, 2008 (revista indexata ISI)

WSEAS TRANSACTIONS on SYSTEMS and CONTROL

A. Epureanu, F.B. Marin, V. Marinescu,  
M. Banu and I. Constantin

### Reconfigurable machine tool programming– a new approach

A.EPUREANU, F.B.MARIN, V.MARINESCU, M.BANU, I.CONSTANTIN

Manufacturing Science and Engineering Department

Dunarea de Jos University

47, Domneasca St., Galati

ROMANIA

alexandru.epureanu@ugal.ro

**Abstract:** - This paper presents a new programming approach based on a proposed hardware and control architecture for the reconfigurable manufacturing tool machine. A new CAM is described based on virtual machining algorithm that optimizes feedrate scheduling based on geometric simulation and aims to improve the efficiency of cutting process developed using a reconfigurable machine, configured as lathe with a specific architecture. A searching procedure is proposed to find the parameter values corresponding to cutter locations along tool path during generation of the final surface.

**Key-Words:** - RMT programming, feedrate scheduling, reconfigurable machining system, numerical control, optimal control, virtual machining

#### 1 Introduction

Nowadays, companies building manufacturing machines must face fast changes happening on technical, commercial and economical fields. These emerging evolutions are the following:

- economy globalization, with the consequence the emphasis of competition;
- individualization of needs, what means products customization;

- capital dynamization, generating high requirements concerning investment efficiency;

- high versatility of small companies, for fast adaptation to market. At the time, the companies responses to these changes are based on the idea of extending some of the attributes of classic manufacturing system to define reconfigurability. Whereas Dedicated Manufacturing Systems (DMSs) have been designed to produce a specific part and Flexible Manufacturing Systems (FMSs) are designed to accommodate a large variety of parts even though the parts are not specified at the system design stage, the Reconfigurable Manufacturing Systems (RMSs) combines the advantages of DMS and FMS providing a suitable solution[1][2]. It is defined the new peculiar manufacturing system, reconfigurable manufacturing system, using six key characteristics: *i)* universality, *ii)* convertibility, *iii)* integrability, *iv)* scalability, *v)* diagnosability, *vi)* customisation. These systems are designed to adapt manufacturing to mixed products and volumes. The reconfigurable machine is conceived with standard and inter-operable components including actuated modules, fixtures and tools to be assembled into the machine with arbitrary architecture and degrees of freedom. The informations describing modules and

tools are stored in the machine database; for instance, the shape of the tools and the modules geometry.

The reconfigurable “plug-and-play” machine kinematics and dynamic modeling algorithms need to be developed. These algorithms are the basis for the control and simulation of reconfigurable manufacturing system. The concept of machine configuration optimization is introduced for the effective use of the rapidly reconfigurable machine. The issues involved in the reconfiguration process are represented by

- hardware modules reconfiguration
- software reconfigurability (both programming and control)

Examples of physical configurations (hardware reconfiguration) include building a new machine using the hardware modules. So far that concerns software reconfigurability is a must have to develop architectures and techniques to provide short ramp-up time. Control design determines appropriate process variables (modules displacements and velocities etc.), so that a configuration can be operated to fulfill the task. The concepts of the control paradigms, such as holonic manufacturing, bionic manufacturing, fractal companies, are proposed for the next-generation manufacturing systems. So far that concern the control concept, it was proposed [15] a software architecture based on a combination of object-oriented models and executable formal specifications. In this architecture, the machine control software is viewed as an integration of a set of reusable software components, each modeled with a set of event-based external interfaces for functional definitions, a control logic

driver for execution of behavioral specifications, and a set of service protocols for platform adaptation. The behaviors of the entire software can be viewed as an integration of behaviors of components and their integration.

The needs for interoperation of modules from different vendors and for flexible configuration of various functions are challenges to NC systems. In response to such challenges, various efforts have been made, such as Open Modular Architecture Controllers (OMAC) [11], Open System Architecture for Controls within Automation Systems (OSACA) in Europe [12], Open System Environment for Controllers (OSEC), Hierarchical Open Architecture Multi-processor for CNC (HOAM-CNC), Open Architecture Controller (UMOAC) by University of Michigan, Ann Arbor, USA etc. The common approach employed in these efforts is the adoption of an open, modular architecture to promote interoperation [13].

The nowadays CNC control system is inappropriate to consider as basis for the control of RMTs. Existing CNC systems support only CNC builder-specific NC program input and this limits the potential application of many NC programs that have the same functions with different formats varying one machine to another [6] [7] [8]. In the case of the RMT, where there is a wide range of configurations, using nowadays programming standards will be time consuming. Because of the issues of software reconfiguration the ramp-up time is considerable, as

However, so far that concerns programming of RMS there is no reference.

In nowadays CNC systems, the NC program processor is a very important component that determines the accurate resolving of machining intention generated from a CAM system [1]. The major functions of CNC processor include checking the syntax and decoding them into specific outputs such as motion command, PLC command, parameter setting, or error messages.

There have been three basic standards: RS274D (USA), ISO6983 (ISO) and DIN66025 (Europe) for NC program since CNC was invented. However, new RMT machine tool and control technology have undergone great development since then. Even for today's CNC there are a lot of new functions needed and controller-specific features not supported by these NC standards.

Also there is the issue of coding free-form surfaces using nowadays CNC programming languages, as these surfaces are used in a variety of applications. The conventional approach for surface machining is to use a series of straight lines to

approximate the part surface. These straight lines are subsequently translated into linear G codes by the computed-aided machining (CAM) software, and then sent to the computer numerical control (CNC) system. For a general free-form surface or parametric surface machining, this method is inefficient and error-prone. The conversion of surfaces into linear segments produces a large amount of data, which usually cause a lot of problems, such as lower feedrate, and longer data storage requirements [14].

Also, feedrate optimization problems are the subject to several possible constraints, building the framework for generating model. Firstly, the common restriction used in feedrate scheduling is constant material removal rate (MRR), [3]. In the MRR based approach, feedrate is dependent to either average or instantaneous volumetric removal rate. Secondly, the restriction is based on the process mechanics [4]. In this case the force-based models, feedrate is set to values which keep either average or instantaneous machining forces to prescribed values. These models computes either MRR or force values as a minimum allowable values, and are maintained at a constant level during processing.

The disadvantages of keeping at allowable level are in the first place, the efficiency is lowered and secondly, the optimization is incomplete performed, as it does not take into account several variables in the process such as chip width (determining risk of chatter), roughness or thickness (determining force overloading).

Commonly used CAM programs and NC code generators are based on geometric and volumetric analysis, but they do not concern the current blank surface shape to be processed. CAM software considers only the nominal dimensions inputted from CAD model [5] [6] [7].

Also planning the isoparametric tool path it is addressed to considerable long paths (due to the G-code limitation and the nowadays machine control system architecture) and not for adjacent cutter location resolution.

It is critical, but often difficult, to select optimal cutting conditions to achieve high productivity while maintaining high quality of parts.

Generating the optimal cutting conditions scheduling, described by NC programs, to produce the required geometry involves determination of the optimal cutter paths and machining parameters. The common practice is to set machining parameters such as feedrate, to constant value for the number of cutter paths, using machinability handbooks and experience of skilled machinist. The selected

parameters are often so excessive limited that efficiency is very low for the machining process.

In this paper it is proposed a new programming approach based on a proposed hardware and control architecture for the reconfigurable manufacturing tool machine. A new CAM is described based on virtual machining algorithm that optimizes feedrate scheduling based on geometric simulation and aims to improve the efficiency of cutting process developed using a reconfigurable machine, configured as lathe with a specific architecture. Also, a searching algorithm is proposed to find the parameter incremental values of all cutter locations along tool path for the generation of final surface. The proposed algorithm includes the following two main steps: evaluating blank real surface shape and searching for adjacent non-isoparametric cutter locations, in the conditions to meet the the restrictions.

The algorithm shall be embedded in a virtual machining system that optimizes machining process, based on geometric simulation, to improve the process efficiency, under the assumption of reconfigurable machines architecture.

Besides the efficient cutting condition scheduling goal, there is the advantage by using such virtual machining system, represented by the optimized choosing of the tool for a specific operation and a specific blank. The example given is taking into account a reconfigurable machine configured as a lathe. However, the algorithm may be extended to all cutting processing.

Paper has the following structure: section 2 present the problem formulation, section 3 contains the problem solution and section 4 summarizes the main conclusions achieved.

## 2 Problem Formulation

### 2.1 Variables and terms definition

We formulate the problem of optimizing the values of cutting processing to improve its efficiency. We consider to be addressed to a RMT configured as lathe with a specific architecture.

In order to define the problem, the issues involved and determine a solution, we need to define several variables according to our approach.

As shown in Fig.1, the insert cutting edge profile is divided defining remarkable (m) points; when we addressing to a current remarkable point on the cutting edge as  $j$  point. Similarly as depicted in Fig.2 the workpiece profile is divided in remarkable n

points and we referring to a current remarkable point on the workpiece profile as  $i$  point.

Current cutter location is described by  $(i,j)$  pair; while  $i$ , is defining the current cutter location,  $j$  is current cutter profile. Another variable in our optimization program is the variable  $k$ , which is the indexing variable for  $(i,j)$  pair.

As described below, the reconfigurable machine is configured as lathe with an additional degree of freedom represented by rotation of the tool assembly, with an  $\varphi$  angle, variable that determines  $j$  cutter profile.

Our search algorithm is using as reference calculation the previous cutter location  $(k-1)$ , as in Fig.2, representing the last selected cutter location. Consequently, every  $k$  position is associated with the  $\varphi(k)$ ,  $Z(k)$  and  $X(k)$  variable values.

In the proposed search optimization algorithm we use current  $L$  variable value defining the length  $\{P,Q\}$  which is the length of active cutting edge, as seen in Fig.2.

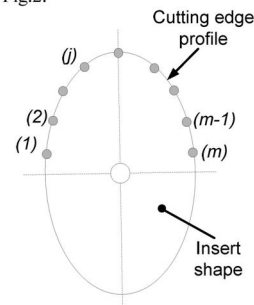


Fig.1 Insert

According to our approach there are several data to be used as input data:

Firstly, workpiece profile and cutting edge profile is inputted from CAD model, as we assume that all tool modules are described in the database stored in the reconfigurable machine information system.

Secondly, the blank profile is determined by on-machine measurement. Thirdly, it is inputted the restricted variables: allowable force - $F_a$ , allowable  $L$  - $L_a$  (the length of cutting active edge as shown in Fig.2 represented by PQ length), allowable chip thickness -  $a_a$  ( chip thickness), allowable roughness - $R_a$ .

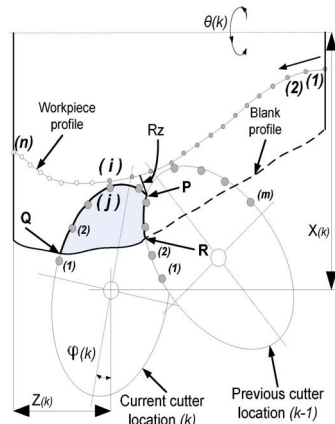


Fig.2 Current and previous cutter locations

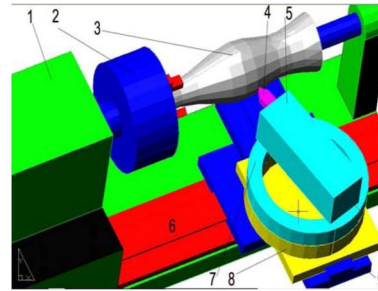


Fig.3 The reconfigurable lathe

position of controlled variables  $X(k)$ ,  $Z(k)$ ,  $\theta(k)$  and  $\varphi(k)$  computed from  $(i, j)$  pair.

Part surface generation it is performed by moving tool profile along helicoidally generating path, obtained by combining revolution of the part and the translation of the tool. The trajectory of the helicoidally path it is divided, as described above, by coordinates computing of a many successive  $(i, j)$  pair points to control motors that performs movement actions of the machine.

**2.2 Reconfigurable lathe description**

For a better understanding, the reconfigurable lathe hardware configuration and the control system is described below.

Our proposed architecture for the reconfigurable lathe is composed of virtual processing planning system, machining database, and "plug-and-play" hardware modules.

The reconfigurable lathe considered is build out of four independent modules, numerical controlled, with independent sensor and motors. These modules are main spindle, carriage, and the rotary tool assembly. The reconfigurable lathe, configured for cutting of longitudinal profiles, as shown in the picture, is made of the following parts: bed 1, main spindle 2, workpiece 3, cutting tool 4, tool holder 5, carriage 6, rotary tool assembly 7, cross-slide 8, slideway 9. Having a supplementary degree of freedom represented by rotation of cutting tool it is an advantage for tool to positioning, and using interpolation for x and z axis and the rotation of the tool it can be achieved peculiar surface processing. Using a configuration with rotary assembly tool parallel with the axel of the spindle, it can be processed surfaces such as poliexcentric revolution surfaces, complex surfaces or cams. The hardware modules (main spindle, tool holder, etc) are design as "plug and play" and are controlled directly using optimal control variable, by-passing the post processing phase of G-code generation. The control of the modules it is performed by sending simultaneously successive

**2.3 Problem statement**

Our objective is to determine  $(i, j)$  pair under the criteria objective of maximizing locally chip area.

While the search criteria in the MRR and force model are the MRR and the force respectively, in our approach the search criterion is the locally maximized chip area.

In the above two approaches the variable for controlling the process is the feedrate, whereas we are using two distinct variables, cutter location CL (or federate) and cutter profile (CP). The cutter profile variable is the additional freedom degree determined by rotary tool assembly.

Concerning the restrictions, in the case of MRR model, is the chip area which is set to a minimum allowable ( $A < A_a$ ), and in the case of force model, the restriction is the force ( $F < F_a$ ). Our approach defines four restrictions: ( $A_a > A(i, j)$ ,  $R_a > R(i, j)$ ,  $a_a > a(i, j)$ ,  $L_a > L(i, j)$ ).

The search technique used in our approach is exhaustive search by virtual machining.

Online control such as used in force model, need monitoring hardware; the proposed optimizing method needs a measurement system, which is performing every blank exploring.

### 3 Problem Solution

In order to program the RMT under the above stated conditions we need to state several key ideas to define our proposed RMT control:

- adaptive
- online
- optimal
- self-programming

The part-program should comprise information regarding the characteristics imposed on the manufactured object in order to be considered acceptable, and not information on the way in which the functioning cycle of the machine should develop

so that the object may have these characteristics – This means that the part-program should contain a list of targets and not a list of instructions. Starting from the targets included in the part-program, its structure of the machine should allow for negotiation of the plan design, plan analysis and plan proper execution. The part-program shall be very simple as it will contain only the targets written in a high-level language. Consequently the machine programming time shall be much shorter, which is crucial in case of small batch production.

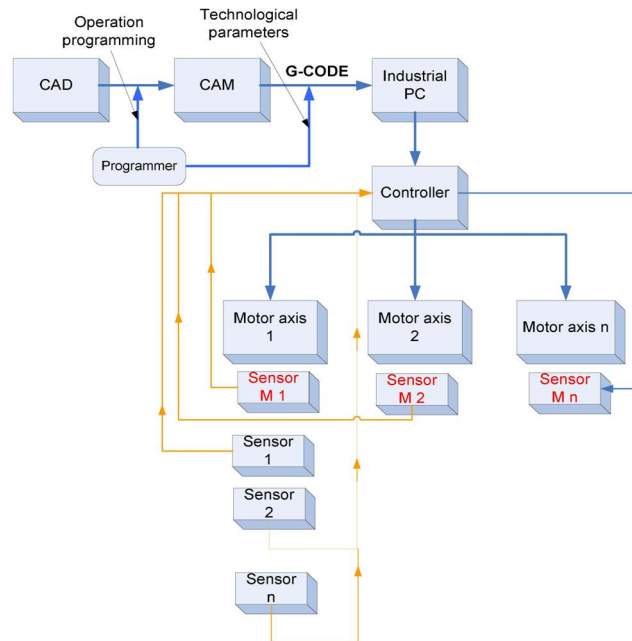


Fig.4 CNC control hardware architecture

For instance in Fig.4 it is described nowadays CNC conceptual control architecture. Traditionally, CAM has been considered as an NC programming tool used to generate CNC code to drive numerical controlled machine tools. Most of current numerical control (NC) systems adopt an architecture as described in Fig.4 A computer system, which is usually a general-purpose personal computer (PC) or

another kind of a computer, is chosen as the NC core system platform, where human machine interaction or interface (HMI), NC code editing and decoding functions are implemented. Functions such as interpolation and control, cutter radius compensation, general I/O (or logic control), servo control, etc., are implemented in several auxiliary controllers (such as PLCs – Programmable Logic



Controller). Consequently, the controllers are managing commands to servo drives to control

motors and read data from sensors.

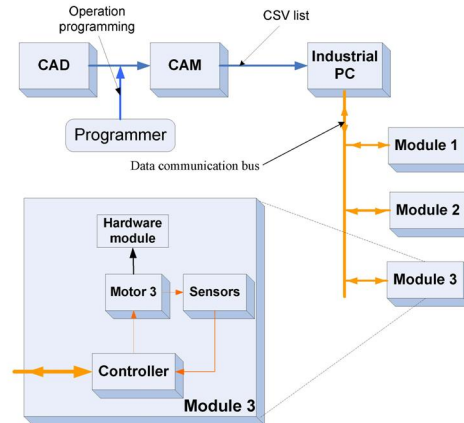


Fig. 5 Proposed RMT control hardware architecture

Our approach considers a bus able to handle communication for all modules. Compared to today's fieldbus architecture the hardware modules have close-loops control represented by an integrated controller able to communicate with industrial computer. The information send to hardware module is the required position only. Also, if a hardware module has specific sensors besides position control of its movement, these are to be handled by the integrated controller on the hardware module. Compared to nowadays CNC architecture, CAM is not providing source code to be interpreted and executed by machine, but an algorithm calculated with nominal values. Whereas modern CNC CAM software outputs source code describing geometric path, and none or few information concerning technological parameters (such as federate), our approach is providing the advantage of providing the values for technological description of the process. Therefore our CAM is adaptive and consequently we name it Adaptive-CAM (A-CAM). The algorithm computed in the A-CAM it is also computed in Algorithm running unit (ARU). The CAM running in process design phase is virtual machining considering nominal values. Consequently, the ARU running on the machine is running with measured values, which are continuously updated and computed. As shown in Fig.5 and Fig.6 it is inputted in the A-CAM the following information: CAD models of required

part, CAD model of the rough part, technical requirements of the finished part (such as tolerance range and roughness), operation description, and rough part material description (such as material hardness).

As depicted in Fig.7 modern CNC machine programming architecture is considering the following data flow. A CAD program is used for workpiece design. Based on the workpiece specification process planning is then performed using a CAPP (Computer Aided Process Planning) software package. Then, using a manufacturing process plan as input the part program is generated by CAM software. The CNC process this program and the result is the finished workpiece. No correction is performed during the machine running. In our proposed architecture Online Learning System is providing the parameter correction computed during process. This is not subject to the current paper. Also the stability of the process is not taken in account. Only the stability of each axis is assured during the machine setup by setting choosing a set of parameters.

The basic idea which is based our approach is that the programmer is inputting "the required part", "part to be processed" and "the requirements of finished part". The A-CAM distinctive software modules, is running in the design phase (A-CAM) considering nominal parameters (Fig.7). A CAE program is used to test current kinematical

configuration. However this is not subject of our paper. ARU, which is basically an extension of A-CAM, is outputting Continuous State Variable List data set representing the offset moving for each

module. According to us CSV data list is the part-program which is generated online and is taking into account the current part to be processed.

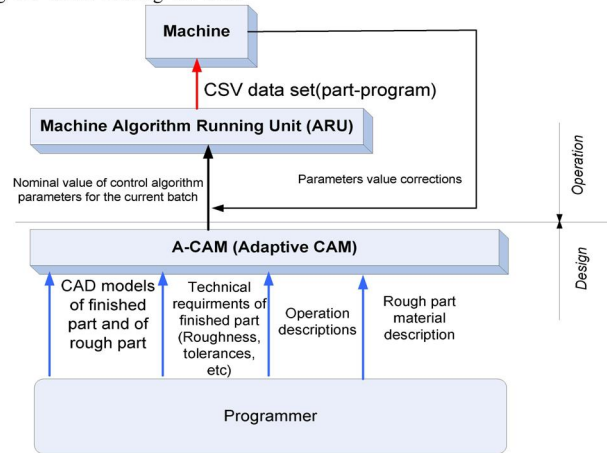


Fig. 6 A-CAM proposed architecture

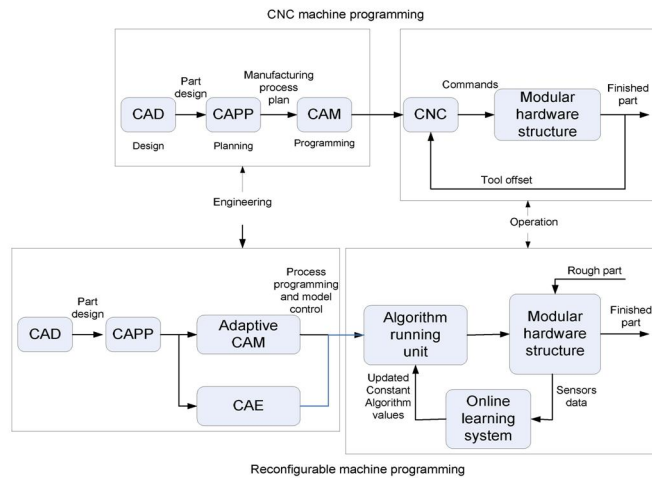


Fig.7 Proposed RMT programming

The programming and control architecture proposed is allowing commanding to the hardware modules optimized trajectory.

The main idea of the optimization algorithm is that, starting with the current  $i$  point on the profile part generated by  $j$  point on the tool, it is searched the



next  $i$  cutter location and the next cutter profile  $j$  coordinate point, taking into account the restrictions defined by restricted variables ( $A_{ij} < A_a$ ,  $L_{ij} < L_a$ ,  $a_{ij} < a_a$ ,  $R_{ij} < R$ , with the maximum chip area, in order to maximize productivity.

For generation of certain  $i$  point on the workpiece profile, the tool must be positioned tangent to this profile in a  $j$  point.

For this current cutter position, it is computed the values of controlled variables  $A_{ij}$ ,  $L_{ij}$ ,  $a_{ij}$ ,  $R_{ij}$ . Afterwards it is tested restrictions conditions  $A_{ij} < A_a$ ,  $L_{ij} < L_a$ ,  $a_{ij} < a_a$ ,  $R_{ij} < R$  and also of it is satisfied restriction that  $j$  point is on the active cutting edge. The results of the testing are consequently stored.

Fig.8 depicts the generation sequence for final surface, using optimization algorithm. For instance, the point  $i=21$  on the workpiece profile and point  $j=16$  on the cutting profile describes the starting point for the searching of next point for an 360 revolution (pair (21,16) is the previous cutter location).

To achieve this, it is tested one at a time tool position for  $i=22$  and the points that verify restrictions are stored. The searching it is finalized when it is found a point in the final surface profile, with all points on the tool profile, tangent, that do not verifies conditions. Points  $i=25$  and  $j=15$  is the pair points for which chip area is maximized for the given points. It is considered that the new  $i$  point, in this case,  $i=25$  is the correct cutter location and the search algorithm is continued searching the next point referred to the last  $(i,j)$  pair location.

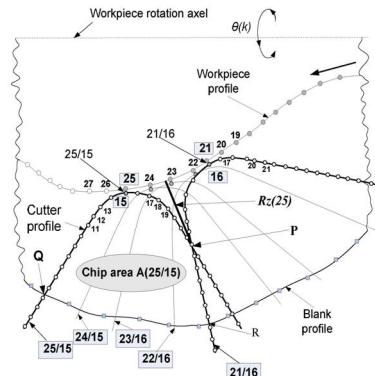


Fig.8 An example for search loop  
Trajectory from point  $i=21$ ,  $j=16$ , to point  $i=25$ ,  $j=15$ , it is described by the points  $i=22,23,24$ ,

dividing the propeller resulted from one revolution, in four intermediary steps, with coordinate  $X$ ,  $Z$  and  $\Delta\theta$ . All intermediary  $(i,j)$  pair coordinates are stored with their restricted variables.

In sort, as shown in Fig.8, the proposed algorithm contains the following steps:

- Preparatory steps
- 1) workpiece and tool CAD model are inputted in the optimizing system;
  - 2) the blank profile is measured on the machine;
  - 3) the restricted variables values are inputted in the virtual manufacturing program
- Scheduling optimizing steps
- 4) the tool profile it is positioned tangent with the final profile, successively in all points on the tool.
  - 5) it is computed the restriction conditions for all positions and its characteristics,
  - 3) when all conditions are denied, then it is selected an intermediary position with maximum area,
  - 4) the algorithm it is repeated starting with 1) until the tool reaches the end of the profile.
  - 5) the software output are the  $(i,j)$  pair coordinates
  - 6) processing cinematic configuration of the lathe by intermediary of the  $(i,j)$  pair coordinates there is obtained the controlled variables values -  $X(k)$ ,  $Z(k)$ ,  $\theta(k)$  and  $\phi(k)$  - to be send to the modules by ARU.

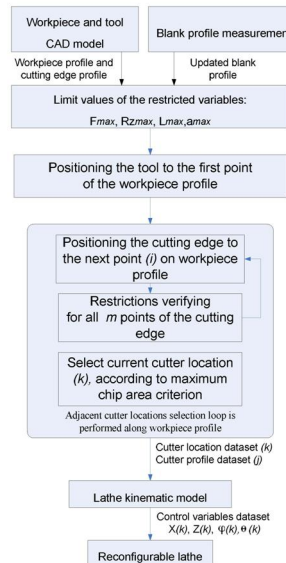


Fig.9 Algorithm basic steps

Algorithm testing was performed using the software developed in this research. It is important to note that the experimental tests shown in the Fig.10 was executed using arbitrary scale and on few sequences, for an acceptable picture accuracy.

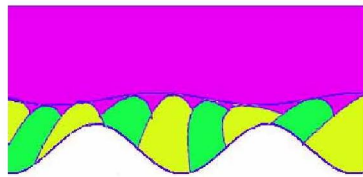
The histogram is given bellow to demonstrate the performances of the algorithm. As shown in Fig.11, a) image is representing the successive position of the cutting edge using our algorithm and lathe architecture, whereas in b) image it was simulated constant MRR based approach with classical lathe architecture.

The yellow and green area depicts the cutting tool successive position.

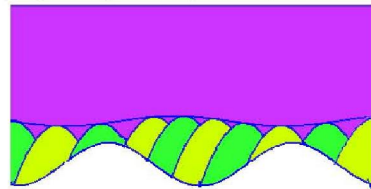
It was noticed an average efficiency improvement up to 20%, resulting a higher cutting productivity. Compared with the classical case, the additional freedom degree represented by rotary tool assembly is the cause for the increased productivity. Secondly, the computation of all four restrictions, instead of one or two, assures that the process is correctly performed according to the specifications.

As seen in Fig.7, when the process is based on MRR approach, and there is no limitation concerning the length of the edge, it is possible to emerge a situation could cause instable process because of the vibration.

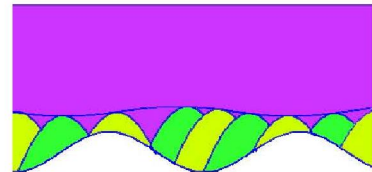
Furthermore, there is the possibility to undermine the roughness or chip width allowable values.



a) Proposed algorithm sequences -F,L,a,R restricted



b) MRR based algorithm sequences F and R restricted



c) MRR based algorithm F only restricted

Fig.10 Graphical representation of the cutter location and cutter profile during virtual machining

In the Fig.7 it is shown a histogram representing the situation seen in Fig.6, c showing the roughness, chip width and cutting edge length variations for each cutter location, to evaluate the necessities of more than one or two restrictions.

Since a and R values are greater than the allowable value for the given example, see Fig.7 a) and b) respectively, all four variables are required for the establishment of feedrate scheduling. It can be stated that is compulsory requirement for using more than one restriction, in terms of stability process and control.

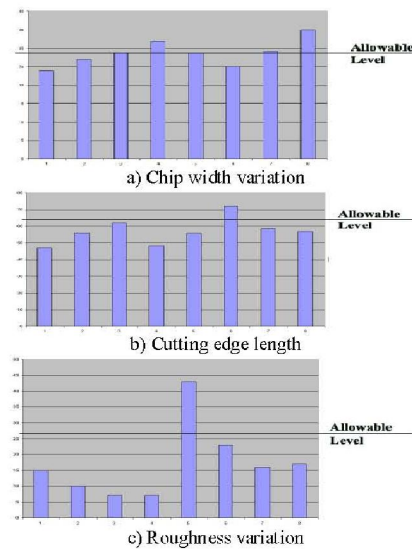


Fig.11 Histograms showing undermining allowable levels

#### 4 Conclusion

Compared with the classical case, the additional degree of freedom represented by rotary tool assembly, is determining a 20% productivity increase.

The computation of all four restrictions instead of one or two, assure that the process is correctly performed according to the specifications, and the processing parameters are in the allowable range. The proposed control concept proofing was aimed by virtual simulation by processing cinematic configuration of the lathe by intermediary of controlled variables values (  $X(k)$ ,  $Z(k)$ ,  $\theta(k)$  and  $\varphi(k)$  ) to be send to the modules during optimized virtual processing. We conclude the new A-CAM proposed is a viable option for RMT programming and it can be implemented physically.

Several topics remain to be studied in the future:

-firstly, methodologies to rapidly refine the control reconfiguration describing current machine architecture in order to accurately identify hardware modules.

-secondly, it is challenge to design controller embedded in hardware modules to meet RMT requirements.

#### Acknowledgement

The authors gratefully acknowledge the financial support of the Romanian Ministry of Education and Research through grant PN-II-ID\_653/2007.

#### References:

- [1] R. Galan, J. Racero, I. Eguia, J.M. Garcia, A systematic approach for product families formation in Reconfigurable Manufacturing Systems, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 23, 2007, 489–502
- [2] Jaspreet Dhupia, Bartosz Powalka, Reuven Katz, A. Galip Ulsoy, Dynamics of the arch-type reconfigurable machine tool, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 47, 2007, 326–334
- [3] Xl. Hwan Pyo Moon, Equivolometric offsets for 2D machining with constant material removal rate, *Computer Aided Geometric Design International 2007 Elsevier B.V.*, Vol.X, No.X, 2007
- [4] Jeong Hoon Ko, Won Soo Yun, Dong-Woo Cho, Off-line feed rate scheduling using virtual CNC based on an evaluation of cutting performance, *Computer-Aided Design* 33, 2003, 383-393
- [5] Stanislav Makhanov, Optimization and correction of the tool path of the five-axis milling machine Part 1. Spatial optimization, *Mathematics and Computers in Simulation* 75, 2007, 210-230
- [6] Stanislav Makhanov, Optimization and correction of the tool path of the five-axis milling machine Part 2: Rotations and setup, *Mathematics and Computers in Simulation* 75, 2007, 231-250
- [7] B.S. Soa, Y.H. Jung b., T.R. Kurfess c, S.M. Hwang, 5-Axis machining speed enhancement by step length optimization, *Journal of Materials Processing Technology* 187–188 75, 2007, 2-5
- [8] M. Gallo, G.Guizzi, V. Zoppoli, A methodological approach to develop an integrated simulation system in manufacturing processes, *6th WSEAS International Conference on System and Simulation and Engineering*, 2007
- [9] M. Paolucci, R. Revetria, F. Tonelli, An Agent-based System for Sales and Operations Planning in Manufacturing Supply Chains, *6th WSEAS International Conference on System and Simulation and Engineering*, 2007
- [10] M. Yurtseven, Design and performance analysis of a linear quadratic Gaussian controller in a manufacturing process, *6th WSEAS International Conference on Circuit, System, Electronic, Control and Signal Processing*, 2007
- [11] OMAC API Work Group (1999) OMAC API set, Version 0.23. Work-ing document. <http://www.isd.mel.nist.gov/projects/omacapi/>
- [12] OSACA (1996) Open system architecture controls within automation systems. Final report. <http://www.osaca.org/>
- [13] Yi-Hong Long & Zu-De Zhou & Quan Liu & Ben-Yuan Chen & Heng-Lin Zhou, Embedded-based modular NC systems, *Int J Adv Manuf Technol*, 2008
- [14] Wei Li & Yadong Liu & Kazuo Yamazaki & Makoto Fujisima & Masahiko Mori, The design of a NURBS pre-interpolator for five-axis machining, *Int J Adv Manuf Technol*, 2008
- [15] Young KW, Piggin R, Rachitrangsan P (2001) An object-oriented approach to an agile manufacturing control system design. *Int J Adv Manufact Technol*, 2006

7) **Method for online identification of the dimensional error - state variables relation applied to manufacturing machines**, Constantin I., Epureanu A., Marinescu V., Banu M., Marin F.B. Annals of the „Dunărea de Jos” University , Fascicle V, Year XXVI (XXXI), ISSN 1221-4566, 2008, (publicatie indexata **BDI**).

## **Method for Online Identification of the Dimensional Deviation - State Variables Relation Applied to Manufacturing Machines**

Ionut CONSTANTIN, Alexandru EPUREANU,  
Vasile MARINESCU, Mihaela BANU, Florin Bogdan MARIN  
“Dunărea de Jos” University of GALAȚI

### **ABSTRACT**

*In this work a new method for online identification of the relation between the dimensional deviation and the cutting force, with the object of building a mathematical model to be used for online compensation of the dimensional error. The key idea is to identify this relation separately for each one of the two generating curves (the generatrix and the directrix) using the SVM regression technique. The resulting mathematical model can be used in order to predict the values for the dimensional deviation based on the current position of the tool and on the measured values of the cutting force. The identification method was tested for an entire batch of turned workpieces. The results showed that by using the proposed method the machining error can be reduced by 2,5 times.*

**Keywords:** *machining system identification, SVM regression, dimensional error compensation, surface generatrix and directrix.*

### **1. Introduction**

Dimensional deviation depends on a set of state variables of the manufacturing systems. Identifying the model of dimensional deviation is a difficult task because of the diversity of the state variables nature: cutting forces, temperature field and tool position. Because of the diverse nature of the state variables often, a sensor fusion system is required. The identification process must be rapid in order to generate a model to be used for dimensional error compensation. The workpieces resulted from the manufacturing process must be measured using a measuring system that can transmit data back to the control system of the machine tool. A better approach is to use measuring system built in the machine. “On machine measurement” is not a new concept. Cho [1] proposed a dimensional error compensation system equipped with an OMM system. The system modeled the dimensional

deviation based only on the process parameters using a polynomial neural network.

The identification of the dimensional dimension was also used for predictive control by the researchers for NIST. They developed a method for compensating the errors based on intermittent inspection [2]. The error model was based on spline functions.

Fung developed a predictive system [3] that uses on machine measurement system for predictive control of dimensional deviations. The system uses the measured values of the cutting forces and the measured dimension of the semi finished in order to predict the dimensional deviation using ARMAX and NARMAX models.

Similar predictive systems were also proposed in [4, 5, 6]

All these approaches have a main drawback: the generation process is not taken in account.

In this paper a new concept is proposed identification of the relation between the



dimensional deviation across each of the generating curves and the manufacturing process state variables.

### 2. Problem formulation

If we consider a manufacturing batch consisting in several workpieces, the dimensional deviation differs for each workpiece. This inconsistency is caused by the dimensional, geometric and material inconsistencies. Moreover, the machining system behavior is changing in time, implying another variation of the dimensional deviation. The slow evolution in time and space of the dimensional deviation can be compensated by frequent modification of the compensation value. The rapid evolution of the can be compensated by using a control loop. Based on these observations a solution to the dimensional deviation compensation arises. This solution implies the online identification of the relation between the dimensional deviation and the state variables which are changing in time, associated with an adaptive control loop for correction control. Practically, it can be seen that the dimensional deviation evolution by the direction of the generatrix (the profile of revolution surface) is slow varying in time, whereas the evolution by the direction of the directrix (workpiece rotation) is more rapid.

### 3. The experimental stand

With a view to development of a method for prediction and online compensation of the dimensional deviations an experimental stand was used. This stand consisted in an experimental lathe equipped with a numerical control system. The control system was connected by an Ethernet network to a data acquisition system. From the machine control system, the data acquisition system acquires data regarding the machine axis position.

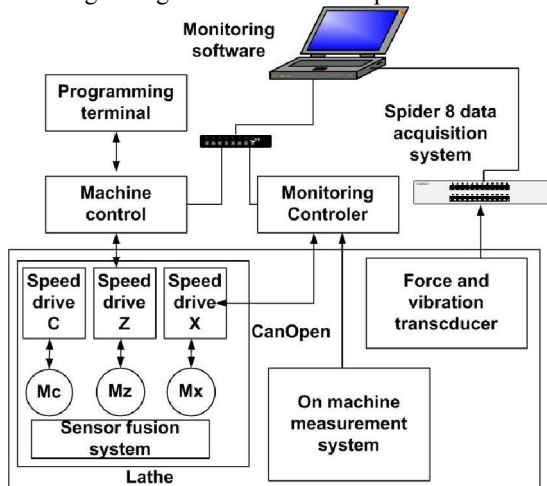


Fig. 1. The experimental stand structure

Strain gauges were fixed on the tool in order to measure the cutting force components. In order to measure the cutting force using strain gauges a data acquisition system type Spider 8 produced by Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH. Also in order monitor the lathe motor speed drives parameter,s a second controller was used. This controller is a CanOpen master controller which can communicate with the speed drives which are CanOpen slaves. The master controller acquires from each slave the following parameters: motor current, torque, supplied power, energy absorbed. Also this controller is connected to a measuring system (on machine measuring function).

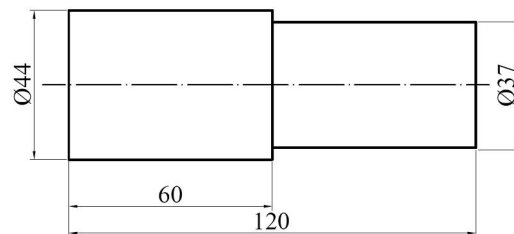
After each workpiece was manufactured, its dimension was measured using two length gauges manufactured by Heidenhain. The resolution of these length gauges was 1µm and their accuracy was ± 1µm. The length gauges were placed in contact with the workpiece and then moved across the workpiece length. The spindle was rotated with 30 revolution per minute.

The following state variables were measured and their values were recorded:

- two of the force components, namely Fx and Fz
- the current and the energy absorbed by the lathe motors,
- the tool coordinates during the operation,
- the measured diameter of the worpieces.

### 4. The experimental program

A batch of 40 workpieces was processed. Each workpiece surface was divided in 7 zones with the length of 8mm. For each zone a conic surface was turned. The shape and the dimension of the workpieces and of the semi finished is presented in figure 2.



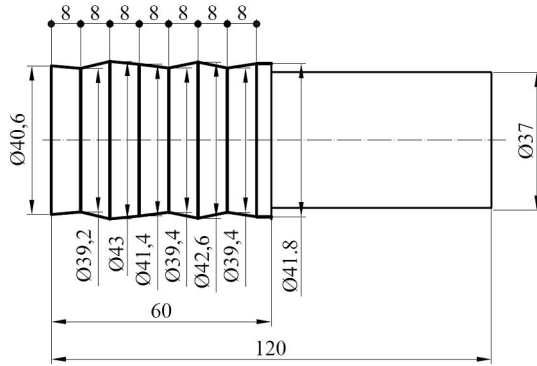


Fig. 2 - The seminised and workpieces processed

Data was recorded during the manufacturing and measuring process and then analyzed. The main aspect of the analysis was to determine the dependencies between the dimensional deviation and the state variables. The evolution of the dimensional deviation in respect with cutting force, the spindle motor absorbed current and the spindle torque or an workpiece is represented in figure 3.

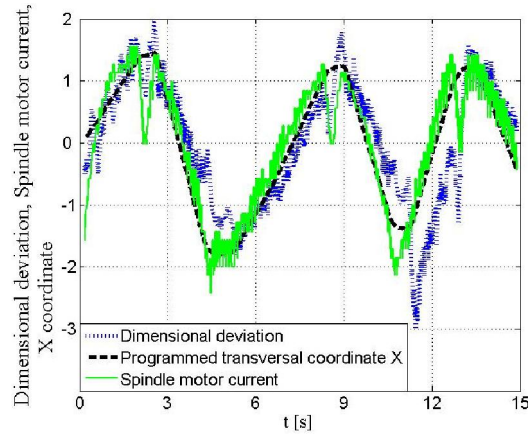


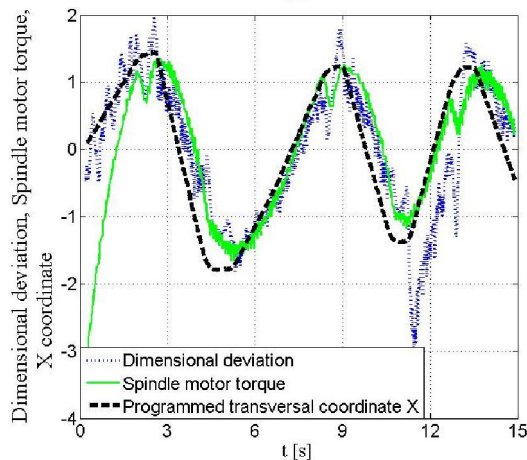
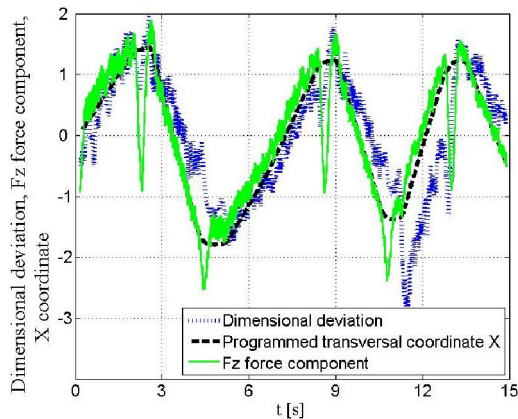
Fig.3 -The dependencies between the dimensional deviation and force, C motor current and C motor torque

In order to graphically analyze the dependency between the state variables and the dimensional deviation, each state variable was normalized using this transformation:

$$m^*(t) = \frac{m(t) - \bar{m}}{\sigma_m}$$

where  $m(t)$  represent the variable at  $t$  time,  $\bar{m}$  and  $\sigma_m$  represents the variable average value and respectively, the variable standard deviation over the entire workpiece manufacturing process. After this transformation each state variable will have the average value equal to 0 and standard deviation equal to 1. For this reason the variables shown in figure 3 don't have associated units.

From this figure it can be seen that the dimensional deviation is well correlated with the state variables associated with the spindle motor, but the force is a better indicator.



### 5. The prognosis of the dimensional deviation

The problem of dimensional deviation prognosis can be divided in two sub problems:

- the problem of the dimensional deviation in respect with the directrix programmed profile,
- the problem of the dimensional deviation in respect with the generatrix programmed profile.

By analyzing the data referring to the dimensional deviation and force over time we can determine that both this signals present an harmonic component. Using Fourier analysis (FFT algorithm) we determined the frequencies or each component. The frequency of the harmonic component with the highest amplitude was 15 Hz force and 0,5 Hz for the dimensional deviation. The dominant frequency of force signal is caused by fixing error of the semi finished, it corresponds to the spindle number

of revolution per minute 800 rpm=800/60=15Hz. The dominant frequency for dimensional deviation was about 0.5 Hz which also corresponds to the spindle number of revolution during the measuring stage 30rpm=30/60=0,5Hz. The amplitudes values differ from each workpiece this ratio is dependent with the excentricity of the workpiece. This error component corresponds to the dimensional deviation across the directrix direction. In order to analyze the component of the dimensional deviation across the generatrix the directrix component must be removed.

We consider the first workpiece of the batch. This workpiece will be used in order to determine in a first phase the dimensional dependencies between the force value and the dimensional deviation. In order to do this, the first workpiece will be considered as a test workpiece. The machining allowance for this first workpiece will be divided in two parts, the first part will be used for the test, while the last part will be used for finishing the part. The test workcycle result will be the same shape but slightly larger.

During the workcycle the time evolution of the cutting force, of the dimensional deviation in respect with the Z axis coordinate of the lathe

In figure 3 it can be seen that the dimensional deviation evolution is different for different parts of the workpiece characterized by different conicities. Also the rigidity of the technological system is different across the Z axis. Given these observations we modeled the dimensional deviation and the cutting force using Support Vector Machine regression technique in relation with the Z coordinate.

Support Vector Machine was developed at AT&T Bell laboratory by Vapnik and co-workers [7, 8]. Initially this technique was used for classification problems. The technique was used with great success in practice to solve difficult task such as optical character recognition, face recognition, spam detection, genetic research. The first technique for regression was also developed by Vapnik [9] and was called  $\epsilon$ -SV. Suppose that after we monitor a process we have a dataset composed by pairs of values  $\{(\mathbf{x}_1, y_1), \dots, (\mathbf{x}_n, y_n)\} \subset \mathcal{X} \times \mathbf{R}$ .  $\mathcal{X}$  defines the space of the input variable (the input variable is a vector  $\mathbf{x}_i$ ) and could be for instance  $\mathbf{R}^n$  if the dimension of input variable is  $n$ . The variable that will be predicted is  $y$ . Initially the algorithm is trained using data obtained from monitoring stage. The purpose to determine a function  $f(x)$  that would approximate the target outputs  $y_i$  with a maximum deviation equal with

$\epsilon$  and also the function must be as flat as possible. In linear case of the problem the function was this form:

$$f(x) = \langle w, x \rangle + b, \text{ with } w \in \mathcal{X}, b \in \mathbf{R}.$$

The objective is to find the proper parameters  $w, b$  in order to keep the empirical loss function defined as:

$$R_{emp}(w, b) = |y - \langle w, x \rangle - b|$$

bellow a fixed value  $\epsilon$ .

This is equivalent to solve this optimization problem:

$$\begin{aligned} & - \text{minimize } \frac{1}{2} \|w\|^2 \\ & - \text{subject to } \begin{cases} y_i - \langle w, x_i \rangle - b \leq \epsilon \\ \langle w, x_i \rangle + b - y_i \leq \epsilon \end{cases} \end{aligned}$$

A function that could meet all this conditions does not always exists, so in order to find the best function that can approximate the training outputs, the soft margin approach introduced by Vapnik and Cortes was used:

$$\begin{aligned} & - \text{minimize } \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^n (\xi_i + \xi_i^*) \\ & - \text{subject to } \begin{cases} y_i - \langle w, x_i \rangle - b \leq \epsilon + \xi_i \\ \langle w, x_i \rangle + b - y_i \leq \epsilon + \xi_i^* \\ \xi_i, \xi_i^* \geq 0 \end{cases} \end{aligned}$$

The Lagrangian for which a saddle point must be found is:

$$\begin{aligned} L = & \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^n (\eta_i \xi_i + \eta_i^* \xi_i^*) - \\ & \sum_{i=1}^n \alpha_i (\epsilon + \xi_i^* + y_i - \langle w, x_i \rangle - b) \\ & - \sum_{i=1}^n \alpha_i (\epsilon + \xi_i - y_i + \langle w, x_i \rangle + b) \end{aligned}$$

With  $\alpha_i^{(*)}, \eta_i^{(*)} \geq 0$ . Some of this lagrangian multipliers will be 0. So the solution will be determined by some vectors from the training data, vectors for which the lagrangians multipliers will be different from 0. This vector are called support vectors. The model parameters will depend on this parameters. The solution will be:

$$f(x) = \sum_i (\alpha_i - \alpha_i^*) \langle x, x_i \rangle + b$$

For non-linear problems like our problem the scalar product  $\langle x_i, x \rangle$  can be replaced with a nonlinear function called kernel function.

This kernel function is a function that can be expressed as a dot product of similar functions:  $k(x, x_i) = \langle \phi(x), \phi(x_i) \rangle$ . The kernel trick is to map the data in a space with a higher dimension using a transformation  $x \rightarrow \phi(x)$ .

We trained the algorithm (implemented in Weka package [10]) using pair of data obtained from process and we obtained two functions:  $F(Z)$  and  $\delta(Z)$ . The kernel function used was the radial basis function RBF.

$$k(x, x_i) = e^{-\gamma \|x_1 - x_2\|}$$

The  $\gamma$  parameter value was set to 10 after testing different parameter values using 10 fold cross validation technique. Also using the same technique the models C parameter was set to 100 and  $\epsilon$  parameter to 0,01.

Using SVR technique was preferred because it's resistance to outliers presence. In figure 4 the cutting force evolution is presented along with the cutting force evolution modeled with SVM.

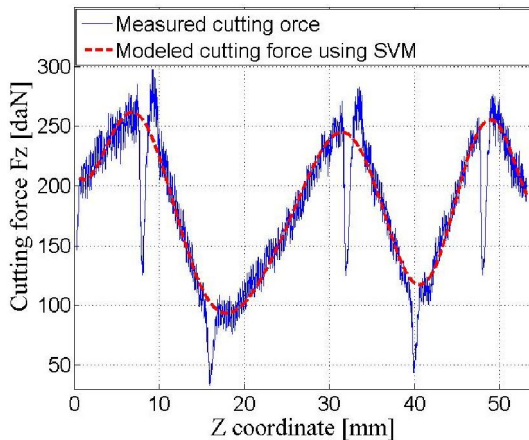


Fig.4 –The cutting force evolution and the model using SVM

In figure 5 the dimensional deviation evolution is presented along with the result of the model using SVM. As depicted in the picture bellow, oscillations which are dimensional deviations across the direction of the directrix, are removed and the modeled deviation signal represents the dimensional deviation across the direction of the generatrix.

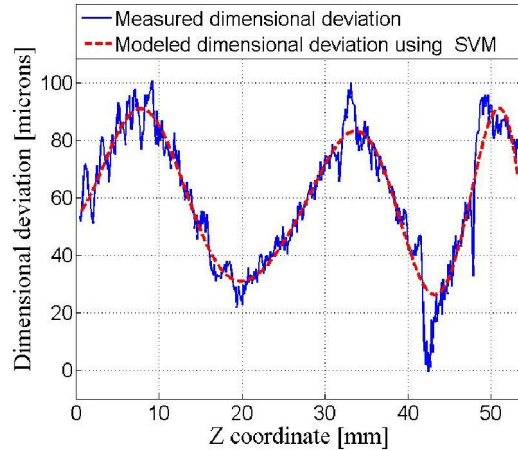


Fig.5 –The dimensional deviation and the model using SVM

Using the data obtained by the SVM models a third model was trained, a model that will approximate the relation between the dimensional deviation, cutting force and the Z coordinate  $\delta = \delta(Z, F)$  (figure xx).

The obtained model was used for predicting the error of the next workpiece. During the next workpiece the Z coordinate is known, also the average value of the force is computed. These values are inputted in  $\delta = \delta(Z, F)$ .

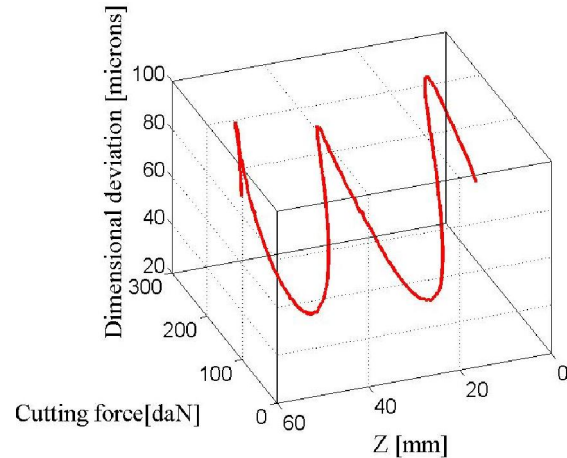


Fig.6 –The grafical representation of the relation between Z coordinate, cutting force and dimensional deviation



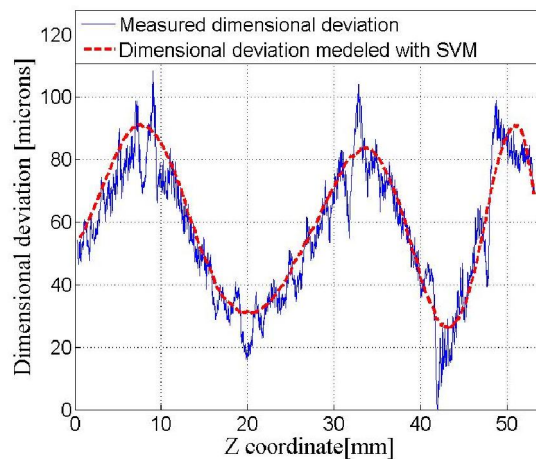


Fig.7 –The predictions made using SVM

As depicted in above picture the prediction performance was fairly good. The prediction was three times better then the case of prediction made by the average value of the error of the previous part.

## 5. Conclusions

In this work a new method for online identification and prediction is proposed. The identification of the dimensional deviation in relation with the state variables was applied for a real manufacturing system, a lathe.

The identification method is different among two direction: directrix and generatrix. Predictions were made for the dimensional deviation on the generatrix direction. The prediction was made using an algorithm that uses SV regression.

The prediction results were good the prediction precision increased 2 times.

## References

1. Cho Myeong-Woo, Kim Gun-Hee, Seo Tae-II, Hong Yeon-Chan ,Cheng H. Harry, *Integrated machining error compensation method using OMM data and modified PNN algorithm*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 46 (2006) 1417–1427
2. H. T. Bandy M. A. Donmez D. E. Gilsinn C. Han M. Kennedy A. Ling N. Wilkin K. Yee. , *A Methodology for Compensating Errors Detected by Process-Intermittent Inspection*, NISTIR. 6811, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, October 2001
3. Fung H.K. Eric, Wong Y.K, Ho H.F, Mignolet P. Marc, *Modelling and prediction of machining errors using ARMAX and NARMAX structures*, Source: Applied Mathematical Modelling, Volume 27, Number 8, August 2003 , pp. 611-627(17)
4. Zhan-Qiang Liu *Repetitive Measurement and Compensation to Improve Workpiece Machining Accuracy*, Int J Adv Manuf Technol (1999) 15:85–89
5. Li X. *Real-Time Prediction of Workpiece Errors for a CNC Turning Centre, Part 1. Measurement and Identification* Int J Adv Manuf Technol (2001) 17:649–653

6. Shane A. Carlson, W. Edward Red and C. Gregory Jensen - *Development of a Variational Part Model Using In-Process Dimensional Measurement Error*, Computer-Aided Design & Applications, Vol. 3, Nos. 1-4, 2006, pp 405-414
7. B E Boser, I.M Guyon. V.N Vapnik. *A training algorithm for optimal margin clasifier*. In D.Haussler, editor, Proceedings of the Annual Conference on Computational Learning Theory, pg 144-152, 1992
8. C. Cortes and V. Vapnik. *Support Vector Networks Machine learning* , 20:273-297, 1995
9. V.Vapnik, *The nature of statistical learning* , Springer Verlag 1995
10. Ian H. Witten and Eibe Frank, *Data Mining: Practical machine learning tools and tehniques, 2nd edition*, Morgan Kaufman, San Francisco 2005

## Acknowledgement

The authors gratefully acknowledge the financial support of the Romanian Ministry of Education and Research through grant PN\_II\_ID\_653/2007.

## **Metodă pentru identificarea liniilor de deviație dimensională – relația variabilelor de stat aplicate la mașinile unelte**

### **Rezumat**

In lucrare se prezinta o metoda de identificare online a relatiei dintre deviatia dimensionala si forta de aschiere, in scopul constructiei unui model destinat compensarii online a erorii dimensionale. Ideea de baza a metodei este identificarea acestei relatii separat pentru fiecare dintre cele doua curbe generatoare ale suprafetei (generatrix and directrix) folosind tehnica SVM regression. In concret, modelul matematic obtinut permite prognoza deviatiei dimensionale pornind de la valoarea masurata a fortei de aschiere si coordonata punctului curent. Metoda de identificare a fost testata experimental in cazul strunjirii unui lot de piese. Rezultatele obtinute au aratat ca prin aplicarea metodei eroarea de prelucrare eroarea de prelucrare poate fi diminuada in medie de 2.5 ori.

## **Méthode pour l'identification en ligne de la déviation dimensionnelle - relation de variables d'état appliquée aux machines de fabrication**

### **Résumé**

Dans ce travail une nouvelle méthode pour l'identification en ligne de la relation entre la déviation dimensionnelle et la force de découpage, avec l'objet d'établir un modèle mathématique à employer pour la compensation en ligne de l'erreur dimensionnelle. L'idée principale est d'identifier cette relation séparément pour chacune des deux courbes se produisant (la génératrice et le directrix) utilisant la technique de régression de SVM. Le modèle mathématique en résultant peut être employé afin de prévoir les valeurs pour la déviation dimensionnelle basée sur la position actuelle de l'outil et sur les valeurs mesurées de la force de découpage. La méthode d'identification a été examinée pour une série entière d'objets tournés. Les résultats ont montré que cela en employant la méthode proposée l'erreur d'usinage peut être réduite par 2.5 fois.

8) **Identification of the surface roughness-state variables and its application to the high-speed machining control**, Vacarus V., Epureanu A., Maier C., Paunoiu V., Annals of the „Dunărea de Jos” University , Fascicle V, Year XXVI (XXXI), ISSN 1221-4566, 2008, (publicatie indexata **BDI**).

## **IDENTIFICATION OF THE SURFACE ROUGHNESS-STATE VARIABLES RELATION AND ITS APPLICATION TO THE HIGH-SPEED MACHINING CONTROL**

PhD. Stud.Eng. V. Vacarus<sup>1</sup>,  
PhD. Prof.Eng. A.Epureanu<sup>1</sup>,  
PhD. Prof.Eng. C. Maier<sup>1</sup>,  
PhD. Prof.Eng. V. Paunoiu<sup>1</sup>,

<sup>1</sup> University „Dunarea de Jos”, Galati, Romania

### **ABSTRACT**

*In this paper surface roughness, obtained by machining with different cutting speeds, is analyzed. A special experimental stand was developed for this. Surface roughness was investigated using digitally device Surtronic 3+ and was analyzed with specific software Talyprofile. Materials used for this study of roughness at high speed machining conditions are six brands of high and medium alloyed steels, machined with two cutting feeds and six cutting speeds. Transversal profile of the asperity was investigated, and was determined the minimum chip thickness. Longitudinal profile of the asperity was, also, determined. At the end we propose an modified cutting tool and modified cutting model in order to obtain minimum of surface roughness, with application to the high speed turning finishing of machined surfaces .*

### **1. Introduction**

High speed machining, is one of the modern technologies, which, in comparison with conventional cutting speed, allow high metal removal rate, considerably increase productivity, increase surface finishing and eliminate cooling. It is obtain shortening of manufacturing time, some step elimination (manual manufacturing) and have no influence on dimensional precision and surface quality. These advantages are decisive for using of high speed machining in different industry sectors with special conditions.

High-speed machining processes know very long time ago, but there are many actual

researches in order to improve in future quality and reduce costs.

The machining features, which are hallmark of superalloys are: involvement of multiple wear mechanisms in cutting tool failure, considerable damage to machined surfaces, which extends to the sub-surface levels in some cases, and involvement of intense shear in the chip formation [1,2].

The machined surface characteristics such as surface roughness and surface damage have significant influence on the surface sensitive properties such as fatigue, stress corrosion resistance and creep strength, which in turn affect the service-life of components [3].

Therefore, high degree of surface integrity is an essential requirement for better performance, reliability and longevity of the machined parts during service. The machining forces have an important share in the generation of stresses and temperature in the machined surfaces. They further influence the stresses and temperature along tool-chip and tool-work interfaces. All these effects finally lead to poor surface integrity if the working conditions are not properly selected. Therefore, it is important to know the machining parameters, which reduce cutting forces and generate favourable surface characteristics.

The surface generated during machining of Inconel 718 has been a subject of research of a number of investigations. These include analysis and/or evaluation of surface finish, surface alterations [5, 8, 10, 13–17].

Besides, it is demonstrated that the cutting tool edge geometry significantly influences many fundamental aspects such as cutting forces, chip formation, cutting temperature, tool wear, tool-life and characteristics like surface roughness and surface damage. Similar studies have been done on machining of Inconel 718 too [10,11,16,17].

It appears that most of the work has been done at reasonably lower cutting speeds, whereas the increasing use materials in different conditions and industries necessitates the knowledge of their machinability at higher cutting speeds, which is not adequate at the present. Further, less attention has been paid to optimize the process conditions to improve machinability in terms of cutting forces and surface integrity of machined materials. Also, most of these studies include random experiments.

Thus, in this experimental work, turning process is selected to assess the effect of edge geometry and machining parameters and surface integrity of Inconel 718. The surface quality in terms of surface roughness and surface damage has also been investigated.

The following sections of this paper describe plan of the experiments and their execution followed by analysis of the results.

## 2. Experimental stand

To experimental study the surface roughness generated by high speed machining, it was designed and built the following experimental device:

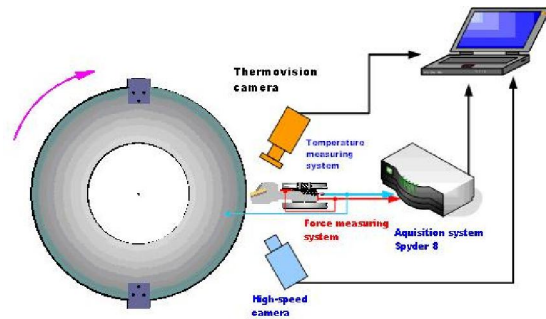


Fig. 1 Experimental device for the study of high speed machining

The generating The device is made of a steel base with a 500 mm diameter, placed on the chuck of the numerical command frontal lathe.

On this disk two opposite channels was machined, with the dimensions of 60x40x3mm, in which the analyzed samples were put. These were attached with three M10 screws. The whole device is protected against accidental detachment from the lathe axis.

The cutting speed obtained, while the main axis of the lathe revolves at a speed of 1400 rot/min, is of 36,6 m/s or 2196 m/min.

The tool that was used is a lathe knife offered by the Sandvik company, model ISO DVJNL 2020K16 fitted with Garant brand insertions made of metallic carbure (HB712) and with cubic boron nitride (CBN 725).

Materials used for the study of roughness when processed at high speed are six brands of high and medium alloyed steels: 42CrMo4, OLC45, 20TiMnCr12, 34MoCrNi16, 18MnCr11, 41Cr4.

From these materials samples were cut having the dimensions of 60x60x25 mm, which were cut using two types of cutting edge tool, respectively an insertion of metallic carbure Garant brand with the degree HB712, and another insertion having the edge made of cubic boron nitride (CBN), still Garant brand, degree CBN725. Each of these materials are machined both cutting tools, applying two feeds and, respectively, six cutting speeds.

The cutting speed was chosen at random so as to comparatively study both the field of conventional cutting and also the field of speed cutting. The maximum speed employed is conditioned by the maximum revolution that the lathe can generate.

The roughness was measured using the digital device Surtronic 3+ and the profile grams were obtained by using the Talyprofile software, thus enabling the computing of the various profile parameters.

Many parameters of cutting processes are investigated: force, temperature.

### 3. Analysis of experimental results

#### 3.1 Transversal profile of the asperity

One important component of roughness is the generation roughness, occurring mainly because of two important conditions:

- Generating profile of the tool,
- Micro profile of the cutting edge.

We shall further present the experimental study of generated roughness occurring due to the cutting tool profile which, while turning, results in the occurrence on the processed surface of some channels, having a transversal profile specific for the cutting edge and located at a distance that is equal to the advance movement (fig. 2).

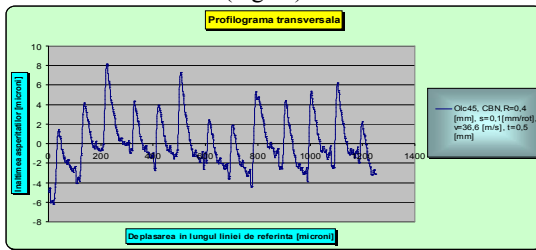


Fig. 2. Aspect of a typical transversal profilogram obtained during experiments

The transversal profilogram was generated, for the surface obtained using various cutting speeds and for various materials for the tool and for processing. The following observations can be presented:

It is remarkable the exact way in which the transversal profile is generated along the advance movement direction, which shows that there are few aleatory aspects that may intervene when generating this profile.

Also, it can be seen that there is a difference of relative position between two successive profiles, which is explained by different shock behavior of the experimental system.

Big scale evolution of the transversal profile position may be due to the measurement system, as the measurement reference moves along the touched surface.

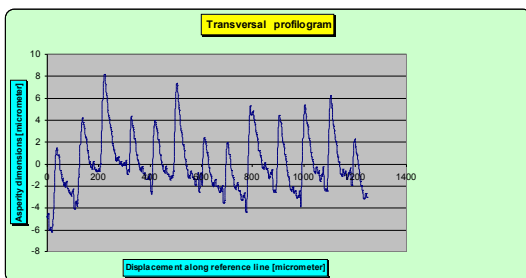


Fig. 3. Transversal profile of longitudinal roughness in various surface areas, and the theoretical profile of the used tools

The height of profile edges are significantly altered along the surface exploration movement, and are not rigorously correlated with height alterations for each profile base. This suggests the fact that there are random phenomena while forming this area of the transversal profile.

In order to develop a detailed study of the transversal profile, this profile was examined in various areas of the surface and compared with the theoretical profile of the generating edge of the tool, as it can be seen in fig.3

It can be seen that an area of the profile looks very close to the shape of the theoretical profile, which shows that within the respective area do not occur phenomena leading to the profile copy disturbance, and even of the cutting edge micro profile disturbance, on the cut surface. In exchange, the other area of the profile drastically differs from the theoretical profile and, moreover, is significantly differs from one area to another. This supports the idea that the respective area of the profile is not generated by the geometry and by the micro geometry of the cutting edge, but is the result of a plastic deformation process, influenced by random phenomena. This also explains the significant variation of the profile height in various areas, which was noticed in fig.2 as well.

#### 3.2 Chip minimal thickness

With a view of explaining the differences between the real transversal and the theoretical profiles, it was analyzed the connection between this difference and the variation of the thickness of the detached chip. In fig. 4 it can be seen that the differences always occur in the CB area of the theoretical profile and corresponds to the area in which the chip thickness takes very small values, to the zero. Indeed, as it results from fig. 6.14, the shape and dimensions of the theoretical chip greatly varies, and this happens predominantly in the area in which the tool profile generates the transversal profile of surface roughness. Taking into account that the tool edge is not perfectly sharp, as it is the result of the joining of the evolving side towards the facing side with a radius of cca 5 μm, then it results on the occurrence of a situation in which the thickness of the theoretical chip is smaller than the joining radius of the cutting edge. It is clear that in this situation the material will not advance towards the chip, but it will be crushed and forced to advance below the cutting edge. By examining the real case of laboratory experiments, it can be seen that it is a good

correspondence between the C point located on the theoretical profile, where the theoretical thickness of the chip can be compared to the cutting radius of the cutting edge, and the point in which the dimension of the transversal profile begins. It can be concluded that there is an area CB of  $q$  width, where the cutting is replaced by ramming.

The thickness of the theoretical chip corresponding to the C point will be referred to

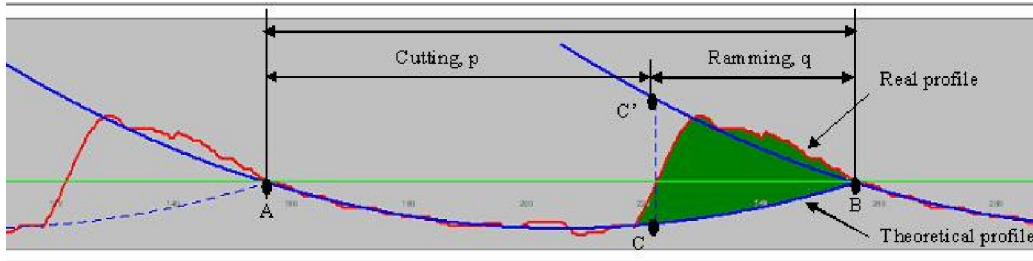


Fig. 4. Correspondence between the real and the theoretical profile represented to values close to vertical and horizontal scaling

as minimal thickness.

It was experimentally studied the variation of the minimal thickness of the chip with the cutting speed (fig. 5.).

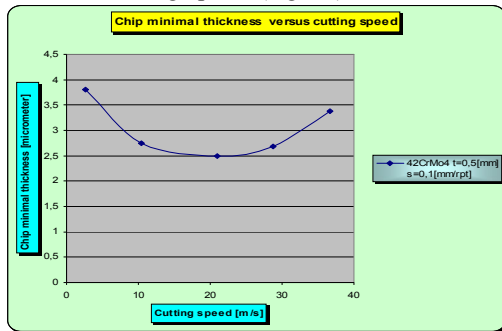


Fig. 5. Variation if the minimal thickness of the chip, compared to the cutting speed

It can be noticed that there is an optimal value of the cutting speed in which the cutting edge has the capability to cut thick strata of material, the smallest value of minimal thickness reaching the value of 2,5  $\mu\text{m}$ .

In order to study the generation roughness of the cut surface, the profile of roughness along the movement direction of the cutting tools was analyzed (fig.6.).

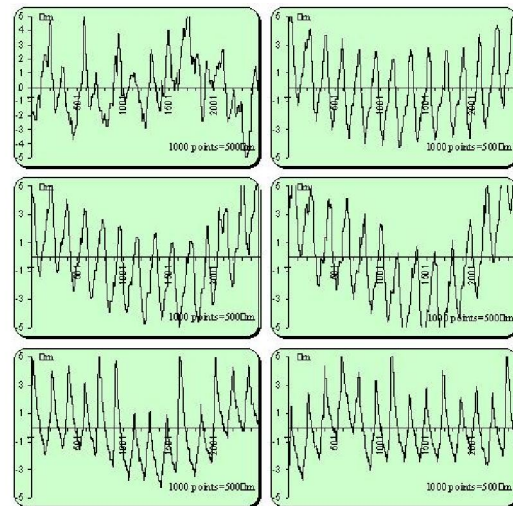


Fig. 6. Variation of the longitudinal profile in accordance with the cutting speed

It can be seen that the variation level of the profilogram raised towards the direction of tool movement decreases with the cutting speed. This is due to the fact that the random phenomena during generating at low speed cutting are subsequently replaced with plastic deformation phenomena, the chip being ultimately the results of a pure plastic deformation.

To test the finishing possibility of the high speed cutting surfaces, on the basis of the results obtained within our research, it was proposed a finishing process by turning, in



accordance with the cutting diagram presented in fig. 7

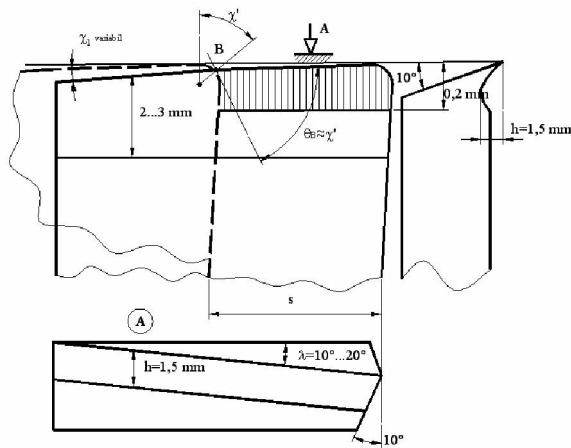


Fig. 7 Cutting diagram for surface finishing by adiabatic cutting

In fig. 7 are presented two successive positions of a lathe tool with modified geometry, so as to obtain finishing by adiabatic cutting, the tool positions being successively positioned at a distance equal to the advance  $s$ .

The  $\chi_1$  angle takes very small values. In this case the chip thickness has the value of 0.2 mm, and the width is equal to the advance value, which in the case under focus is of 0.3 - 0.5 mm/rot.

### Conclusions

The conclusions drawn for surface finishing by adiabatic turning are the following:

1. Surface finishing by adiabatic cutting is possible.
2. The thickness area is reduced to values smaller than the minimal accepted thickness
3. The cutting speed can be increased, thus highlighting the adiabatic character of cutting.
4. By careful finishing of the tool cutting edge, it can be obtained a cut surface with significantly decreased roughness.

*Acknowledgement:* This paper was developed under the research programs IDEI, grants ID\_653, funded by the Romanian Ministry of Education and Research.

### References

- [1] Bonney J., Ezugwu E.O., Yamane Y., *An overview of the machinability of aero-engine alloy*, J. Mater. Process. Technol. 135 (2003) 233–253.
- [2] Pawade R.S., Josh S.S., Rahman M., *High speed machining of 'difficult-to-machine' materials: superalloys – Inconel 718*, in: *Proceedings of Dyojo on High Speed Machining of Hard/Superhard Materials*, NUS Singapore, 7–11 November 2003, pp. 14–28.
- [3] Field M., Kahles J.F., Koster W.P., *Surface Finish and Surface Integrity*, ASM Handbook, vol. 16, Machining, 9th ed., ASM Publication, ASM, Metal Park, Ohio, 1989.
- [4] Sadat A.B., *Surface region damage of machined Inconel 718 nickel-base superalloy using natural and controlled contact length tools*, Wear 119 (1987) 225–235.
- [5] Redd M.Y., Sadat A.B., Wang B.P., *Plastic deformation analysis in machining of Inconel 718 nickel base superalloy using both experimental and numerical methods*, Int. J. Mech. Sci. 33 (10) (1991) 829–842.
- [6] Hayashi K., Kitagawa T., Narutaki N., Yamane Y., *High speed machining of Inconel 718 with ceramic tools*, Ann. CIRP 42 (1) (1993) 103–106.
- [7] Rahman M., Seah W.K.H., Teo T.T., *The machinability of Inconel 718*, J. Mater. Process. Technol. 63 (1–3) (1997) 199–204.
- [8] Arunachalam R.M., Mannan M.A., *High speed facing of age hardened Inconel 718 using silicon carbide whisker reinforced ceramic tools*, Trans. NAMRI/SME 30 (2002) 345–352.
- [9] Pawade R.S., Joshi S.S., Brahmanekar P.K., Rahman M., *Surface integrity investigations of high speed turned Inconel 718*, in: *Proceedings of 21st AIMTDR*, VIT Vellore, 21–23 December 2004, pp. 41–47.
- [10] Arunachalam R.M., Mannan M.A., Spowage A.C., *Residual stress and surface roughness when facing age hardened Inconel 718 with CBN and ceramic cutting tools*, Int. J. Mach. Tools Manuf. 44 (2004) 879–887.
- [11] Altin A., Gokkaya H., Nalbant M., *The effect of cutting speed and cutting tool geometry on machinability properties of nickel-base Inconel 718 superalloys*, Mater. Des. 28 (4) (2007) 1334–1338.
- [12] Anderson M., Patwa R., Shin Y.C., *Laser-assisted machining of Inconel 718 with an economic analysis*, Int. J. Mach. Tools Manuf. 46 (14) (2006) 1879–1891.
- [13] Mittal A., Mehta M., *Surface finish prediction models for fine turning*, Int. J. Prod. Res. 26 (12) (1988) 1861–1876.
- [14] Darwish S.M., *The impact of tool material and the cutting parameters on surface roughness of supermet 718 nickel superalloy*, J. Mater. Process. Technol. 97 (2000) 10–18.
- [15] Bhat R., Balakrishna H.K., Ramachandra K., Subhas B.K., *Dimensional instability studies in machining of Inconel 718 nickel-based superalloy as applied to aerogas turbine components*, Trans of ASME, J. Eng. Gas Turbines Power 122 (2000) 55–61.
- [16] Ezugwu E.O., Tang S.H., *Surface abuse when machining cast iron (G-17) and nickel-base superalloy (Inconel 718) with ceramic tools*, J. Mater. Process. Technol. 55 (1995) 63–69.
- [17] Braghini Jr. A., Bezerra A.A., Coelho R.T., Silva L.R., *Some effects of cutting edge preparation and geometric modifications when turning Inconel 718 at high cutting speeds*, J. Mater. Process. Technol. 148 (1) (2004) 147–153.
- [18] Phadke M.S., *Quality Engineering using Robust Design*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1989.
- [19] *NewTools from Sandvik Coromant. Supplement to Turning tools catalogue and Rotating tools catalogue*, Coropack 2005.1, Sandvik Coromant, 2005, pp. 44–45.
- [20] Boothroyd G., Knight W.A., *Fundamentals of Machining and Machine Tools*, 2nd ed., Marcel Dekker, Inc., New York, 1989.

[21]. **Shaw M.C.**, *Metal Cutting Principles*, Oxford University Press, London, 1984.



## **L'IDENTIFICATION DE LA RELATION DE VARIABLES D'ÂPRETÉ DE SURFACE ET DE SON APPLICATION À LA CONTRÔLE DE USINAGE A GRANDE VITESSE**

### Abstrait

Dans ce papier est analysé l'état de la surface, obtenue en usinant avec de différentes vitesses coupantes. Un éventaire expérimental spécial a été développé pour cela. L'âpreté de surface a été enquêtée en utilisant numériquement l'artifice Surtronic 3 et a été analysée avec le logiciel spécifique Talyprofile. Le matériel utilisé pour l'étude d'âpreté à la grande vitesse usinant des conditions est six marques d'aciers alliés hauts et moyens, usinés avec deux nourritures coupantes et six vitesses coupantes. Le profil transversal de l'aspérité a été enquêté et était déterminé l'épaisseur minimale de coupeau. Le profil longitudinal de l'aspérité était, aussi, déterminé. À la fin nous proposons un instrument coupant modifié et un modèle coupant modifié pour obtenir le minimum d'âpreté de surface, avec l'application à la grande vitesse tournant le finissage de surfaces usinées.

## **IDENTIFICAREA RELATIEI RUGOZITATE - VARIABLE DE STARE SI APLICAREA ACESTEIA LA CONTROLUL ASCHIERII CU VITEZE FOARTE MARI**

### Rezumat

În această lucrare se studiază rugozitatea suprafețelor obținută prin prelucrare cu diferite viteze de așchiere. În acest scop a fost dezvoltat un stand experimental dedicat. Rugozitatea suprafeței a fost investigată folosind dispozitivul de măsură Surtronic 3+, și a fost analizată folosind software-ul specific Talyprofile.

Materialele folosite pentru studiul rugozității la diferite viteze de așchiere sunt șase tipuri de oțeluri înalt și mediu aliate și care au fost așchiate cu șase viteze diferite de așchiere, acoperind atât domeniul așchierii convenționale, cât și cel al așchierii rapide.

A fost analizat profilul transversal al asperităților și a fost determinată grosimea minimă a așchiei. A fost determinat, de asemenea și profilul transversal al asperităților.

La final se propune o scula de așchiere cu geometrie modificată și un model de așchiere folosit la obținerea unui minim al rugozității suprafeței, cu aplicații la finisarea prin strunjire cu viteze ridicate a suprafeței așchiate.

**9) Algorithm developing for online modeling of technological systems thermo-mechanical fields dynamics**, Ion Lixandru, Alexandru Epureanu, Annals of the „Dunărea de Jos” University , Fascicle V, Year XXVI (XXXI), ISSN 1221-4566, 2008 (publicatie indexata BDI).

## ALGORITHM DEVELOPING FOR ONLINE MODELLING OF TECHNOLOGICAL SYSTEMS THERMO MECHANICAL FIELDS DYNAMICS

ION LIXANDRU, ALEXANDRU EPUREANU  
GABRIEL FRUMUŞANU, MARIAN VIOREL CRĂCIUN

### ABSTRACT

It is experimentally proved that different thermo-mechanical fields have an obvious coherent dynamics. So, in order to model and identify the technological systems' thermo-mechanical fields and their dynamics we have to develop an identification algorithm based precisely on the fields dynamics coherence.

The developed algorithm is remarkable due to substantial reduction of the number of sensors needed for the thermo-mechanical fields dynamic identification and it is conceived to be used in technological systems adaptive guidance.

As the measured values during trials are not exact, we can consider that a certain thermo-mechanical field is a function depending on this values. Following the minimising of some operators such as  $\int [f(t)]^2 dt$  or generally speaking  $\int [f^{(r)}(t)]^2 dt$  we obtain homogenous systems out of whose analysis we can conclude on the importance of knots measurements are made in.

### I. THE MODELLING OF THE DYNAMICS OF UNI-DIMENSIONAL THERMO-MECHANICAL FIELDS

We have an uni-dimensional thermo-mechanical field, determined by a B-spline curve of order  $k$ ,  $f(t)$ , on the knot set  $(t_i)_{i=1, n+k}$ . This curve is segmentary polynomial and it is expressed by means of a B-spline basis function set on every interval, related to the knot set.

B-spline basis functions are obtained through a recursive process, as it follows:

$$(1) N_{i,1}(t) = \begin{cases} 1, & t \in [t_i, t_{i+1}) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$(2) N_{i,k}(t) = \frac{t - t_i}{t_{i+k-1} - t_i} N_{i,k-1}(t) + \frac{t_{i+k} - t}{t_{i+k} - t_{i+1}} N_{i+1,k-1}(t); \quad k \geq 2$$

By means of these, a B-spline function of  $k$  order can be written as it follows:

$$(3) f(t) = \sum_{i=1}^n d_i N_{i,k}(t) \text{ on the knot set } (t_i)_{i=1, n+k}.$$

If we note

$$(4) \begin{cases} d = (d_1, d_2, \dots, d_n) \\ N = N(t) = (N_{1,k}(t), N_{2,k}(t), \dots, N_{n,k}(t)) \end{cases}, \text{ then (3) becomes:}$$

$$(5) f(t) = d \odot_i N$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial d_i} \int [f(t)]^2 dt &= \frac{\partial}{\partial d_i} \int (d \odot_i N)^2 dt = \int \frac{\partial}{\partial d} (d \odot_i N)^2 dt = 2 \int (d \odot_i N) \otimes N dt = \\ &= 2 \int N \otimes (d \odot_i N) dt = 2 \int N \otimes (N^t \odot_j d) dt = 2 \int (N \otimes N^t) \odot_j dt = 2 \int (N \otimes N^t) dt \odot d \end{aligned}$$

Noting:

$$(6) A_0 = \int (N \otimes N^t) dt = \begin{pmatrix} \int N_1(t)N_1(t)dt & \dots & \int N_1(t)N_n(t)dt \\ \dots & \dots & \dots \\ \int N_1(t)N_n(t)dt & \dots & \int N_n(t)N_n(t)dt \end{pmatrix}$$

and equaling the partial derivatives to zero, we get:

$$(7) \boxed{A_0 d = 0} - \text{n equation system with n unknowns (control points d);}$$

$A_0$ - mass matrix. If rank  $A_0 = r$  (for example  $\Delta_r = \det(a_{ij})_{i,j=1,r} \neq 0$ ), then  $x_1, x_2, \dots, x_r$  - main unknowns which are expressed depending on the secondary unknowns  $x_{r+1}, \dots, x_n$ .

From a practical viewpoint this means that knots  $t_{r+1}, \dots, t_n$  have a greater importance (they are more influential) than the others.

In the case of derivatives of order r, we have:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial d} \int [f^{(r)}(t)]^2 dt &= \frac{\partial}{\partial d} \int (d \odot_i (D_0^r)^t N^t)^2 dt = \int \frac{\partial}{\partial d} (d \odot_i (D_0^r)^t N^t)^2 dt = \\ &= \int (d \odot_i (D_0^r)^t N^t) \otimes (D_0^r)^t N^r dt = \int (D_0^r)^t (N^t \otimes (d \odot_i (D_0^r)^t N^r)) dt = \\ &= \int ((D_0^r)^t N^r) \otimes (N^r)^t D_0^r \odot_j d dt = (D_0^r)^t \left( \int N^r \otimes (N^r)^t dt \right) D_0^r \odot_j d. \end{aligned}$$

Noting:

$$(8) A_r = \int (N^r \otimes (N^r)^t) dt = \begin{pmatrix} \int N_{1,k-r}(t)N_{1,k-r}(t)dt & \dots & \int N_{1,k-r}(t)N_{n-r,k-r}(t)dt \\ \dots & \dots & \dots \\ \int N_{n-r,k-r}(t)N_{1,k-r}(t)dt & \dots & \int N_{n-r,k-r}(t)N_{n-r,k-r}(t)dt \end{pmatrix}$$

$$(9) M_r = \left( D_0^{r,t} A_r D_0^r \right) - \text{minimizing product and equaling the partial derivatives to zero, we}$$

get:

(10)  $M_r d = 0$  - n equations system with n unknowns for the control points, out of whose discussion we can calculate the knots having a greater importance in terms of measurements.

Particular cases:

1)  $r = 1 \Rightarrow M_1 = (D_0^1)^T A_1 D_0^1$  - rigidity matrix, where  $D_0^1 = (\alpha_{ij}^{10})_{\substack{i=1, n-1 \\ j=1, n}}$  - control points matrix

for  $f'(t)$ .

2)  $r = 2 \Rightarrow M_2 = (D_0^2)^T A_2 D_0^2$  - curving matrix, where  $D_0^2 = D_0^1(d_1, d_2, \dots, d_{n-1})^T$ .

$$\text{Generally, } D_0^r = \prod_{i=0}^{r-1} D_{r-i-1}^{r-1}.$$

## II. THE MODELLING OF THE DYNAMICS OF MULTI-DIMENSIONAL THERMO-MECHANICAL FIELDS

A bi-dimensional thermo-mechanical field is determined by a B-spline surface of order (k,l) on the knot set  $(u_i)_{i=1, p+k} \times (v_j)_{j=1, q+l}$ , by means of:

(11)  $x(u, v) = f(u) \otimes g(v)$ , where  $f(u)$  and  $g(v)$  are B-spline curves defined on the knot sets  $(u_i)$  and  $(v_j)$  respectively.

Using (11), we infer:

(12)  $x(u, v) = d \odot_i N_u \odot_j N_v$ , where

$$N_u = (N_{1,k}(u), \dots, N_{p,k}(u)), N_v = (N_{1,l}(v), \dots, N_{q,l}(v)),$$

$$d = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1q} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2q} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{p1} & d_{p2} & \dots & d_{pq} \end{pmatrix} \text{ - control points matrix.}$$

Noting  $\frac{\partial}{\partial d}$  the partial derivatives matrix of all the control points  $d_{ij}$ , we have:

$$\frac{\partial}{\partial d} \iint [x(u, v)]^2 dudv = \iint \frac{\partial}{\partial d} (d \odot_i N_u \odot_j N_v)^2 dudv.$$

$$\text{But } \frac{\partial}{\partial d} (d \odot_i N_u \odot_j N_v)^2 = (d \odot_i N_u \odot_j N_v) \otimes (N_u \otimes N_v^t) =$$

$$N_u \otimes (d \odot_i N_u \odot_j N_v) \otimes N_v^t = N_u \otimes (N_u^t \odot_j d \odot_i N_v) \otimes N_v^t =$$

$$(N_u \otimes N_u^t) \odot_j d \odot_j (N_v \otimes N_v^t).$$

Noting:

$$(13) A_0^u = \int (N_u \otimes N_u^t) du = \begin{pmatrix} \int N_1(u)N_1(u)du & \dots & \int N_1(u)N_p(u)du \\ \dots & \dots & \dots \\ \int N_1(u)N_p(u)du & \dots & \int N_p(u)N_p(u)du \end{pmatrix}$$

$$A_0^v = \int (N_v \otimes N_v^t) dv = \begin{pmatrix} \int N_1(v)N_1(v)dv & \dots & \int N_1(v)N_q(v)dv \\ \dots & \dots & \dots \\ \int N_1(v)N_q(v)dv & \dots & \int N_q(v)N_q(v)dv \end{pmatrix}$$

and equalling to zero the partial derivatives, we obtain:

$$(14) \boxed{A_0^u dA_0^v = 0}$$

Studying the system (14) we can infer the influential points of the measurements.

Minimizing the mixed partial derivatives of order two, we get:

$$\frac{\partial}{\partial d} \iint \left( \frac{\partial^2 x}{\partial u \partial v} \right)^2 dudv = \iint \frac{\partial}{\partial d} (d \odot_i D_u^t N_u \odot_j D_v^t N_v) dudv.$$

The integrable is:

$$\begin{aligned} & (d \odot_i D_u^t N_u \odot_j D_v^t N_v) \otimes (D_u^t N_u) \otimes (N_v^t D_v) \\ & (D_u^t N_u) \otimes (d \odot_i D_u^t N_u \odot_j D_v^t N_v) \otimes (N_v^t D_v) = \\ & (D_u^t N_u \otimes N_u^t D_u) \odot_j d \odot_j (D_v^t N_v) \otimes (N_v^t D_v) = \\ & D_u^t (N_u \otimes N_u^t) D_u \odot_j d \odot_j D_v^t (N_v \otimes N_v^t) D_v. \end{aligned}$$

Noting:

$$(15) A_1^u = \int (N_u \otimes N_u^t) du; \quad A_1^v = \int (N_v \otimes N_v^t) dv$$

we obtain the following n equations system with n unknowns for the control points matrix

$$d = (d_{ij})_{\substack{i=1,p \\ j=1,q}}:$$

$$(16) (D_u^t A_1^u D_u) d (D_v^t A_1^v D_v) = 0, \text{ and if we note:}$$

$$(17) M_1^u = D_u^t A_1^u D_u, \text{ then (16) becomes:}$$

$$(18) \boxed{M_1^u dM_1^v = 0}$$

Analogically, minimising the operators

$\iint \left( \frac{\partial^2 x}{\partial u^2} \right)^2 dudv, \iint \left( \frac{\partial^2 x}{\partial v^2} \right)^2 dudv$  we get the equation system:

$$(19) \boxed{M_2^u dM_0^v = 0} \quad (20) \boxed{M_0^u dM_2^v = 0}$$

Studying the systems (18), (19) or (20) we can conclude on the importance of the measurement points.

A three-dimensional thermo-mechanical field is given by a B-spline volume of order (l, m, n) on the knot set  $(u_i)_{i=1, \overline{p+l}} \times (v_j)_{j=1, \overline{q+m}} \times (w_k)_{k=1, \overline{r+n}}$  by means of:

(21)  $x(u, v, w) = f(u) \otimes g(v) \otimes h(w)$ , where  $f(u)$ ,  $g(v)$  and  $h(w)$  are B-spline curves defined on the knot sets  $(u_i)$ ,  $(v_j)$  and  $(w_k)$  respectively. Using (24) we infer:

(22)  $x(u, v, w) = d \odot_i N_u \odot_j N_v \odot_k N_w$ , where:

$d = (d_{ijk})_{\substack{j=1, \overline{q} \\ k=1, \overline{r}}}^{i=1, \overline{p}}$  - is the control points matrix.

$N_u, N_v, N_w$  - are the basis B-spline functions corresponding to the three curves.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial d} \iiint [x(u, v, w)]^2 dudvdw &= \iiint \frac{\partial}{\partial d} (d \odot_i N_u \odot_j N_v \odot_k N_w)^2 dudvdw = \\ &= 2 \iiint (d \odot_i N_u \odot_j N_v \odot_k N_w) \otimes (N_u \otimes N_v^t \otimes N_w^t) dudvdw. \end{aligned}$$

The integrable is:

$$\begin{aligned} N_u \otimes (d \odot_i N_u \odot_j N_v \odot_k N_w) \otimes (N_v^t \otimes N_w^t) &= \\ N_u \otimes (N_u^t \odot_i d \odot_j N_v \odot_k N_w) \otimes (N_v^t \otimes N_w^t) &= \\ (N_u \otimes N_u^t) \odot_i d \odot_j N_v \odot_k N_w \otimes (N_v^t \otimes N_w^t) &= \\ (N_u \otimes N_u^t) \odot_i d \odot_k N_w \odot_j N_v \otimes (N_v^t \otimes N_w^t) &= \\ (N_u \otimes N_u^t) \odot_i d \odot_k N_w \odot_j (N_v \otimes N_v^t) \otimes N_w^t &= \\ (N_u \otimes N_u^t) \odot_i d \odot_j (N_v \otimes N_v^t) \odot_k (N_w \otimes N_w^t). \end{aligned}$$

Noting:  $A_0^u = \int (N_u \otimes N_u^t) du$ , we get:

$$(23) \boxed{A_0^u \odot_i d \odot_j A_0^v \odot_k A_0^w = 0}$$

When minimising the mixed partial derivatives, we obtain:

$$\frac{\partial}{\partial d} \iiint \left( \frac{\partial^3 x}{\partial u \partial v \partial w} \right)^2 dudvdw = \iiint \frac{\partial}{\partial d} \left( d \odot_i D_u^t N_u \odot_j D_v^t N_v \odot_k D_w^t N_w \right)^2 dudvdw.$$

The integrable is:

$$\begin{aligned} & (d \odot_i D_u^t N_u \odot_j D_v^t N_v \odot_k D_w^t N_w) \otimes (N_u^t D_u) \otimes (N_v^t D_v) \otimes (N_w^t D_w) = \\ & (D_u^t N_u) \otimes (d \odot_i D_u^t N_u \odot_j D_v^t N_v \odot_k D_w^t N_w) \otimes (N_v^t D_v) \otimes (N_w^t D_w) = \\ & D_u^t N_u \otimes (N_u^t D_u \odot_i d \odot_k D_w^t N_w \odot_j D_v^t N_v) \otimes (N_v^t D_v) \otimes (N_w^t D_w) = \\ & (D_u^t N_u \otimes N_u^t D_u) \odot_i d \odot_k (D_w^t N_w) \odot_j (D_v^t N_v) \otimes (N_v^t D_v) \otimes (N_w^t D_w) = \\ & D_u^t (N_u \otimes N_u^t) D_u \odot_i d \odot_j D_v^t (N_v \otimes N_v^t) D_v \odot_k D_w^t (N_w \otimes N_w^t) D_w \end{aligned}$$

Equalling the mixed partial derivatives to zero, we obtain the following system for control points:

$$(24) \quad D_u^t \int (N_u \otimes N_u^t) du D_u \odot_i d \odot_j D_v^t \int (N_v \otimes N_v^t) dv D_v \odot_k D_w^t \int (N_w \otimes N_w^t) dw D_w = 0$$

or noting  $M_u = \int (N_u \otimes N_u^t) du$  we get:

$$(25) \quad \boxed{M_u \odot_i d \odot_j M_v \odot_k M_w = 0}$$

out of which we can conclude on the control points.

Analogically, we can obtain relations for the minimising of partial derivatives related to u and v or u and w or v and w.

The above-mentioned things are a static modelling of the thermo-mechanical field. In order to make a dynamic modelling we have to elaborate an algorithm which should follow the evolution of the field in time.

Therefore, we suggest a four-steps algorithm:

STEP I. Spline modelling, by means of tensors, of the initial field  $C_I$ , determined by the values  $d_1, d_2, \dots, d_n$  measured in the knots  $t_1, t_2, \dots, t_n$ .

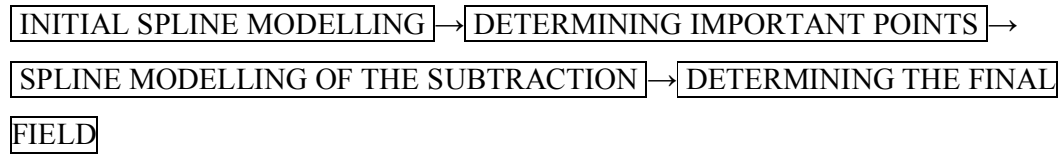
STEP II. Calculating the points which have a greater importance (are more influential), by minimising certain functional operators. Given  $d_1^*, d_2^*, \dots, d_p^*$ , the values measured in the important knots  $t_1^*, t_2^*, \dots, t_p^*$ .

STEP III. Spline modelling, by means of tensors, of the field  $C_\Delta$ , determined by the values

$$\Delta d_i = t_i - t_i^*, \quad \forall i = \overline{1, p}$$

STEP IV. The final field  $C_F$  results from the initial field  $C_I$  plus the field  $C_\Delta$ , modelled in STEP III.

This algorithm may be schematically presented as it follows:



## APLICACION

### THE MODELLING OF THE MECHANICAL FIELD FORMED BY LATHE VIBRATIONS

In order to model the dynamic of a mechanical field we took into account the case of the observed vibrations on a normal lathe SNB-360, by rotating an eccentric mass. To obtain the initial data needed when modelling the field, we measured the vibration amplitude in 53 points on the front surface of the lathe (considered as a plan  $xz$ ), chosen in a certain way so as all significant areas are taken into account (figure 1).

The point disposal was the following:

- 1...25 – on the fixed tool1;
- 26 – on the tool holder 2;
- 27, 28 – on the tool holder sledge 3;
- 29...32 – on the truck 4;
- 33, 34 – on the mobile tool 5;
- 35...42 – on the previous longitudinal guiding;
- 43 ...50 – on the body 6, in the area under the previous longitudinal guiding;
- 51-53 – on the body, in the left feet area 7.

The measurement was made by means of a x viber machine, with a piezo-electric translator having the following main features : sensitiveness - 100 mV/g; the frequency domain – 1-10 000 Hz; the resonance frequency – 23 000 Hz; the temperature domain - -50 ... +121°C; the dynamic measurement domain > 80 dB.

We did more measurement series : the first situation, considered to be a reference situation, for a 600 rpm rotation of the main shaft and a certain value of the eccentric mass,  $e$  ( $f_1(x,z)$  in table 2). Then we varied the vibration frequency, by modifying the rotation to 800 rpm and 1000 rpm ( $f_2(x,z)$  and  $f_3(x,z)$ ). Finally, we varied the amplitude of the exciting force too, by raising the eccentricity of the rotating mass to  $2e$  and  $3e$  ( $f_4(x,z)$  and  $f_5(x,z)$ ).



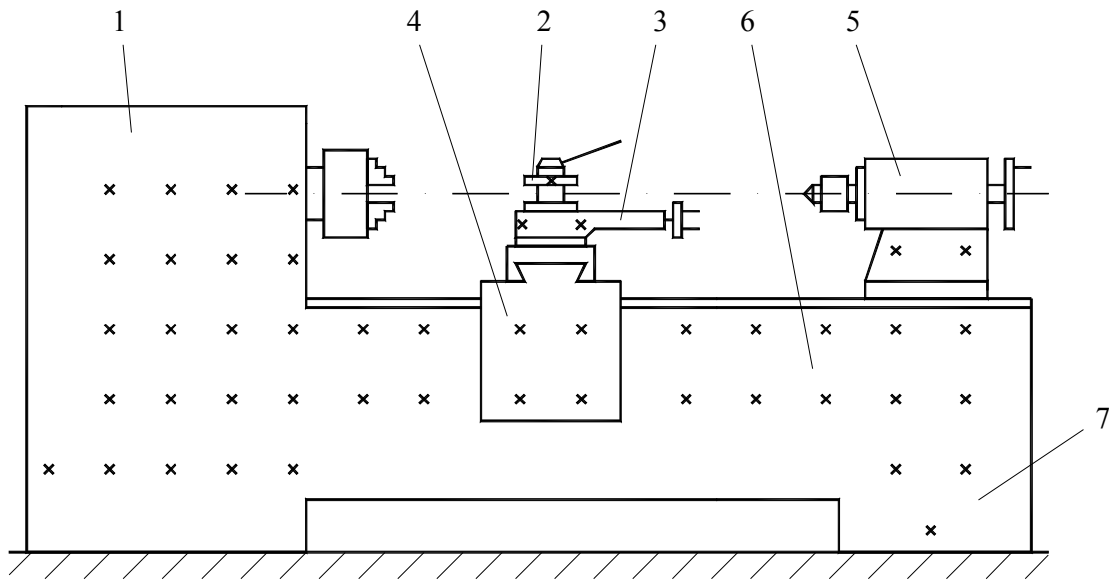


FIGURE 1 Point disposing in which we measured the vibration amplitude.

In order to realise the modelling of the dynamic of the vibration mechanical field we had to go over the following stages:

- ✓ by means of spline functions specially designed (chapter IV), we modelled both the reference state, given by the point values of the function  $f_1$  (figure 2), and the states known through the values (in the same points) of the functions  $f_2 \dots f_5$ ;
- ✓ we determined four functions characterising the system passing from the reference state, 1, to the state  $i$ ,  $i = 2 \dots 5$ , with the formula  $\Delta f_{1i}(x,z) = f_i(x,z) - f_1(x,z)$ ,  $i = 2 \dots 5$
- ✓ the four difference functions were also modelled by the new type of spline functions (figure 3), first on the basis of the values in 25 between the known points, then on the basis of the values in 5 points; the 25 and 5 points respectively were chosen from the 53, based on genetical algorithms, as being the points which define the system dynamics mostly;
- ✓ we added the known values, in the reference state, and those obtained by spline modelling of the difference functions and we compared the results found in this way, with those resulted in the first stage, by direct modelling, on the basis of the known values in all 53 points.

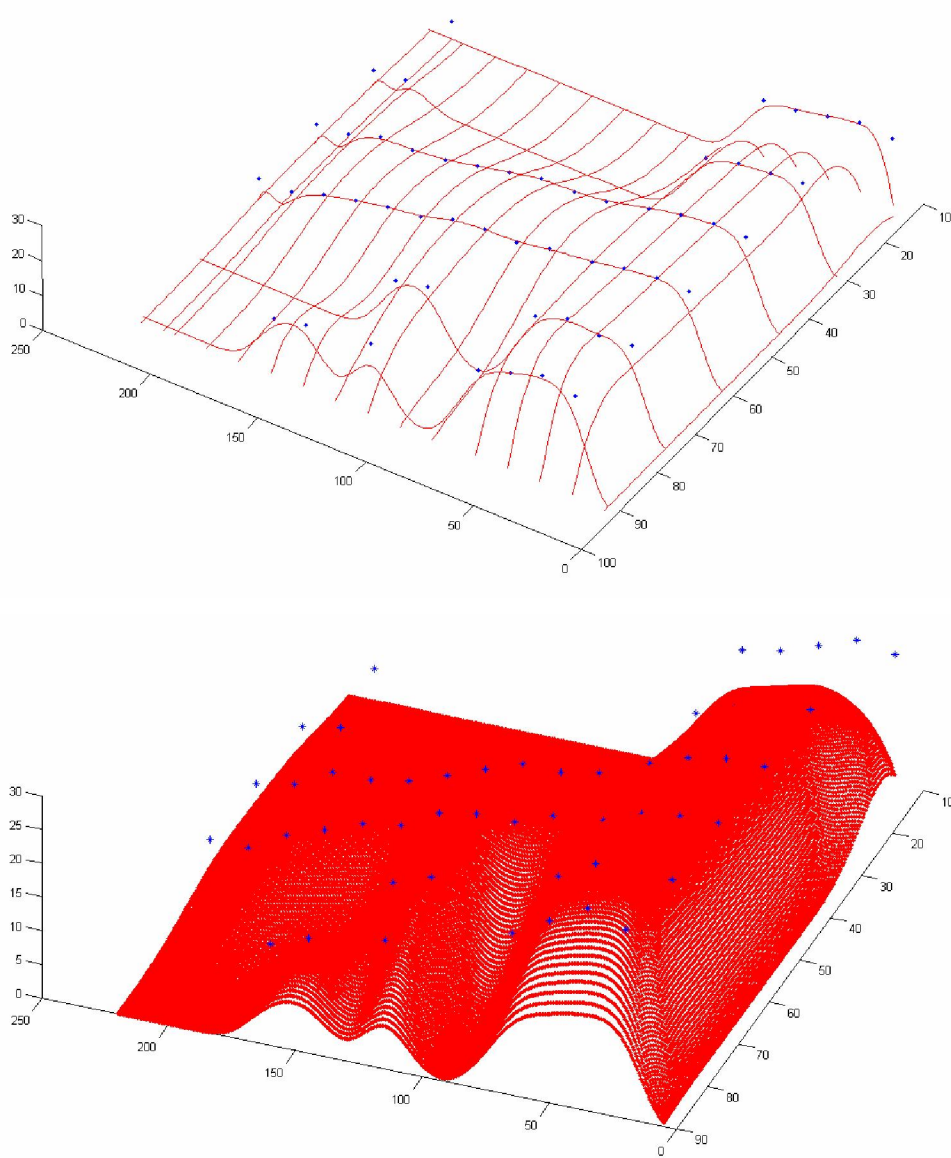


FIGURE 2 *Field  $f_1$  interpolated*

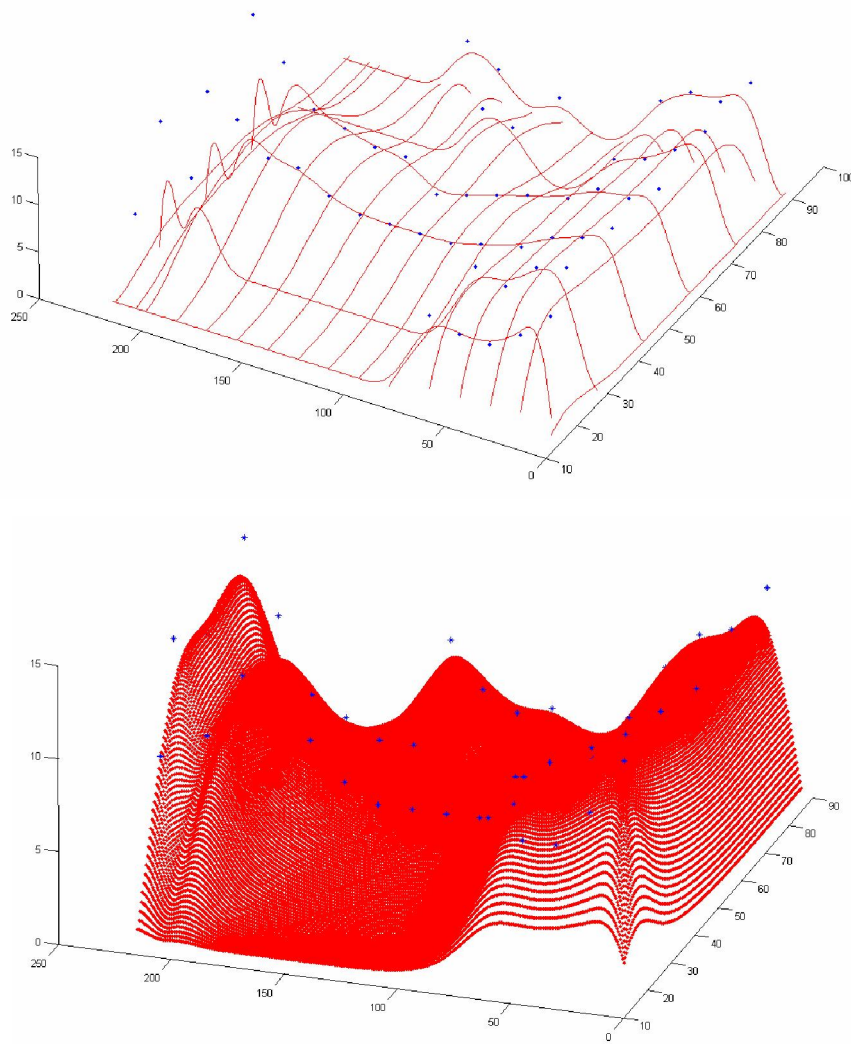


FIGURE 3 Modelling the function  $\Delta f_{12}$

The comparing between vibration mechanical field for one of the states known through direct measurement, in 53 points and its model resulted as a sum of the reference state values and the modelled values of the difference function, was done by calculating the square mean deviation between the measured values and those obtained by modelling. We got the following results in table 3.

Table

	Square mean deviation			
	State 1 → 2	State 1 → 3	State 1 → 4	State 1 → 5
25 points	1.6383	79.576	0.3762	0.7554
5 points	3.5573	11.1588	0.6274	1.1251

## BIBLIOGRAFIE

1. P. CONSTANTIN, C. MANNI. Some Applications of New Splines Spaces in Computer Aided Geometric Design. Rendicanti di Matematica e Delle Sue Applicazioni. Serie VIII, Volume 24. Tomo II 2004.
2. I. FEJES. Funcții Spline în Teoria Mecanismelor. Editura Științifică si Enciclopedică, București, 1981.
3. C.I. GHEORGHIU. Metode Numerice pentru Sisteme Dinamice. Casa Cărții de Știință, Cluj Napoca, 2006.
4. I. ICHIM, G. MARINESCU. Metode de Aproximare Numerică. Editura Academiei R.S.R., București 1986.
5. D. LASSER. Rational Tensor Product Bezier Volumes. Computer and Mathematics with Applications.
6. A. MARSAN, D. DUTTA. On the Application of Tensor Product Solids in Heterogeneous Solid Modelling. ASME Design Engineering Technical Conferences, Proceedings of DCTC98, 1998.
7. P.A. SHERAR. Variational Based Analysis and Modelling using B-splines. Cranfield University-School of Engineering.BPhD Thesis. Academic Year 2003-2004, (pp. 16-42; 50-62).
8. C. ZHANG, P. ZHANG, F. CHENG. Fairing Spline Curves and Surfaces by Minimising Energy. CAD, 33: 913-923, 2001.

10) **The use of tensors for the spline modelling of multidimensional thermo-mechanical fields**, Lixandru I., Epureanu A., Frumosanu G., Craciun M.V., Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati. Fascicle II, Mathematics, Physics, Theoretical Mechanics, ISSN 1221-4531, 2008, (publicatie indexata **BDI**)

## THE USE OF TENSORS FOR THE SPLINE MODELLING OF MULTIDIMENSIONAL THERMO-MECHANICAL FIELDS

ION LIXANDRU, ALEXANDRU EPUREANU  
GABRIEL FRUMUŞANU, MARIAN VIOREL CRĂCIUN

### ABSTRACT

Thermo-mechanical fields found in the technological systems' practice are defined either along a line or on a surface or in a 3D-space. Moreover, the idea of adding a fourth dimension- the time- is always there.

Consequently, the modelling of a multidimensional field is a must.

The analytical approach of this problem assumes some disadvantages related to the great number of calculations and it also does not allow you to move easily to multidimensional fields.

The use of tensors facilitates the natural moving, with the help of tensor product, from the unidimensional to bidimensional or multidimensional fields but also their derivation or integration or obtaining functional minimisings, all used in practical applications.

A significant property of bigger dimensional entities which consist of smaller dimensional entities is given by the fact that evaluation, insertion, approximation methods can be generalised in a convenient way. In every of these cases, the bigger dimensional method requires the recurrence of the same unidimensional version in each coordinate direction.

When talking about the extension of two dimensional fields tensor product, we have to decide on the processing direction. Even if there are possible calculation advantages for a certain choice, the final result is the same, depending on the size of the unidimensional field, in different directions.

### I. THE MODELLING OF UNI-DIMENSIONAL THERMO-MECHANICAL FIELDS

A uni-dimensional thermo-mechanical field is determined by a B-spline curve of order  $k$ , given by a B-spline function, a polynomial segmentary function, which is expressed by means of a set of B-spline basis functions on every interval, related to a knot set. Basis functions are chosen so that support intervals could be as little as possible and a possible point modification should affect only the adjacent sections. The set of " $k + 1$ " consecutive intervals on which a basis B-spline function, of order  $k$ , is non-zero, is called its ratio. Basis B-spline function can be obtained by means of a recursive process, in the following way:

$$(1) N_{i,1}(t) = \begin{cases} 1, & t \in [t_i, t_{i+1}) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$(2) N_{i,k}(t) = \frac{t-t_i}{t_{i+k-1}-t_i} N_{i,k-1}(t) + \frac{t_{i+k}-t}{t_{i+k}-t_{i+1}} N_{i+1,k-1}(t), \forall k \geq 2$$

With the help of B-spline basis functions, a B-spline function of order k, can be written as:

$$(3) f(t) = \sum_{i=1}^n d_i N_{i,k}(t), \text{ on the knot set } (t_i)_{i=1, n+k}. \text{ If we note:}$$

$$(4) \begin{cases} N = N(t) = (N_{1,k}(t), N_{2,k}(t), \dots, N_{n,k}(t))^T \\ d = (d_1, d_2, \dots, d_n) \end{cases} \quad - \text{ control points vector, then (3) can be}$$

tensorially written as:

$$(5) f(t) = d \odot_i N$$

In order to evaluate the B-spline function  $f(t) = \sum_j d_j N_{j,k}(t)$  in a point  $t \in [t_i, t_{i+1})$

we have to calculate  $k$  non-zero numbers  $N_{j,k}(t), j = i-k+1, \dots, i$ , then  $f(t)$  is given by

$$(6) f(t) = \sum_{j=i-k+1}^i d_j N_{j,k}(t).$$

The calculation of this sum is efficiently made by using the recurrence relation (2), relation which allows us to write  $f(t)$  related to the basis B-spline functions with one order less, as

$$\begin{aligned} f(t) &= \sum_{j=i-k+1}^i d_j \left[ \frac{t-t_j}{t_{j+k-1}-t_j} N_{j,k-1}(t) + \frac{t_{j+k}-t}{t_{j+k}-t_{j+1}} N_{j+1,k-1}(t) \right] = \\ &= \sum_{j=i-k+1}^i d_j \frac{t-t_j}{t_{j+k-1}-t_j} N_{j,k-1}(t) + \sum_{j=i-k+1}^i d_{j-1} \frac{t_{j+k-1}-t}{t_{j+k-1}-t_j} N_{j,k-1}(t) = \\ &= \sum_{j=i-k+1}^i \left( \frac{t-t_j}{t_{j+k-1}-t_j} d_j + \frac{t_{j+k-1}-t}{t_{j+k-1}-t_j} d_{j-1} \right) N_{j,k-1}(t). \text{ Noting} \\ (7) \quad d_j^1(t) &= \frac{t-t_j}{t_{j+k-1}-t_j} d_j + \frac{t_{j+k-1}-t}{t_{j+k-1}-t_j} d_{j-1}, \text{ we get (8) } f(t) = \sum_{j=i-k+1}^i d_j^1 N_{j,k-1}(t), \text{ or, in short,} \end{aligned}$$

$$f(t) = \sum_i d_i^1 N_{i,k-1}(t).$$

Repeating the above raciocination and noting :

$$(9) d_i^j(t) = \begin{cases} d_i, & j = 0 \\ \frac{t-t_i}{t_{i+k-j}-t_i} d_i^{j-1}(t) + \frac{t_{i+k-j}-t}{t_{i+k-j}-t_{i-1}} d_{i-1}^{j-1}(t), & j > 0 \end{cases} \text{ or in an equivalent way :}$$

$$(10) d_i^j = \lambda d_i^{j-1} + (1-\lambda) d_{i-1}^{j-1}, \text{ where } \lambda = \frac{t-t_i}{t_{i+k-j}-t_i} \text{ we get } f(t) \text{ in terms of normalized B-}$$

$$\text{spline of a smaller order : } (11) f(t) = \sum_i d_i^j(t) N_{i,k-j}(t).$$

As  $N_i(t) = 1, t \in [t_i, t_{i+1})$  and zero for the rest, we can write  $f(t) = d_i^{k-1}(t), \forall t \in [t_i, t_{i+1})$  and so, for  $t \in [t_i, t_{i+1})$ , we can find f(t) out of  $d_{i-k+1}, \dots, d_i$  by means of convex combinations (10). These convex combinations provide the numerical stability of the process. Using (11) for f(t) in terms of  $d_i^j$ , firstly we have to find i, so that  $t \in [t_i, t_{i+1})$ , then we have to generate all the entries in

the triangle table :

$d_{i-k+1}^0(t)$				
$d_{i-k+2}^0(t)$	$d_{i-k+2}^1(t)$			
...	...	...	...	...
$d_{i-1}^0(t)$	$d_{i-1}^1(t)$	...	$d_{i-1}^{k-2}(t)$	
$d_i^0(t)$	$d_i^1(t)$	...	$d_i^{k-2}(t)$	$d_i^{k-1}(t)$

The table is evaluated column by column, every entry being a convex combination of the two adjacent elements in the preceding column, and the last right term bottom of the table,  $(d_i^{k-1}(t))$ , is the wanted value f(t).

Based on these, we can elaborate an algorithm in order to calculate the coefficient's vectors which express the value of a B-spline function, f(t), in terms of the initial control points. The following algorithm calculates the coefficients  $(\alpha_i)_{i=1, \dots, n}$  so that  $f(t^*) = \sum_{i=1}^n \alpha_i d_i$ .

*Algorithm: calculate the vector  $(\alpha_i)_{i=1, \dots, n}$  so that  $f(t^*) = \sum_{i=1}^n \alpha_i d_i$  for  $t_k \leq t^* \leq t_{n+1}$*

1. create a stocking matrix mat(k,k) and the vectors  $dp(k), dm(k)$ , create the vector  $res$  for stocking the values  $\alpha_i$
2. find the index  $ind$  so that  $t_{ind} \leq t^* \leq t_{ind+1}$

3. initialize  $mat [0] [0] = 1.0$
4. for  $j=0$  to  $k-2$ 
  - 4.1  $dp[j] = t[ind + j + 1] - t^*$
  - 4.2  $dm[j] = t^* - t[ind - j]$
  - 4.3 for  $i=0$  to  $k-1$ 
    - 4.3.1  $temp = mat[i][j] / (dp[i] + dm[j - i])$
    - 4.3.2  $mat[i][j + 1] += dp[i] * temp$
    - 4.3.3  $mat[i + 1][j + 1] = dm[j - i] * temp$
5. for  $i=0$  to  $k-1$ 
  - 5.1  $res[i + ind - k + 1] = mat[i][k - 1]$

## II THE MODELLING OF MULTI-DIMENSIONAL THERMO-MECHANICAL FIELDS

Given two uni-dimensional thermo-mechanical fields  $f(u) = \sum_{i=1}^p d_i^1 N_{i,k}(u) = d_1 \odot_i N_u$  on the knot set  $(u_i)_{i=1, \overline{p+k}}$  and  $g(v) = \sum_{j=1}^q d_j^2 N_{j,l}(v) = d_2 \odot_j N_v$ , on the knot set  $(v_j)_{j=1, \overline{q+l}}$ . The bi-dimensional thermo-mechanical field is given by a B-spline surface, defined as the tensorial product of the representative curves. Given :

$$(12) N_u = (N_{1,k}(u), N_{2,k}(u), \dots, N_{p,k}(u))^t; N_v = (N_{1,l}(v), N_{2,l}(v), \dots, N_{q,l}(v))^t,$$

$$(13) d = \begin{pmatrix} d_{ij} \end{pmatrix}_{\substack{i=1, \overline{p} \\ j=1, \overline{q}}} - \text{control points matrix.}$$

$$(14)$$

$$f \otimes g = (d_1 \odot_i N_u) \otimes (d_2 \odot_j N_v) = N_u \odot_i (d_1 \otimes d_2) \odot_j N_v = d_1 \odot_i (N_u \otimes N_v^t)$$

$$\odot_j d_2 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d_i^1 d_j^2 N_{i,k}(u) N_{j,l}(v). \text{ This is a B-spline surface whose basis functions}$$

are the tensorial products of the curves' basis functions. Allowing the control points to have arbitrary values, we get find the general formula for a B-spline surface :

$$(15) x(u, v) = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q d_{ij} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v) = N_u^t d N_v = d \odot_i N_u \odot_j N_v.$$

Being the B-spline surface a tensorial product, the isoparametrical curves on it have, in their turn, a B-spline representation. For example, for  $u = u_0$ , we obtain the isoparametrical curve v:



$$\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q d_{ij} N_{i,k}(u_0) N_{j,l}(v) = N_u^t d N_v = \sum_{j=1}^q \left( \sum_{i=1}^p d_{ij} N_{i,k}(u_0) \right) N_{j,l}(v) = \sum_{j=1}^q W_j N_{j,l}(v) \quad \text{defined}$$

on the control polygon  $W_j = \sum_{i=1}^p d_{ij} N_{i,k}(u_0)$ .

An important consequence of this fact is that limit control points (those on the borders) define limit curves.

A significant property of bigger dimensional entities, which come from the tensorial product of smaller dimensional entities, is given by the fact that the evaluation, approximation, interpolation etc. methods can be generalised in a convenient way. In each case, the bigger dimensional method implies recurrences of the same uni-dimensional version in every coordinate. In all the extentions of two curves tensorial product, we have to decide first on the processing direction. Even if there can be calculation advantages for a certain choice, depending on the dimentions of the B-spline function in different directions, the final result is the same.

The evaluation of a point on the surface  $x(u, v)$  at a parametres pair  $(u_0, v_0)$  is realized by means of a two-steps process.

STEP 1. We apply the curve evaluation algorithm in every column of control points matrix

$$d = \left( d_{ij} \right)_{\substack{i=1,p \\ j=1,q}}, \text{ using the knot set of } u: (u_i)_{i=1, \overline{p+k}} \text{ and the evaluation point of } u, u_0. \text{ This}$$

will have as a result q-points, one point for each column, corresponding to the tip of the triangled matrix, generated by the curve algorithm.

STEP 2. We apply the curve algorithm on the q-points resulting in STEP 1, using the knot set of  $v, (v_j)_{j=1, \overline{q+l}}$  and the evaluation point of  $v: v_0$ . The resulting point is the value of  $x(u, v)$  in  $(u_0, v_0)$ .

A three-dimensional thermo-mechanical field is determined by a B-spline volume of order  $(l, m, n)$  - a generalisation of the tensorial product of three curves of orders  $l, m, n$  respectively.

Given the B-spline curves:

$$f(u) = \sum_{i=1}^p d_i^1 N_{i,l}(u) = d_1 \odot_i N_u \text{ on the knot set } (u_i)_{i=1, \overline{p+l}}$$

$$g(v) = \sum_{j=1}^q d_j^2 N_{j,m}(v) = d_2 \odot_j N_v \text{ on the knot set } (v_j)_{j=1, \overline{q+m}}$$

$$h(w) = \sum_{k=1}^p d_k^3 N_{k,n}(w) = d_3 \odot_k N_w \text{ on the knot set } (w_k)_{k=1, \overline{r+n}}. \text{ Noting:}$$

$$(16) \quad d = \left( d_{ijk} \right)_{\substack{i=1,p \\ j=1,q \\ k=1,r}} - \text{ control points matrix (3D- matrix)}$$

$$(17) \quad N_u = (N_{1,l}(u), N_{2,l}(u), \dots, N_{p,l}(u)); N_v = (N_{1,m}(v), N_{2,m}(v), \dots, N_{q,m}(v));$$

$N_w = (N_{1,n}(w), N_{2,n}(w), \dots, N_{r,n}(w))$  - the vectors of B-spline basis functions, of the three curves, we have :

$$(18) \ x(u, v, w) = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^r d_{ijk} N_{i,l}(u) N_{j,m}(v) N_{k,n}(w) \text{ or written in a tensorial way:}$$

$$(19) \ x(u, v, w) = d \odot_i N_u \odot_j N_v \odot_k N_w$$

In (19) appears a triple contraction of order three, d, with the basis function vectors  $N_u, N_v, N_w$ . The first contraction produces a matrix, the second – a vector, and the third – a scalar, equal with the triple of the sum in the formula (18). Analogically with the B-spline entities of smaller dimensions, the isoparametrical surfaces which form the B-spline volume have a representation of the B-spline surface, and the control points at the border of the volume define border surfaces. The main algorithms for B-spline volumes are derived from the generalisation of the tensorial product of the corresponding curve and from surface algorithms.

The evaluation of a point on a B-spline volume,  $x(u, v, w)$ , at a triple parameter  $(u_0, v_0, w_0)$  is realised by means of a two-steps process :

STEP 1 : We apply the surface evaluation process to every control points layer  $d = (d_{ijk})_{\substack{i=1, \dots, p \\ j=1, \dots, q \\ k=1, \dots, r}}$ , using the knot set  $(u_i)_{i=1, \dots, p+l}, (v_j)_{j=1, \dots, q+m}$  and the parameters pair (u,v):  $(u_0, v_0)$ .

The result is a number of r points, one for each layer.

STEP 2 : We apply the curve algorithm to r points resulting in STEP 1, using the knot sets  $w: (w_k)_{k=1, \dots, r+n}$  and the evaluation point of w:  $w_0$ . This resulting point is the value :  $x(u_0, v_0, w_0)$ .

APLICACION

MODELLING THE GEOMETRICAL FIELD OF THE PROCESSING ERRORS IN LATHING A LONG CYLINDRICAL PIECE

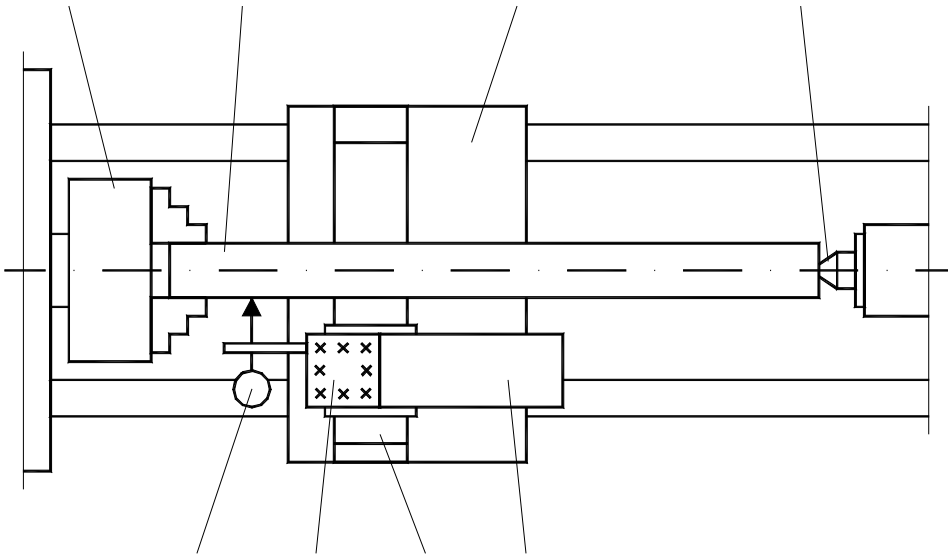


Figure 1 – Measuring processing errors in LATHING a cylindrical piece

In order to model the geometrical field of the processing errors we used a test assembly as the one presented in the figure 5.1. : a  $\Phi 60 \times 600$  mm steel dome, 2, was caught in the universal 1 and propped in the centring tip 3 of an universal lathe SNB-360. In the tool holder 7 on the tool holder sledge 5 was fitted an electronic comparator, 8, with  $1 \mu\text{m}$  precision.

Initially, the truck 4 was moved to the right, until the comparator got to the right end of the dome; in this point ( $x = 0$ ), the comparator was brought to zero ( $y=0$ ). By successively moving the truck to the left with steps  $\Delta y = 20$  mm, we read the comparator's indications to the quotation  $y=500$  mm.

Further on, the transversal sledge 6 was successively withdrawn every 10 mm, the comparator was brought back to zero in the right extremity of the dome and the measurement resumed in the same way. The whole group of measurements was repeated twice, without moving the dome, obtaining the results in table 1- *a*, *b* and *c* (where the quotations *x* and *y* are expressed in mm, and the deviation in  $\mu\text{m}$ ).

The values of the deviation in each point (*x*, *y*) were considered to be the arithmetic mean of the recorded deviations in the same point, in every of the three successive different measurements. The deviation values, calculated in this way, formed the entries for modelling a bi-dimensional geometrical field of the processing errors by means of spline function system specially designed (chapter III).

The graphic result of the modelling are presented in figure 1 and figure 2

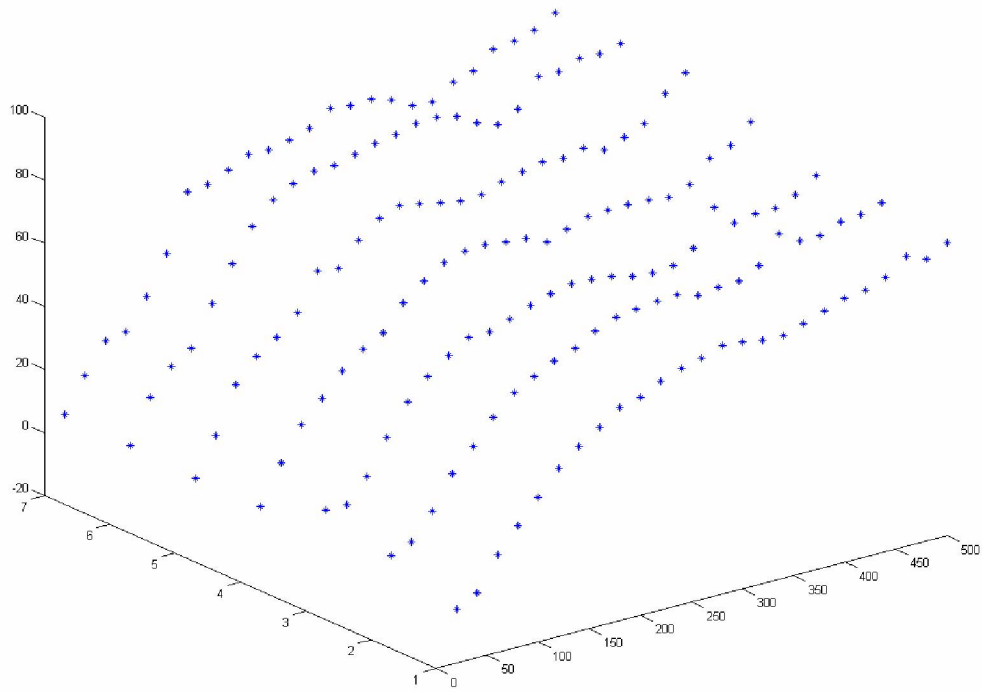


FIGURA 1 – *Punctele măsurate din câmpul geometric al erorilor*

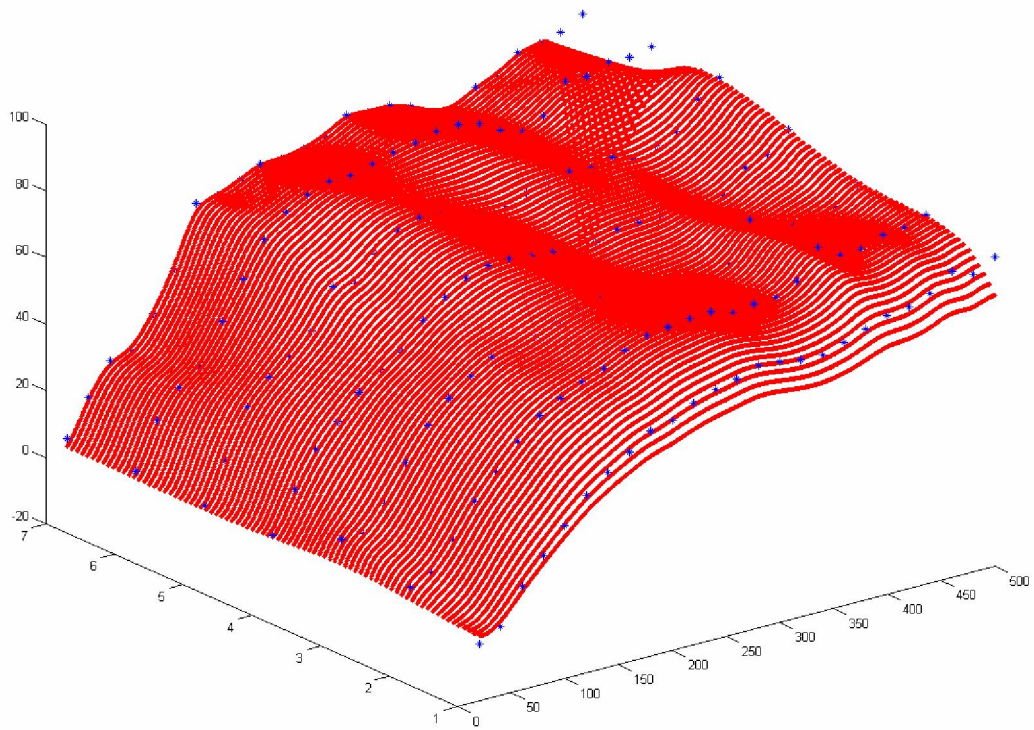


FIGURA 2 – Modelul spline al câmpului geometric al erorilor

## APPENDIX

A tensor of order zero is a scalar, and a tensor of order one is a vector :

$$u = (u_1, u_2, \dots, u_n).$$

The tensor of order two is determined by a matrix  $T = (T_{kh})_{\substack{k=\overline{1,m} \\ h=\overline{1,n}}}$ , where  $T_{kh}$  are the

tensor components in an orthonormalizedw base  $\{e_k \otimes e_h\}$ . ( $e_k, e_h$  - form basis in  $\mathbf{R}^m$  and  $\mathbf{R}^n$ , respectively).

The tensor of order three is given by a 3D-matrix (with rows, columns and layers)

$$T = (T_{ijk})_{\substack{i=\overline{1,m} \\ j=\overline{1,n} \\ k=\overline{1,p}}}$$

where  $T_{ijk}$  are the components of the tensor in the base  $\{e_i \otimes e_j \otimes e_k\}$

## TENSOR PRODUCTS

1. VECTOR  $\otimes$  VECTOR

Given  $u = (u_1, u_2, \dots, u_m)^t; v = (v_1, v_2, \dots, v_n)^t$ , then  $u \otimes v$  is a tensor of order two,  $T = u \otimes v$ , whose components are calculated by multiplying every component of u with every component of v, i. e.  $T = (T_{kh})$ , where  $T_{kh} = u_k v_h; \forall k = \overline{1,m}; \forall h = \overline{1,n}$ .

2. VECTOR  $\otimes$  TENSOR

Given  $v = (v_1, v_2, \dots, v_n)^t; T = (T_{jk})_{j,k=\overline{1,n}}$ , then  $v \otimes T$  is a tensor of order three  $U = v \otimes T$ , whose components are calculated by multiplying every component of v with every component of T, i. e.  $U = (U_{ijk}), U_{ijk} = v_i T_{jk}; \forall i, j, k = \overline{1,n}$ .

3. TENSOR  $\otimes$  TENSOR

Given  $T = (T_{ij})_{i,j=\overline{1,n}}; U = (U_{kh})_{k,h=\overline{1,n}}$  - two tensors of order two. Then  $T \otimes U$  is a tensor of order four whose components are calculated by multiplying every component of T with every component of U.

## CONTRACTED PRODUCTS

The contraction of a tensor with another tensor has as a result a new tensor whose components are calculated by adding the products of the two tensors after a common index. This may be done only if the number of rows, columns or layers corresponding to the common index is the same.

Each contraction produces a tensor whose order is equal to the sum of the two tensor orders minus two . for this operation we use the symbol  $\odot$ , and to make the difference between different indexes after which we add, we us the symbol  $\odot_i$ . We also use EINSTEIN notation convention : in a nominal, whenever an index is repeated two times, the adding of obtained terms is implied, giving all possible values to that index.

1) VECTOR  $\odot$  VECTOR

Given  $u = (u_1, u_2, \dots, u_n)^t; v = (v_1, v_2, \dots, v_n)^t$ . Then  $T = u \odot_i v = u_i v_i = u^t v;$

$u = u \odot_j v = uv^t$ , i. e. the usual scalar product.

2) TENSOR  $\odot$  VECTOR

There are two possible contractions, both producing a vector and corresponding to the matrix – vector or vector – matrix multiplying.

Given  $A \in \mathcal{L}_2$ ,  $A = (a_{ij})_{i,j=\overline{1,n}}$ ;  $v = (v_1, v_2, \dots, v_n)^t$ . Then :

$$(23) T = A \odot_j v = \begin{pmatrix} a_{1j}v_j \\ a_{2j}v_j \\ \dots \\ a_{nj}v_j \end{pmatrix} = Av; A \odot_i v = (a_{i1}v_1, a_{i2}v_2, \dots, a_{in}v_n) = v^t A.$$

### 3) TENSOR $\odot$ TENSOR

a) There are two possible contractions of two tensors of order two, both producing a tensor of order two, following the matrix-matrix scheme.

Given  $A, B \in \mathcal{L}_2$ ,  $A = (a_{ij})$ ,  $B = (b_{kl})$ ;  $i, j, k, l = \overline{1, n}$ .

$$(24) T = A \odot_j B = AB = \begin{pmatrix} a_{1j}b_{j1} & \dots & a_{1j}b_{jn} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{nj}b_{j1} & \dots & a_{nj}b_{jn} \end{pmatrix}; T = (T_{ij}) \text{ și } T_{ij} = a_{ik}b_{kj}.$$

$$\text{Analogically } T = A \odot_i B = \begin{pmatrix} a_{i1}b_{i1} & \dots & a_{in}b_{in} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{i1}b_{in} & \dots & a_{in}b_{in} \end{pmatrix}.$$

We notice that :  $A \odot_i B = B^t \odot_j A$ .

b) The contraction of a tensor of order three with a vector is a tensor of order two. As there are three possible indexes after we can add, we get three possible contractions.

Given  $D \in \mathcal{L}_3$ ,  $D = (D_{ijk})$ ;  $i, j, k = \overline{1, n}$ ,  $v = (v_1, v_2, \dots, v_n)^t$ . Then

$$(25) T = D \odot_i v = U, U = (U_{jk}), U_{jk} = D_{ijk}v_i$$

$$T = D \odot_j v = V, V = (V_{ik}), V_{ik} = D_{ijk}v_j$$

$$T = D \odot_k v = W, W = (W_{ij}), W_{ij} = D_{ijk}v_k$$

In order to obtain the contraction of a tensor of order three with a vector, concerning an index  $l$ , we establish one of the indexes  $i, j, k$  (different from  $l$ ) and we multiply the level matrixes in the 3D-matrix, in the same direction as the vector. In this way, we get  $n$  vectors which are the columns of the wanted tensor matrix. Consequently, two contraction methods appear. For the contraction  $\odot_i$  we have the following situations:

1) We establish the index  $j$  and we use the notation  $D^j$  in order to show a level matrix in  $j$  direction. Then  $T = D \odot_i v = (D^j v)_j = (D_{ijk}v_i)_{j,k=\overline{1,n}}$ .

2) We establish the index  $k$  and we obtain :

$$T = D \odot_i v = \left( D^k v \right)_k = \left( D_{ijk} v_i \right)_{j,k=1,\overline{n}}$$

Analogically, we treat  $\odot_j, \odot_k$ .

c) The contraction of a tensor of order three with a tensor of order two is a tensor of order three. Here, we also have three types of indexes which can be added, giving three possible contractions.

Given  $D \in \mathcal{L}_3, D = (D_{ijk})$ ,  $A \in \mathcal{L}_2, A = (a_{il})$   $i, j, k, l = \overline{1, n}$

$$(26) \quad T = D \odot_i A = (T_{ljk}), T_{ljk} = D_{ijk} a_{il}$$

$$T = D \odot_j A = (T_{ilk}), T_{ilk} = D_{ijk} a_{jl}$$

$$T = D \odot_k A = (T_{ijl}), T_{ijl} = D_{ijk} a_{kl}$$

To obtain the contraction of a tensor of order three with a tensor of order two, concerning an index  $l$ , we establish one of the indexes  $i, j, k$  (different from  $l$ ) and we multiply all the level matrixes in the 3D-matrix, in the same direction as the second matrix.

This produces new matrixes which are introduced in the level matrixes, in the chosen direction, forming the 3D-matrix. Here too there are two contraction methods.

For the contraction  $\odot_i$  we have :

1) We establish the index  $j$  and we use the notation  $D^j$  for a level matrix in direction  $j$ . We

$$\text{get : } T = D \odot_i A = \left( D^j A \right)_j = \left( D_{ijk} a_{il} \right)_{j,k,l=1,\overline{n}}$$

2) We establish the index  $k$  and we obtain :

$$T = D \odot_i A = \left( D^k A \right)_k = \left( D_{ijk} a_{il} \right)_{j,k,l=1,\overline{n}}.$$

## BIBLIOGRAFIE

1. H. ANTES. Bicubic Fundamental Splines in Plate Bending. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 8:503-511, 1974.
2. A. BRANGA. Contribuții la Teoria Funcțiilor Spline. Universitatea "Babes Bolyai", Cluj Napoca, 2003.
3. B. HAHMANN, T.A. FOLEY. A Quartic Spline Based on a Variational Approach. Computing Supplement, 10: 199-210, 1995.



4. R.S. JOHNSON. On Monosplines of Lest Deviation. Trans. Amer. Math. Soc, 96, 1960.
5. I. LIXANDRU, AL. EPUREANU, G. FRUMUȘANU, M.V. CRĂCIUN. Algorithm for Modeling Manufacturing Systems Thermo-Mechanical Fields Dynamics, Based on B-spline Functions. Analele Universității “Dunărea de Jos”, Galați (în curs de apariție).
6. V. OPROIU. Geometria Computațională a Curbelor și Suprafețelor. Editura Universității “Al.I.Cuza”Iași, pp. 97-113, 2003.
7. E. SOOS, C. TEODOSIU. Calcul Tensorial cu Aplicații în Mecanica Solidelor. Ed. Științifică și Enciclopedică, București, pp. 38-67, 1981.

**11) Algorithm for Modeling the Thermo-Mechanical Field Dynamics, Based on B-Spline Functions, with Application to Machining System**, Ion Lixandru, Alexandru Epureanu, Gabriel Frumușanu, Marian Viorel Crăciun“Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati. Fascicle II, Mathematics, Physics, Theoretical Mechanics, ISSN 1221-4531, 2008, (publicatie indexata BDI)

## **Algorithm for Modeling the Thermo-Mechanical Field Dynamics, Based on B-Spline Functions, with Application to Machining System**

### **ABSTRACT**

*Manufacturing systems adaptive control, having as final purpose products fabrication in conditions of maximum efficiency and by respecting required quality (precision) specifications, can be done only by permanently identifying these systems. Manufacturing systems identification is realized, in fact, by identifying characteristic fields. Because process conditions continuously change during manufacturing, it appears the necessity of modeling system dynamics. This paper presents a specific tool, designed to enable manufacturing systems thermo-mechanical fields dynamics modeling, based on B-spline functions. A numerical application, in the case of a lathe vibrations field is also presented.*

**Keywords:** thermo-mechanical fields, dynamics, modeling algorithm, B-spline functions.

### **1. Introduction**

Manufacturing systems adaptive control, having as final purpose products fabrication in conditions of maximum efficiency and by respecting required quality (precision) specifications, can be done only by permanently identifying these systems.

Manufacturing systems identification is realized, in fact, by identifying their characteristic fields, no matter if talking about geometric fields (manufacturing errors field), mechanical fields (forces, stresses or strains) or thermic fields; these fields identification is grounded on mathematical models.

Having in view that, during the manufacturing process, its evolving conditions permanently change, it appears the necessity of modeling not only the characteristic fields, but also theirs dynamics.

In dedicated literature, concerning technological systems identification, there are presented different types of characteristic fields models, analytical (based on laws governing the involved phenomena) or numerical (built-on by using the Finite Elements Method, the Element-Free Galerkin Method or Hybrid Neural-Fuzzy methods).

Although the influence of thermo-mechanical fields, generated by manufacturing processes, onto manufacturing precision is analyzed and different methods to calculate and compensate the errors (in concrete situations) are suggested, an exhaustive approach on manufacturing systems characteristic fields dynamics modeling, with general character, cannot be found and neither a specific mathematical tool dedicated to it.

From upper exposed arguments, it appears the necessity and the utility of conceiving a specific tool to allow manufacturing systems thermo-mechanical fields and their dynamics modeling; together to

“on-machine” measuring techniques this will lead to an efficient adaptive control of mechanical manufacturing processes.

## 2. B-Spline functions

A B-spline function is a polynomial segmental function, which can be expressed by using a basic set of functions ( $N_{i,k}(t)$ ) on each interval, referred to a set of nodes.

Basic functions are chosen on such a manner as the number of backing intervals is as smaller as possible and the modification of a node position implies changes concerning only its neighborhood.

The set of  $k+1$  consecutive intervals on which a  $k$ -order B-spline function is not null is considered as its support.

Basic B-spline functions can be iteratively generated as it follows:

$$N_{i,1}(t) = \begin{cases} 1, & t \in [t_i, t_{i+1}); \\ 0, & \text{in other cases.} \end{cases} \quad (1)$$

$$N_{i,k}(t) = \frac{t - t_i}{t_{i+k-1} - t_i} N_{i,k-1}(t) + \frac{t_{i+k} - t}{t_{i+k} - t_{i+1}} N_{i+1,k-1}(t), \quad \forall k \geq 2. \quad (2)$$

By using basic B-spline functions, a  $k$ -order B-spline function can be written as

$$f(t) = \sum_{i=1}^n d_i N_{i,k}(t), \quad (3)$$

on  $(t_i)_{i=1, n+k}$  set of nodes.

This sum calculus can be efficiently done by using the iterative relation (2), which enables to express  $f(t)$  relative to basic B-spline functions, having an order smaller by one. This is further leading to the possibility of elaborating an algorithm to be used when calculating the coefficients vector to evaluate a B-spline function value, depending on its initial control points.

## 3. Algorithm for Modeling Thermo-Mechanical Fields Dynamics

Let's considering a certain type of thermic or mechanical field, characterized by a function defined on a 3-D domain,  $f = f(x, y, z)$ . We also suppose that  $f$  function values can be measured in a great number of points,  $N$ , owing to its definition domain.

Our final purpose is to find an algorithm for characterizing considered field dynamics, by monitoring the values of  $f$  function in only a

few ( $n$ ) points, conveniently chosen from all  $N$  points (from practical reasons, it is very difficult to realize too many measurements during a certain manufacturing process).

From the very beginning we assume that considered field has a coherent evolution in time [1] – its values may change, but its map keeps the same general pattern.

A four-steps algorithm is further suggested, to solve the enounced problem.

1. The values of  $f$  function are measured in all  $N$  points, both in the initial and in the final stage of a certain process.

2. A difference function,  $\Delta f$ , is calculated

$$\Delta f(x, y, z) = f_f(x, y, z) - f_i(x, y, z), \quad (4)$$

where  $f_f$  gives the final stage values and  $f_i$  – the initial stage values.

3. The difference function is modeled on entire domain, by using B-spline functions and by considering its values in only  $n$  points; the  $n$  points are chosen among all  $N$  points by using genetic algorithms to find which of them have the greatest influence when characterizing field dynamics.

4. To find the estimated values of  $f$  function into the final stage, the modeled difference function values are added to  $f$  initial stage values, in every point from all  $N$  considered,

$$f_f(x, y, z) = f_i(x, y, z) + \Delta^n f(x, y, z), \quad (5)$$

where  $\Delta^n f$  is the function obtained by modeling with B-spline functions.

To evaluate the quality of considered field dynamics modeling, a comparison between  $f_f$  calculated and  $f_f$  measured values should be done.

## 4. Numerical Application to a Machining System

The upper presented algorithm was applied to do a SNB 360 lathe vibrations field dynamics modeling. The vibrations were generating by rotating an eccentric body fixed into the self-centering chuck.

To obtain the input data for starting vibration field dynamics modeling, vibrations amplitude was measured in  $N = 53$  points from lathe frontal surface (considered as  $xz$  plain), chosen on such a manner as all significant zones were considered (fig.1); these points disposition was as it follows:

- 1...25 – on headstock 1;
- 26 – on lathe tool holder 2;
- 27, 28 – on tool holder slide 3;
- 29...32 – on longitudinal slide 4;
- 33, 34 – on tailstock 5;

- 35...42 – on anterior longitudinal guide way;
- 43...50 – on bed 6, under anterior longitudinal guide way;
- 51...53 – on bed 6, on lathe stand 7.
- measuring temperature: between -50 ... +120 °C;
- dynamics measuring range: > 80 dB.

The measurements were done by using a X Viber type device, with piezoelectric transducer, having the following main characteristics:

- sensitivity: 100 mV/g;
- frequency range: 1 – 10,000 Hz;
- resonance frequency: 23,000 Hz;

More measurements series were done: the first one, considered as reference stage, for spindle 600 rot/min rotation speed and a certain eccentricity of the body,  $e$  ( $f_1(x,z)$ , tab.1). Then, vibrations frequency was modified, by changing spindle rotation speed to 800 and 1000 rot/min ( $f_2(x,z)$  and  $f_3(x,z)$ , tab.1). Finally, the amplitude of excitation force was modified by changing rotated body eccentricity to  $2e$  and  $3e$  ( $f_4(x,z)$  and  $f_5(x,z)$ , tab.1).

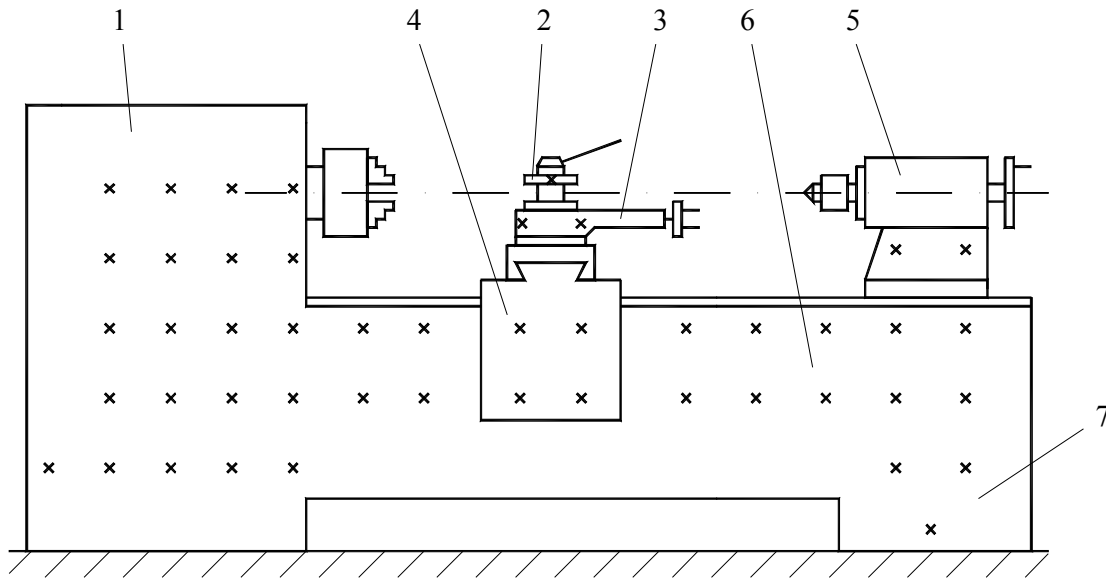


Fig.1 – Measuring points disposition

Tab. 2

Point No.	x [cm]	z [cm]	$f_1(x,z)$ [ $\mu\text{m}$ ]	$f_2(x,z)$ [ $\mu\text{m}$ ]	$f_3(x,z)$ [ $\mu\text{m}$ ]	$f_4(x,z)$ [ $\mu\text{m}$ ]	$f_5(x,z)$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	20	90	28	39	32	36	44
2	35	90	30	38	30	35	41
3	50	90	27	35	30	31	37
4	65	90	24	30	29	29	35
5	20	75	26	37	31	32	41
6	35	75	25	33	32	30	36
7	50	75	26	32	31	30	37
8	65	75	23	28	30	30	32
9	20	60	25	35	31	29	35
10	35	60	25	33	30	29	35
11	50	60	24	32	31	27	37
12	65	60	22	28	29	28	34
13	20	45	24	35	30	28	34
14	35	45	24	33	32	29	34
15	50	45	23	31	30	27	33
16	65	45	21	27	30	25	31
17	20	30	23	35	29	27	34
18	35	30	22	33	31	26	32

19	50	30	21	29	30	24	30
20	65	30	19	28	31	23	29
21	5	15	23	36	31	29	34
22	20	15	24	34	30	29	33
23	35	15	22	30	29	24	30
24	50	15	20	28	30	23	29
25	65	15	19	28	29	24	29
26	115	90	19	22	33	22	27
27	115	75	19	24	32	21	25
28	130	75	17	23	39	24	26
29	115	60	19	22	32	21	28
30	130	60	18	20	33	19	28
31	115	45	17	21	32	19	25
32	130	45	15	19	31	20	22
33	145	90	17	21	36	20	24
34	160	90	15	21	36	18	21
35	85	60	21	26	32	25	30
36	100	60	19	23	30	22	28
37	145	60	15	20	33	20	22
38	160	60	14	19	33	18	20
39	175	60	12	18	34	15	17
40	190	60	10	17	33	13	15
41	205	60	7	18	36	10	13
42	220	60	7	22	37	8	10
43	85	45	18	23	29	22	25
44	100	45	17	21	30	21	25
45	145	45	13	17	31	15	19
46	160	45	11	16	31	13	19
47	175	45	10	17	30	13	15
48	190	45	10	17	32	11	12
49	205	45	7	17	34	9	12
50	220	45	6	18	31	7	8
51	205	30	6	15	28	8	9
52	220	30	5	19	31	5	7
53	210	15	5	15	26	6	6

Like upper explained, the difference functions were, then, calculated:

$$\Delta f_{1i}(x, z) = f_i(x, z) - f_1(x, z), \quad i = 2 \dots 5. \quad (6)$$

The four difference functions were modeled by using B-splines, first based on values from  $n_1 = 25$  selected points (fig.2...5), then based on only  $n_2 = 5$  selected points.

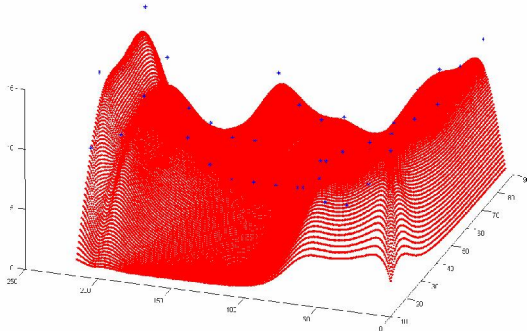


Fig.2 –  $\Delta f_{12}$  model

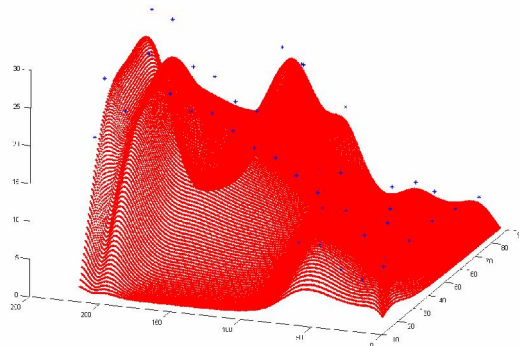


Fig.3 –  $\Delta f_{13}$  model

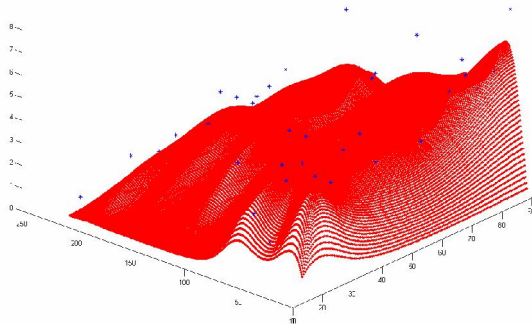


Fig.4 –  $\Delta f_{14}$  model

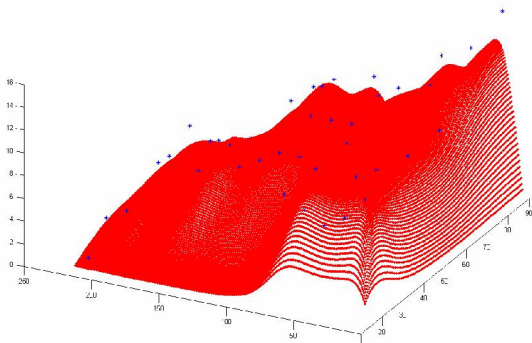
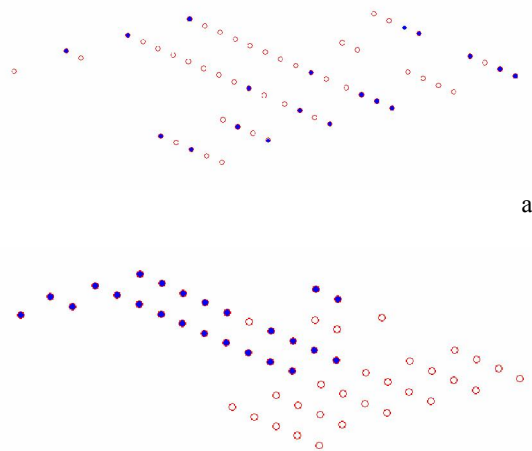


Fig.5 –  $\Delta f_{15}$  model

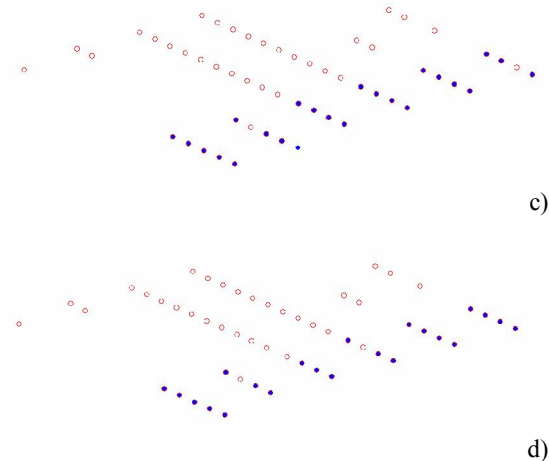
It is very important to observe if the points chosen by genetic algorithm as best characterizing vibrations field dynamics are (more or less) the same; if the points are quite the same, it means that the manufacturing process can be monitored by making measurements in only a few points.

The positions of chosen points, among all 53 measurement points, when using  $n = 25$  points are shown in Fig.6.



a)

b)



c)

d)

Fig.6 – The points chosen by genetic algorithm to  $\Delta f_{1i}$  functions modeling: a-  $\Delta f_{12}$ ; b-  $\Delta f_{13}$ ; c-  $\Delta f_{14}$ ; d-  $\Delta f_{15}$ .

The comparison between vibrations real field, found by measurements and its modeled image (obtained by summing modeled difference function values to the ones from the considered reference stage) was done by calculating the average square deviation between the measured values and those obtained through modeling (in the case of each transition between two stages). The results are shown in Tab.2.

Tab.2

	Standard Deviation			
	1 → 2	1 → 3	1 → 4	1 → 5
25 points	1.2799	8.9205	0.6133	0.8691
5 points	3.5573	11.1588	0.6274	1.1251

### 5. Conclusions

By carefully analyzing the results obtained when doing the upper presented numerical application, the following main conclusions may be drawn:

- B-splines functions can be successfully used to realize manufacturing systems thermo-mechanical fields and their dynamics modeling; together to an appropriate graphic soft, suggestive and useful fields images can be obtained;

- The methodology imagined to realize fields' dynamics modeling is functional; when using a great-enough number of points to construct the difference function, results accuracy is remarkable;

- The results of vibrations field dynamics modeling are totally different in the two considered cases – modifying vibrations

frequency versus modifying vibrations excitation force amplitude;

- The disposition of points selected by the genetic algorithm as representative to realize system dynamics modeling substantially changed when passing from first to third oscillation frequency, respect to the transition from first to second oscillation frequency, in both cases ( $n = 25$  or  $n = 5$  points). This can be explained by the fact that one of system's critical oscillation frequencies is placed between the minimum and the maximum of the frequencies used in the experiment, the system's vibration mode considerably changing (vibrations field is not coherent between the three stages);

- When only 5 points were used, the error generated by the suggested modeling algorithm is relative higher;

- In the case of modeling vibrations field dynamics at excitation force variation, the positions of selected points remain the same in both situations ( $n = 25$  or  $n = 5$  points) and the precision obtained, even when only 5 points were considered, is very good.

As final conclusion, the dynamics of systems characterized by coherent thermo-mechanical fields can be successfully modeled by using B-spline functions and by measuring their values in only a few points.

Further than that, the new imagined modeling tool, upper presented, together to "on-machine" measuring techniques (which are more and more used in modern manufacturing systems control) could lead to an efficient adaptive control of mechanical manufacturing processes. By realizing an "on-line" dimensional identification, manufacturing errors could be reduced to minimum.

### References

1. **Lixandru, I., Epureanu, Al., Frumușanu, G., Crăciun, M. V.**, *Coherence of Reconfigurable Manufacturing Systems Thermo-Mechanical Fields*, Analele Universității „Dunărea de Jos” din Galați, Fascicula V, Anul XXV (XXX), ISSN 1221-4566, 2007, p. 20-24.

2. **Golet, I.**, *Ecuatii diferentiale si teoria campurilor-curs*, Universitatea „Politehnica” Timisoara, 1994.

3. **Kops, L. and Natarajan, S.**, *Dynamic optimization of job distribution on machine tools using time decomposition into constant job-mix stages*, *Annals of CIRP*, 2002, v. 41/1.

4. **Le Blanc, M.**, *Thermal Field Theory*, Cambridge Monographs on Mathematical Physics, ISBN 0-521-65477-7, 2000.

5. **Lemart, L.**, *System identification: theory for the user*, 2<sup>nd</sup> ed., Practice Hall, 1999.

6. **Potdar, Y.**, *Measurements and Simulation of Temperature and Deformation Field in Transient Metal Cutting*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, vol.125, November, 2003.

7. **Chiriacescu, S.** *Dinamica Mașinilor-unelte*, Editura Tehnică, ISBN 973-31-2206-8, București, 2004.

### Rezumat

Conducerea adaptivă a sistemelor de prelucrare, având ca scop final fabricația în condiții de eficiență maximă a unor produse care să satisfacă cerințele de calitate (precizie) prescrise de proiectant, necesită identificarea permanentă a acestor sisteme. Identificarea sistemelor de prelucrare se realizează, de fapt, prin identificarea unor câmpuri caracteristice, fie că este vorba de câmpuri geometrice (câmpul erorilor de prelucrare), mecanice (câmpuri de forțe, tensiuni sau deplasări) sau termice, iar la baza identificării câmpurilor stau modele matematice ale acestora. Având în vedere faptul că, pe parcursul procesului de prelucrare, condițiile de desfășurare ale acestuia se modifică în mod continuu, pe lângă modelul static al câmpurilor caracteristice trebuie să existe și posibilitatea de modelare a dinamicii câmpurilor. În lucrările de specialitate dedicate identificării sistemelor tehnologice, sunt prezentate diferite tipuri de modele, analitice sau numerice. Deși influența câmpurilor termo-mecanice, generate de procesele de prelucrare, asupra preciziei de prelucrare este analizată și se propun diferite modele care să permită calculul și compensarea erorilor de prelucrare (pentru diferite cazuri concrete), nu există o abordare exhaustivă, cu caracter general, asupra modelării dinamicii acestor câmpuri și nici vreun produs matematic special dedicat acestei modelări. Lucrarea de față propune un instrument specific, care să permită modelarea câmpurilor termo-mecanice ale sistemelor de prelucrare și a dinamicii acestora și care, asociat cu tehnicile de măsurare „on-machine”, să permită o conducere adaptivă, eficientă, a proceselor de prelucrare mecanică. O aplicație numerică elocventă, referitoare la câmpul vibrațiilor unui strung, este, de asemenea, prezentată.

### Résumé

La commande adaptive des systèmes d'usinage mécanique, ayant comme but final la production en conditions d'efficacité maximisée et de qualité nécessite l'identification continue de ces systèmes. L'identification des systèmes d'usinage se fait, en effet, par l'identification des champs caractéristiques, soit qu'il s'agit de champs géométriques, mécaniques ou thermiques. En tenant compte que durant le processus de fabrication les conditions de déroulement se changent en permanence, il est nécessaire un instrument qui peut réaliser la modélisation de la dynamique de ces champs. Ce papier propose un tel instrument, lequel, associé à des techniques de mesure «on-machine», permettra la commande adaptive, efficiente, des processus de fabrication mécanique. Une application numérique éloquent, concernant les champs de vibrations d'un tour, est aussi exposée.



12) **Coherence of Reconfigurable Manufacturing Systems Thermo-Mechanical Fields**, Ion Lixandru, Alexandru Epureanu, Gabriel Frumușanu, Marian Viorel Crăciun, Annals of the „Dunărea de Jos” University , Fascicle V, Year XXVI (XXXI), ISSN 1221-4566, 2008 (publicatie indexata **BDI**).

## Coherence of Reconfigurable Manufacturing Systems Thermo-Mechanical Fields

Ion Lixandru, Alexandru Epureanu, Gabriel Frumușanu,

Marian Viorel Crăciun

“Dunărea de Jos” University of Galați

### ABSTRACT

*The quality of surfaces generated on RMS as well as dimensional and geometrical precision of manufactured pieces is closely tied to the possibility of controlling, in real time, the manufacturing process. To do such a thing, it is necessary to have precise information concerning the manufacturing system fields. Because we aren't able to measure specific parameters values in every point of these fields, we are looking for the possibility of finding functions of field-variable to realize manufacturing fields' accurate modeling. An important fields' property that could ease their modeling is the coherence. This paper suggests a tool to investigate a certain field coherence, simple but effective, to further enable its appropriate modeling.*

**Keywords:** RMS fields, coherence, modeling, approximation functions.

### 1. Reconfigurable Manufacturing Systems Fields

A certain reconfigurable manufacturing system (RMS) may be defined as an ensemble with hard and soft components, conceived on such a manner as it can be used to transform a worked piece into a finite one. The hard components are connected between them such as to form an open frame having at its extremities the tool and the worked piece (Fig.1).

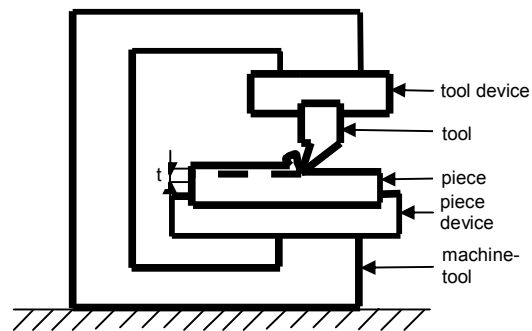


Fig.1 – RMS Hard Components Structure

A mechanical or thermal nature interaction appears between tool and piece, whose effect is the manufacturing process; its

consequences are the modifications of worked piece shape, dimensions or properties such as to meet finite product specifications. A RMS conceptual scheme, where major interactions between system components are highlighted is presented in Fig.2.

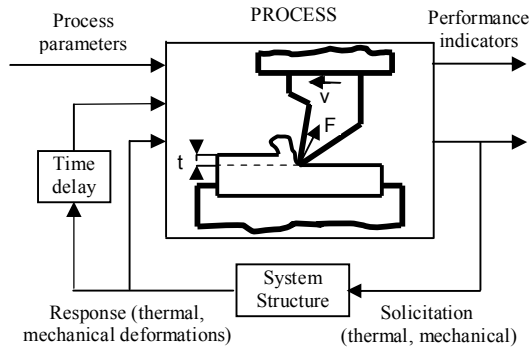


Fig. 2 – RMS Conceptual Scheme

At conceptual level, any manufacturing system may be considered as having two components among which specific connections establish; these components are:

- The manufacturing process;
- The system structure.

The manufacturing process has at its input process parameters as cutting speed,  $v$ , cutting depth,  $t$  and at its output both performance indicators (precision, surface roughness, price, productivity) and structure solicitations (elastic or thermal deformations, wearing etc.). Structure response turns back at process input twice:

- At solicitation moment;
- After a certain time delay from solicitation moment.

The solicitation of manufacturing system structure involves the installation of some specific fields, which will be further named manufacturing system fields. For example, the thermal field, generated because the energy used during the process is transformed in heat and modifies the temperature in different structure points. Another example is structure deformation, meaning that each structure point moves respect to its initial position, generating the displacements field.

The interaction between tool and worked piece is the source (direct or indirect) of three types of fields:

- Mechanical fields: forces field, displacements field, tensions field, mechanical receptances field;
- Geometrical fields: worked piece errors field, system errors field, process errors field,

product errors field, manufacturing precision field;

- Thermal fields: system thermal field, thermal deformations field, thermal receptances field.

## 2. Evaluation of Thermo-Mechanical Fields Coherence

The quality of surfaces generated on RMS as well as dimensional and geometrical precision of manufactured pieces is closely tied to the possibility of controlling, in real time, the manufacturing process. To do such a thing, it is necessary to have precise information concerning the manufacturing system fields.

Because we aren't able to measure specific parameters values in every point of these fields, we are looking for the possibility of finding functions of field-variable to realize manufacturing fields' accurate modeling. An important fields' property that could ease their modeling is the coherence.

By field coherence we mean that if to a field, having a certain map, we apply a perturbation, the general aspect of the map doesn't change. More specific, the thermo-mechanical field characterizing a RMS, at a certain moment, is considered coherent if being influenced by an additional quantity of heat coming from the cutting process, the hottest points from the field remain the hottest and the coldest remain the coldest (of course at another level and perhaps, at another ratio between them).

To evaluate RMS thermo-mechanical field coherence, the following methodology was imagined:

a. The values of a manufacturing process characteristic parameter, also in connection with RMS thermo-mechanical field, are measured in a number of points.

b. A set of interpolation functions to approximate the variation, in the field, of chosen characteristic parameter is determined, based on values measured before.

c. An additional solicitation, following a known law (linear or harmonic), is applied to RMS.

d. A new set of interpolation functions is determined, under the new conditions.

e. A thoroughly comparison between the two sets of interpolation functions is made, in order to reveal if their modification is relative similar to solicitation modification; if the answer is affirmative, we could conclude that the analyzed field is coherent.

### 3. Example of Application

To validate the upper-suggested algorithm, a simple application was considered. A file containing manufacturing errors, due to the effect of the manufacturing process thermo-mechanical field, measured along a certain direction, in 200 points is analyzed. Its graphical representation is shown in Fig. 3.

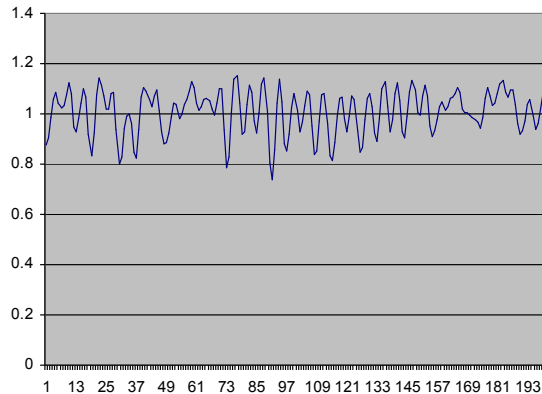


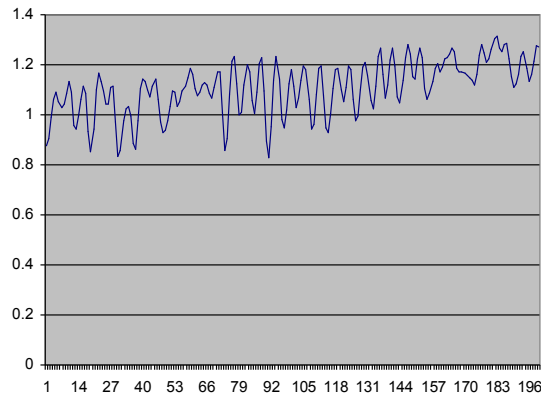
Fig.3 – Manufacturing Errors Evolution along the Chosen Direction

Then we simulate the addition to the manufacturing process normal thermo-mechanical field of a supplementary field, with known variation,

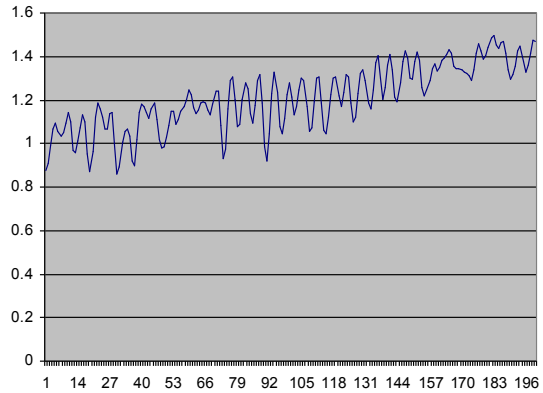
Linear,  $y = i \cdot m + n$ , or (1)

Sinusoidal,  $y = a \sin \frac{i \cdot \pi}{200}$ , (2)

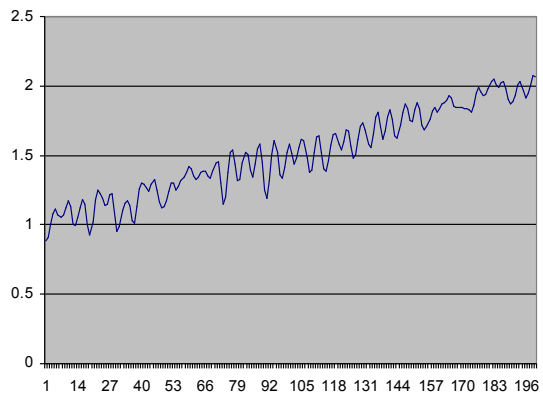
where  $i$  means current point order number,  $i = 1 \dots 200$ ,  $m$ ,  $n$  and  $a$  being constants concerning straight line (1) direction respective sinusoidal curve (2) amplitude. Graphical representations of manufacturing errors in these cases are shown in Fig. 4 (linear supplementary field) and 5 (sinusoidal supplementary field).



a)  $m = 0.1, n = 0$



b)  $m = 0.2, n = 0$

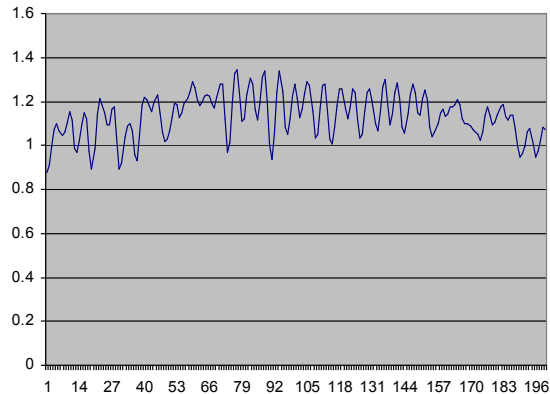


c)  $m = 0.5, n = 0$

Fig.4 – Addition of Linear Supplementary Field

In each of presented cases, the evolution of manufacturing errors field was modeled by approximating through a system of 3<sup>rd</sup> degree functions.

First of all, the evolution curve was divided into a number of segments, each one including 7 ... 12 points, on such a manner as each segment should be as similar as possible to the general image of a 3<sup>rd</sup> degree function graphic; 22 segments were obtained. This division was kept the same in each different curve case.



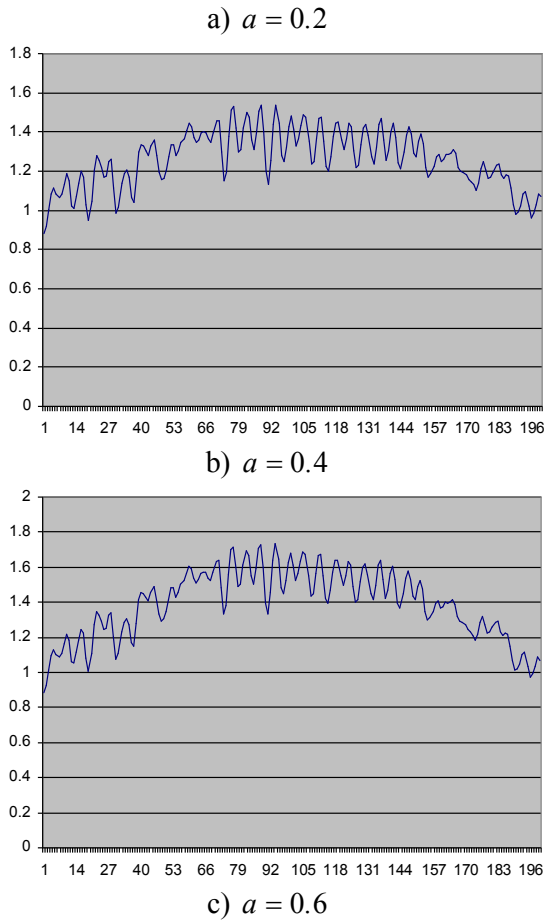


Fig.5 – Addition of Sinusoidal Supplementary Field

Then, each segment was replaced by a 3<sup>rd</sup> degree function,

$$f = a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x + a_0, \quad (3)$$

chosen by imposing it to pass through two of curve segment points and to have minimum medium squared deviation respect to the rest of segment points.

In Fig. 6 is shown an example of such approximation functions, determined in the case of two consecutive curve segments.

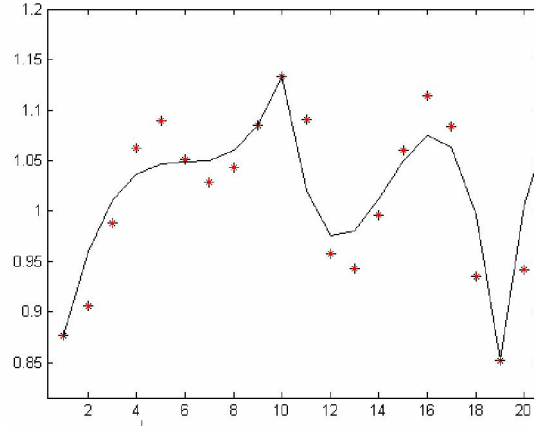


Fig.5 – Manufacturing Errors Curve Substitution by using 3<sup>rd</sup> Degree Polynomial Functions

In Tab.1 is presented  $a_0$  coefficients evolution, in the case of curves shown in Fig. 3, and in Tab.2, same coefficients evolution, in the case of curves from Fig.4.

By thoroughly examining the results from Tab.1, it is obvious that between linear additional field inclination and  $a_0$  values there is a close connection: when angular coefficient  $m$  increases,  $a_0$  also increases; more than that, if  $m$  growing increment is higher,  $a_0$  growing increment is also higher.

The values presented in Tab.2 are leading to similar conclusions, but now we are looking for a similarity between sinusoidal additional field amplitude,  $a$ , and  $a_0$  coefficient magnitude. The similarity exists and goes further than a simple correspondence between increasing or decreasing tendencies. At the curve extremities segments, the effect of the additional field is smaller than in the case of the middle segments;  $a_0$  coefficients are also less changing if passing from a case to another at the extremities and more changing at the middle of the substituted curve.

We can now affirm, having in view the criterion upper suggested to evaluate thermo-mechanical fields coherence, that the manufacturing errors field considered in this example is coherent.

By considering the results of the upper presented example and also the results from other fields analyzed, we can draw the following conclusions:

Table 1

Segment Crt. No.	$a_0$		
	$m=0.1$	$m=0.2$	$m=0.5$
1	0.753259	0.753259	0.753259
2	1.336760	1.345760	1.372760

3	0.616744	0.634744	0.688744
4	1.375328	1.402328	1.483328
5	0.621303	0.657303	0.765303
6	1.344929	1.388929	1.520929
7	0.960907	1.013907	1.172907
8	1.256487	1.320487	1.512487
9	0.572965	0.644965	0.860965
10	1.373916	1.454916	1.697916
11	0.491832	0.581832	0.851832
12	1.384882	1.483882	1.780882
13	0.787696	0.894696	1.215696
14	1.391646	1.509646	1.863646
15	0.805707	0.930707	1.305707
16	1.473929	1.608929	2.013929
17	0.823241	0.966241	1.395241
18	1.440999	1.591999	2.044999
19	1.115919	1.274919	1.751919
20	1.381350	1.557350	2.085350
21	1.212697	1.396697	1.948697
22	1.442270	1.635270	2.214270

Table 2

Segment Crt. No.	a <sub>0</sub>		
	a=0.2	a=0.4	a=0.6
1	0.753168	0.753294	0.753170
2	1.355945	1.384136	1.412362
3	0.654509	0.710312	0.766076
4	1.430704	1.512885	1.595261
5	0.692435	0.799641	0.906715
6	1.428421	1.555984	1.683465
7	1.055813	1.203639	1.351735
8	1.361311	1.530263	1.699122
9	0.681915	0.862939	1.043756
10	1.484145	1.675225	1.866481
11	0.599375	0.796918	0.994389
12	1.485848	1.685814	1.885828
13	0.879454	1.078198	1.277103
14	1.465817	1.657766	1.849858
15	0.865528	1.050284	1.235127
16	1.509520	1.679961	1.850552
17	0.836333	0.992400	1.148484
18	1.429126	1.568356	1.707450
19	1.077058	1.197073	1.317208
20	1.278993	1.352590	1.426232
21	1.078444	1.128198	1.177933
22	1.271102	1.293096	1.315101

#### 4. Conclusions

First of all we must highlight that an instrument, simple but effective, to evaluate fields (generally speaking) and especially RMS thermo-mechanical fields coherence. This instrument was imagined in order to facilitate the modeling of manufacturing systems fields dynamics. By measuring a field specific

parameter values in a certain number of points (not very large), with a certain time step, we could have a consistent and precise enough information about field dynamics. Thus, it will become possible to control, in real time, the manufacturing process, with direct application in manufacturing process stability control. The ultimate aim is a complete exploitation of Reconfigurable Manufacturing Systems resources of productivity, by working with cutting regimes more intense, to the limit of stability domain.

#### References

1. **Golet, I.**, *Ecuatii diferentiale si teoria campurilor-curs*, Universitatea „Politehnica” Timisoara, 1994.
2. **Kops, L. and Natarajan, S.**, *Dynamic optimization of job distribution on machine tools using time decomposition into constant job-mix stages*, *Annals of CIRP*, 2002, v. 41/1.
3. **Le Blanc, M.**, *Thermal Field Theory*, Cambridge Monographs on Mathematical Physics, ISBN 0-521-65477-7, 2000.
4. **Lemart, L.**, *System identification: theory for the user*, 2<sup>nd</sup> ed., Practice Hall, 1999.
5. **Potdar, Y.**, *Measurements and Simulation of Temperature and Deformation Field in Transient Metal Cutting*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, vol.125, November, 2003.

### **Rezumat**

Atât calitatea suprafețelor generate cu ajutorul sistemelor de fabricație reconfigurabile, cât și precizia geometrică și dimensională a pieselor prelucrate sunt strâns legate de posibilitatea de a controla, în timp real, procesul de prelucrare. Pentru a îndeplini un astfel de obiectiv, sunt necesare informații precise referitoare la câmpurile sistemului de prelucrare. Deoarece nu este posibilă măsurarea valorilor parametrilor specifici în toate punctele acestor câmpuri, ar fi utilă evidențierea unor funcții de variabilă – câmp, care să permită modelarea precisă a câmpurilor sistemului de prelucrare. O proprietate importantă a câmpurilor, care facilitează modelarea acestora, este coerența. Lucrarea de față sugerează un instrument simplu și eficient, posibil de utilizat pentru evaluarea coerenței unui câmp, în vederea unei modelări ulterioare corecte.

### **Résumé**

La qualité des surfaces générées à l'aide des systèmes de fabrication reconfigurables, en même temps avec la précision géométrique et dimensionale des pièces obtenues sont directement liées de la possibilité de contrôler, en temps réel, le processus d'usinage. Pour accomplir tel un objectif, ils sont nécessaires des informations précises concernant les champs du système d'usinage. Parce qu'il n'est pas possible de mesurer les valeurs des paramètres spécifiques dans tous les points de ce champs, il sera utile de mettre en évidence certaines fonctions de variable – champ, pour permettre la modélisation précise des champs du système d'usinage. Une propriété remarquable des champs, qui peut faciliter leur modélisation, c'est la cohérence. Ce papier sugere un instrument simple et efficient, possible d'être utilise pour l'évaluation de la cohérence d'un certain champ, qui permettra ainsi une modélisation ultérieure appropriée.

**13) Conceiving of a high level language for programming of the machine reconfiguration and part machining dedicated to the new reconfigurable machine-tools generation**, Marin F.B., Epureanu A., Marinescu V., Banu M., Constantin I., Annals of the „Dunărea de Jos” University , Fascicle V, Year XXVI (XXXI), ISSN 1221-4566, 2008 (publicatie indexata **BDI**).

## **Conceiving of a high level language for programming of the machine reconfiguration and part machining dedicated to the new reconfigurable machine-tools generation**

Marin F.B., Epureanu A., Marinescu V., Banu M., Constantin I.

„Dunărea de Jos” University of Galați

### **ABSTRACT**

*This paper is proposing a new approach of the RMT (Reconfigurable Machine Tool) programming. The approach is based on a new control architecture characterized by high level of reconfigurability. The programming consist in the building of two documents: i) machine-program, concerning machine reconfiguration phase and ii) part-program, concerning the programming of the machine to process a specific part. A visual language architecture is proposed for the two documents, allowing a fast programming and a fine-grain control. This visual language is replacing the traditional G-code. In addition, the language allows the programming of the machine hardware reconfiguration, according to the current part family to be processed.*

**Keywords:** *Reconfigurable machine tool, CAM software, numerical control reconfiguration, CNC programming.*

### **1. Introduction**

Nowadays, companies building manufacturing machines must face fast changes happening on technical, commercial and economical fields. These emerging evolutions includes economy globalization, individualization of needs, capital dynamization, generating high requirements concerning investment efficiency and high versatility of the small companies. At the time, the companies responses to these changes are based on the idea of extending some of the architectural characteristics of the classic manufacturing system to become more reconfigurable. Whereas Dedicated Manufacturing Systems (DMSs) have been designed to produce a specific part and Flexible Manufacturing Systems (FMSs) are

designed to accommodate a large variety of parts even though the parts are not specified at the system design stage, the Reconfigurable Machine Tools (RMTs) combine the advantages of DMSs and FMSs providing an suitable solution [1][2]. These machine tools are designed to be adapted for the mixed products and variable volume demands. The reconfigurable machine is conceived to be build

using standard and inter-operable components, including “plug-and-play” hardware modules and universal fixtures and tools assembled into arbitrary architecture with needed degrees of freedom.. The issues involved in the reconfiguration process are represented by:

- hardware modules reconfiguration;

- software reconfiguration (both programming and control).

The modeling algorithms of the reconfigurable machine kinematics need to be developed. These algorithms are the basis for the control and simulation of reconfigurable machine tool. By simulation of the hardware and control architecture, it is assured the optimal configuration for the new reconfigured machine.

The concepts of the control paradigms, such as holonic manufacturing, bionic manufacturing [2], fractal companies [1], are proposed for the next-generation manufacturing systems. So far that concern the control concept, it was proposed a software architecture based on a combination of object-oriented models and executable formal specifications [13]. As the authors present, in its proposed architecture the machine tool control software is composed of a set of reusable software components. Each component is modeled using a set of event-based external interfaces, a control logic driver for execution of behavioral specifications, and a set of service protocols for platform adaptation. The entire software behaviour can be viewed as an integration of behaviors of components.

In response to such challenges, various efforts have been made, such as Open Modular Architecture Controllers (OMAC)[11], Open System Architecture for Controls within Automation Systems (OSACA) [12], Open System Environment for Controllers (OSEC), Hierarchical Open Architecture Multi-processor for CNC (HOAM-CNC), Open Architecture Controller (UMOAC) etc. The common approach in these researches is the adoption of an open, modular architecture to promote interoperability [13].

Traditionally, CAM has been considered as an NC programming tool used to generate CNC program (commonly G-code) to drive numerical controlled machine tools. Most of current numerical control systems adopt a architecture as described in Fig.1. A computer system, which is usually a general-purposed personal computer (PC) or another kind of a computer, is chosen as the NC core system platform. Human interface software includes functions such as NC code editing and decoding. Functions such as interpolation and control, cutter radius compensation, general I/O or logic control, servo control, etc., are implemented in several controllers (such as PLC – Programmable Logic Controller). Consequently, the controllers are managing commands towards variators to control motors and to read data from

sensors.

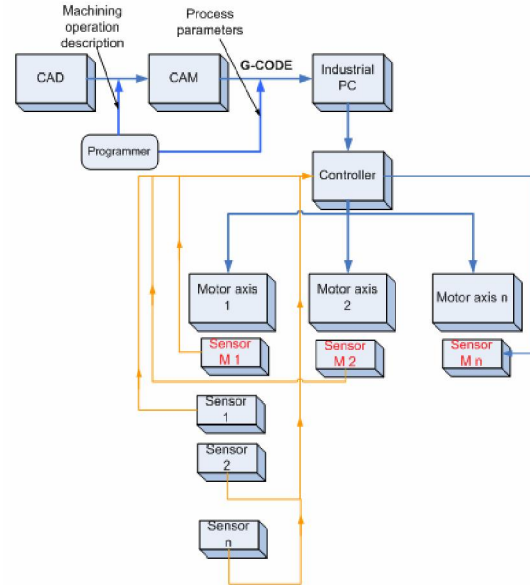


Fig.1 Present CNC control architecture

Hardware reconfiguration means the building of a new machine using the hardware modules to process a new part-family. It is a must have to develop architectures and techniques concerning software reconfigurability to provide short ramp-up time.

The issue of reconfiguring the machine in a new architecture involves great challenges so far that concern the control and programming. The time needed for reconfiguring the control needs to be as limited as possible, otherwise the advantages of the RMT concept will vanish.

The nowadays CAD/CAM system are inappropriate for the concept of RMT. Also, the actual common G-code language for CNC programming is not suitable for programming RMT.

Several disadvantages as long path addressing, ambiguous semantics in some cases, vendor-specific extensions, difficulty of the in-process changes, use of specific post-processors, are just a few to note.

In our previous works [15][16] we proposed a new control and hardware architecture to satisfy reconfigurability requirements. The objective of this paper is to develop a high level language to describe the hardware reconfiguration, and secondly to describe the machine workcycle, specific for a given part.

The language will be used to build the two technological documents namely i) machine-program, concerning machine reconfiguration phase and ii) part-program, concerning the programming of the machine to process a specific part.

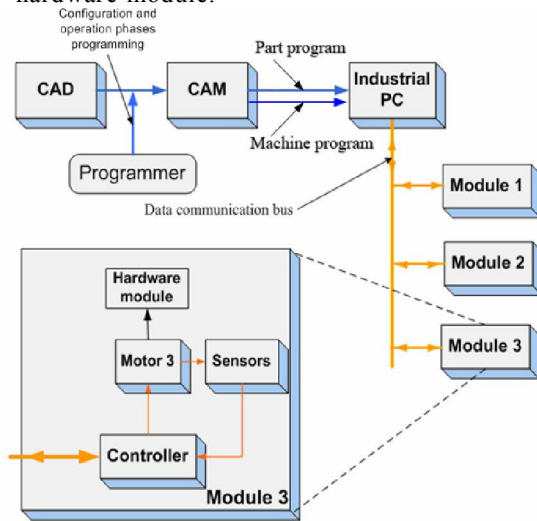


The remainder of the paper is organized as it follows. In Section 2 it is compared the traditional and the new proposed control and hardware architecture. In Section 3 it is presented the proposed programming language

Finally section 4 gives conclusions of this investigation.

## 2. The new control and hardware architecture to which the proposed language is dedicated.

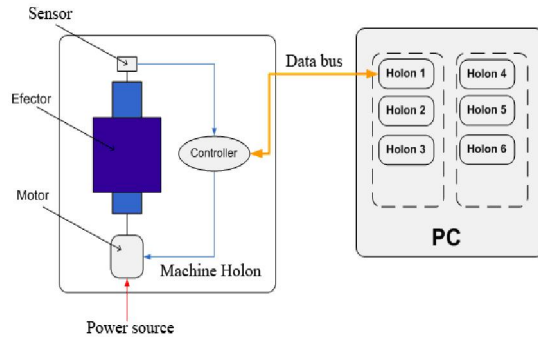
According to our approach a bus is handling communication for all modules [ Fig.3]. Also, compared to today's fieldbus architecture, the hardware modules have close-loops control represented by integrated controller able to communicate with industrial computer. The information sent to hardware module is represented by the required position of the hardware module only. Moreover, if a hardware module has specific sensors besides position control of its movement, this is handled by the integrated controller on the hardware module.



*Fig. 2. The proposed control architecture*

Hardware modules, as seen in Fig.3, are composed of efector, sensors and motor, which are controlled by the controller embedded on

the module. The controller is controlling the hardware module only. Compared with nowadays CNC architecture, where the PLC controller is handling simultaneously motors control and different sensors in the system, the embedded controller is handling only the hardware module. This controller is communicating with the PC using a common bus for all hardware modules. The PC is running several independent operating system processes that are controlling the hardware modules by communicating to embedded controller.



*Fig. 3. Generic holon architecture*

Compared to nowadays CAM architecture, the proposed adaptive-CAM (A-CAM) is not providing source code (G-code) to be interpreted and executed by machine, but an information package to describe the machine configuration and operation phases. Whereas present CAD/CAM software outputs source code describing geometric path, and none or few information concerning machining parameters (such as federate), our A-CAM architecture is providing the parametric algorithm of control variables online scheduling.

This algorithm is run in RSU (Reactive Scheduling Unit) [Fig.4]. Whereas in the process design phase the algorithm is run with nominal values of its parameters algorithm constants, on the machine is running with updated values of algorithm parameters.

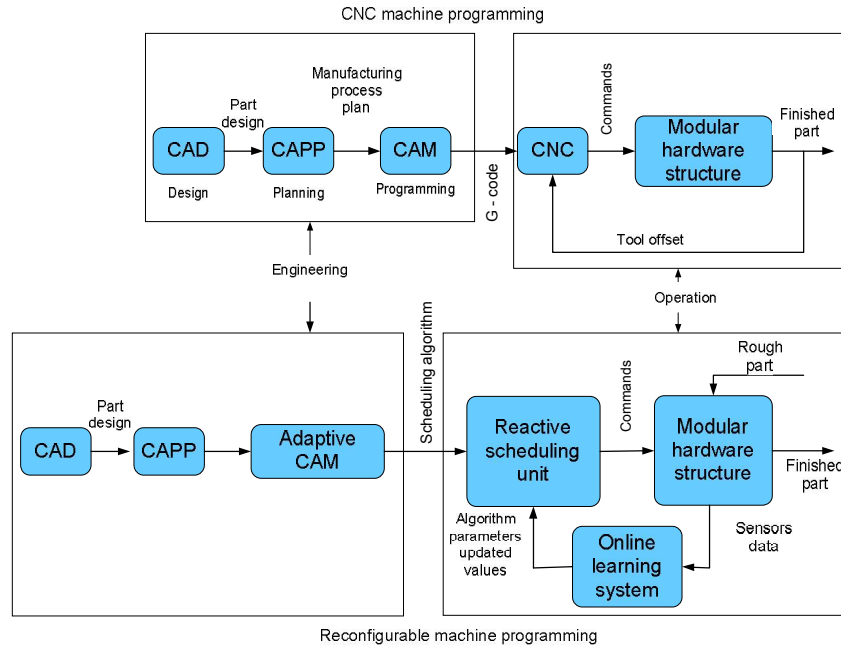


Fig. 4. The proposed versus present CAPP/CAD/CAM/CNC architecture

### 3. The proposed programming language

Machine programming according to the new view is concerning of two distinctive phases of machine existence. Corresponding with the building the new machine phase using the hardware modules, in order to process a part family; it is the machine-program.

Similarly, corresponding to part processing phase, it is the part-program. As described in Fig.5 both programs are developed in a visual environment allowing easy programming.

Using solid model in a 3D virtual environment the programmer builds using different modules the kinematic model of the machine (machine-program) and then, after a virtual machine is build, the programmer describe the trajectories to process the part (part-program). In order to build the part-program the programmer describe each part of the trajectory with the some technical requirements (called task according to our approach) and virtually move the machine parts to execute each task. This way, it is tested collision issues and the part is virtually processed.

The hardware configuration unit (Fig. 5) is the software module to be used for machine-program developing, whereas software product running unit is the software module used to develop part-program.

#### Machine program

Data processing algorithm to build machine-program is composed of several phases to be performed by programmer as described below:

- 1) Imports part CAD model to be processed.
- 2) Divide tool trajectory in several parts. According to the proposed approach these parts are the tasks to be accomplished.
- 3) Imports different hardware CAD models and tries different configurations by simulating trajectories implies in part-processing.
- 4) Choose those modules that allow every task accomplishment.

Machine-program comprises of several information sets ( Fig. 6 ) as it follows:

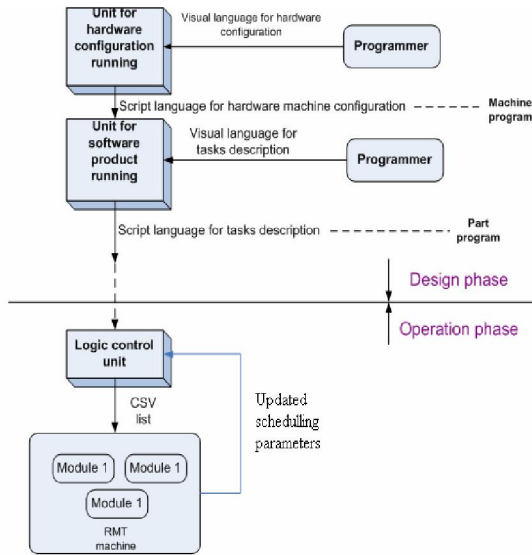


Fig. 5 Machine – program and part program

i) *script program*, which is generated automatically by visual programming environment used by programmer to simulate and chose machine hardware configuration. Also to the scripting program is included:

ii) *digital image of machine hardware configuration*, representing information concerning fixturing information for an easy understanding by operators assembling new machine.

iii) *module list* to be used and their characteristics. Building the part-program implies knowing the geometric and kinematics characteristics of every module (maximum feed rate, maximum momentum of the motor). Bellow is given an example for the script image to be generated in the visual environment:

```
WorldReference(X,Y,Z)
Set.Module23.At(X,Y);
Set.Module45.On.Module23.At(X,Y);
Set.Module98.At(X,Y);
Set.Module45.On.Module98.At(X,Y).Angle(FX
).CW
```

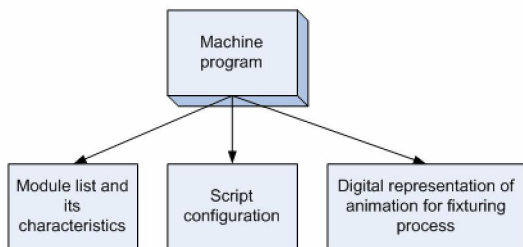


Fig. 6 The machine-program

*Part-program*

After building the machine-program it is necessary to build part-program which consists in the following steps ( Fig.9):

- 1) Imports machine-program, describing the current machine configuration.
- 2) Imports CAD model of the blank and divide the trajectory in several parts, defining in this manner the tasks.
- 3) Inputs nominal CAD of finished part
- 4) Inputs for each task the requirements imposed to the finished part for every surface that is describing each task (requirements such as roughness and tolerance).
- 5) Inputs blank material characteristics.
- 6) Imports CAD model of the tool.
- 7) Tests and simulates process, considering blank profile nominal CAD model (during processing, the blank is measured on machine). This testing aims to identify successive tasks to avoid collision issue and to find suitable tools for the current processing.
- 8) It is build automatically the information package representing part-program.

The programmer is not inputting the machining parameters describing the process, but only the successive tasks and the requirements imposed to the finished part. The some, he doesn't describe the task in a scripting manner, but describes it in a visual environment, by placing in a 3D environment the tools in the machine current hardware configuration, in order to satisfy collision conditions. Consequently he fills in for every task defined the requirements imposed for each surface.

Technological document called part-program is composed of four digital information. (Fig.7): CAD file data, script operation image, control algorithm for each task, visual representation of fixturing and of the processing.

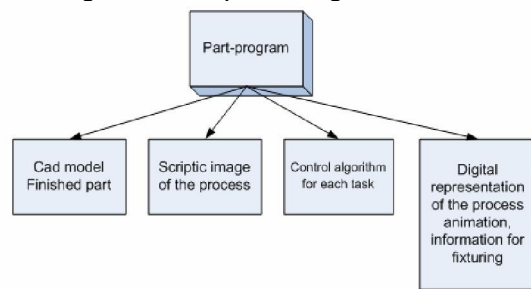


Fig. 7 The part- program

The script image is automatically generated in the visual environment, and for each task it is attached to control software module, responsible for each task control. The machining parameters for the operation are computed in the control module software.

As shown bellow, the script image comprises information concerning the task successive definitions. For instance, in the example given it is defined Task 1, as the trajectory between point P1 and P2, with the requirements represented by the requirement Rz and tolerance defined by Ts and Ti range. It is also stated characteristic material MatCh and that of the tool Tool1. Also, it is stated auxiliary actions such as fast displacement, starting the coolant, etc.

```
Define P1(X,Y,Z)
Define P2(X,Y,Z)
Define P3(X,Y,Z);
FastPos(X,Y,Z)
ChangeTool(Tool1)
StartCoolant
Task1(P1,P2)(Rz,Ts,Ti,MatCh,Tool1)
Task2(P2,P3)(Rz,Ts,Ti,MatCh,Tool1)
Stopcoolant
FastPos(X,Y,Z)
Changetool(Tool2)
Task1(P3,P4)(Rz,Ts,Ti,MatCh,Tool1).
```

#### 4. Conclusions

A new programming approach is proposed in this paper to simplify RMT system development and enhance development ability. To implement this approach, a new control architecture is proposed. This architecture is based on the idea of independent hardware modules, with close loop control feature, controlled directly by a PC.

The programming approach is considering two technological documents: i) machine-program, concerning the machine reconfiguration phase and ii) part-program, concerning the programming of the machine to process a specific part. A visual language architecture is proposed for building the technological documents, allowing a fast programming and an accurate control.

The programming approach proposed can be implemented successfully to the common CNC to offer fast programming for part-program.

The new approach proposed for programming RMT presents several advantages such as: a) the system is universal, intelligent, autonomous and has the ability to adapt to changing , b) it can be used also for programming of other CNC machining, c) it detects collisions of cutting tool, d) it provide the capability to rapid programming at each new machine configuration and offers the capability to a better process control.

The research team is currently working to develop the proposed programming approach

and the initial results show the architecture is viable.

#### Acknowledgement

The authors gratefully acknowledge the financial support of the Romanian Ministry of Education and Research through grant PN\_II\_ID\_653/2007.

#### References

1. **Cho Myeong-Woo, Kim Gun-Hee, Seo Tae-Il, Hong Yeon-Chan ,Cheng H. Harry**, *Integrated machining error compensation method using OMM data and modified PNN algorithm*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 46 (2006) 1417–1427
- 1 **R. Galan, J. Racero, I. Eguia, J.M. Garcia**, A systematic approach for product families formation in Reconfigurable Manufacturing Systems, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 23, 2007, 489–502
- 2 **Jaspreet Dhupia, Bartosz Powalka, Reuven Katz, A. Galip Ulsoy**, Dynamics of the arch-type reconfigurable machine tool, International Journal of Machine Tools & Manufacture 47, 2007, 326–334
- 3 **X.W. Xu, Q. He**, Striving for a totalintegration of CAD, CAPP, CAM and CNC, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2003
- 4 **Jeong Hoon Ko, Won Soo Yun, Dong-Woo Cho**, Off-line feed rate scheduling using virtual CNC based on an evaluation of cutting performance, Computer-Aided Design 33, 2003, 383-393
- 5 **Stanislav Makhanov**, Optimization and correction of the tool path of the five-axis milling machine Part 1. Spatial optimization, Mathematics and Computers in Simulation 75, 2007, 210-230
- 6 **Stanislav Makhanov**, Optimization and correction of the tool path of the five-axis milling machine Part 2: Rotations and setup, Mathematics and Computers in Simulation 75, 2007, 231-250
- 7 **B.S. Soa, Y.H. Jung b., T.R. Kurfess c, S.M. Hwang**, 5-Axis machining speed enhancement by step length optimization, Journal of Materials Processing Technology 187–188 75, 2007, 2-5
- 8 **M. Gallo, G.Guizzi, V. Zoppoli**, A methodological approach to develop an integrated simulation system in manufacturing processes, 6th WSEAS International Conference on System and Simulation and Engineering, 2007
- 9 **M. Paolucci, R. Revetria, F. Tonelli**, An Agent-based System for Sales and Operations Planning in Manufacturing Supply Chains, 6th WSEAS International Conference on System and Simulation and Engineering, 2007
- 10 **M. Yurtseven**, Design and performance analysis of a linear quadratic Gaussian controller in a manufacturing process, 6th WSEAS International Conference on Circuit, System, Electronic, Control and Signal Processing, 2007
- 11 **OMAC API Work Group** OMAC API set, <http://www.isd.mel.nist.gov/projects/omacapi/>, 1999
- 12 **OSACA** Open system architecture controls within automation systems. Final report. <http://www.osaca.org/>, 1996
- 13 **Wang S, Shin KG** Constructing reconfigurable software for machine control systems. IEEE Trans Robot Autom 18(4):475–486, 2002
- 14 **Wei Li & Yadong Liu & Kazuo Yamazaki & Makoto Fujisima & Masahiko Mori**, The design of a NURBS pre-interpolator for five-axis machining, Int J Adv Manuf Technol, 2008
- 15 **Epureanu A., Marin F.B., Marinescu V., Banu M., Constantin I.**, Manufacturing machines – a holonic approach, Proceeding ACMOS 08 ISBN:978-960-6766-63-3, ISSN 1790-5117, 2008.
- 16 **Epureanu A., Marin F.B., Marinescu V., Banu M., Constantin I.**, Optimal feedrate scheduling for a reconfigurable lathe, Proceeding ACMOS 08 ISBN:978-960-6766-63-3, ISSN 1790-5117, 2008.

### **Rezumat**

*Lucrarea propune o noua abordare in ceea ce priveste programarea RMT-urilor(Reconfigurable Manufacturing Tool). Abordarea se bazeaza pe o noua arhitectura de control caracterizata printr-un inalt grad de reconfigurabilitate. Este propusa ideea a doua documente tehnologice i) programul-masina, care corespunde fazei de reconfigurare si ii) programul-piesa care corespunde fazei de procesare a unui semifabricat. Doua limbaje vizuale de nivel inalt sunt propuse pentru a genera cele doua documente, permitand o programarea rapida si un control precis al procesului.*

### **Résumé**

Ce document propose une nouvelle approche pour l'issue de programmation de RMT (outil Reconfigurable de fabrication). L'approche est basée sur une nouvelle architecture de commande caractérisée par la reconfigurabilité élevée. On lui propose l'idée du machine-programme technologique de deux documents i), au sujet de la phase de reconfiguration de machine et ii) du partie-programme, au sujet de la programmation de la machine de traiter une cloison spécifique. On propose l'architecture de deux langues visuelle pour les deux documents technologiques, permettant une programmation rapide et une commande précise..

## Inventii create si inregistrate

### 1. Metoda de conducere numerica a masinilor unelte reconfigurabile

#### Rezumat

Inventia se refera la o metoda de conducere dimensionala al proceselor de obtinere a pieselor din tabla subtire prin deformare plastica la care principala sursa de erori dimensionale este variatia revenirii elastice, ca urmare a faptului ca semifabricatele au variatii dimensionale, precum si variatii ale caracteristicilor materialului si ale conditiilor de frecare.

Metoda de conducere dimnesionala, conform inventiei, consta in impartirea cursei poansonului in doua zone, masurarea fortei de deformare intr-un numar de puncte considerate de referinta si aflate in prima zona a cursei, zona in care forta de retinere evolueaza dupa o lege considerata de referinta, compararea valorilor masurate cu valorile nominale si, pe baza diferentei constatate, calculul si comanda modificarii necesare a fortei de retinere, intr-un numar de puncte considerate de referinta si aflate in cea de-a doua zona a cursei poansonului, astfel incat nivelul revenirii elastice reale la semifabricatul curent sa corespunda cu nivelul la care aceasta a fost compensata. In scopul calculului modificarii necesare a fortei de retinere, se construiesc o baza de date, care sa cuprinda valorile in punctele de referinta ale fortei de deformare si ale fortei de retinere a semifabricatului, precum si valorile parametrilor dimensionali ai revenirii elastice, toate corespunzand cazurilor simulate in cadrul programului de simulare, la care se adauga cele corespunzatoare exemplarelor din lot, obtinute pana in momentul curent, apoi, prin procesarea datelor continute in baza de date se construiesc modelul matematic care, pentru cazurile curente, poate fi liniar.

#### Metoda de conducere numerica a masinilor unelte reconfigurabile

Inventia se refera la o metoda de conducere numerica a acelor masini unelte reconfigurabile care sunt destinate fabricatiei in serie mica a unor loturi de produse variate ca structura si sunt alcatuite din module independente ce se asambleaza in acord cu operatia pe care masina unealta trebuie sa o execute. Metoda poate fi aplicata si la masinile unelte conventionale destinate fabricatiei in serii mai mari.

O metoda cunoscuta de conducere numerica a masinilor unelte reconfigurabile, este aceea bazata pe folosirea unui interpretor reconfigurabil care este setat in acord cu structura hardware reconfigurata a masinii unelte, limbajul programului piesa fiind cel conventional (ISO-G code). Prin informatia continuta in programul piesa se descriu succesiv toate fazele ce compun ciclul de lucru al masinii si se stabilesc valorile tuturor parametrilor controlabilii procesului de prelucrare. In esenta, informatia precizeaza ce trebuie sa execute masina unealta pentru ca produsul rezultat sa corespunda toleranțelor impuse. Aceasta informatie corespunde cazului in care toate semifabricatele folosite pentru fabricatia unui lot de piese sunt identice iar relatia dintre caracteristicile semifabricatului si caracteristicile produsului finit este perfect cunoscuta, in caz contrar variatiile caracteristicilor semifabricatelor folosite determina variatii corespunzatoare ale caracteristicilor produsului finit.

Aceasta metoda are urmatoarele dezavantaje:

- reconfigurarea sistemului de comanda numerica a masinii dureaza mult timp si de aceea utilizarea masinii in cazul unei fabricatii care se modifica frecvent este economic nerationala;
- programatorul trebuie sa cunoasca bine comportarea masinii unelte pentru a putea sa inscrie in program valorile optime ale parametrilor procesului;

- daca la semifabricatele folosite pentru executarea pieselor valorile caracteristicilor dimensionale si de material sunt diferite fata de valorile lor nominale si sunt variabile in timp si spatiu, atunci acordarea parametrilor procesului la valorile reale ale caracteristicilor semifabricatului se face de catre operator si cu intarziere, ceea ce afecteaza nivelul calitativ al produsului rezultat;
- pe parcursul executarii unei fraze de comanda nu se poate programa variatia parametrilor procesului in acord cu caracteristicile dimensionale si de material ale semifabricatului curent, ceea ce face ca regimul de lucru sa fie constant si sa se afle la un nivel suficient de scazut incat sa fie satisfacute toate exigentele impuse de capabilitatile masinii, exigente care variaza in cursul executarii respectivei fraze de comanda.

Problema tehnica pe care o rezolva inventia consta in furnizarea unei metode de conducere numerica a masinilor unelte reconfigurabile, metoda care, in cadrul unui lot de piese, asigura un nivel ridicat al preciziei dimensionale, chiar atunci cand caracteristicile dimensionale si de material ale semifabricatelor sunt diferite de la un semifabricat la altul.

Metoda de conducere dimensionala a proceselor de obtinere a pieselor din tabla subtire prin deformare plastica, potrivit inventiei, inlatura dezavantajele de mai sus prin aceea ca, in scopul obtinerii la fiecare semifabricat din lotul de piese a unei reveniri elastice egala cu valoarea compensata, chiar atunci cand caracteristicile dimensionale si de material, precum si fenomenele de frecare ce apar in cursul procesului de deformare, difera de la un semifabricat la altul, se imparte cursa poansonului in doua zone, apoi, in prima zona a cursei poansonului, numita zona de identificare, zona in care forta de retinere evolueaza dupa o lege considerata de referinta si folosita in etapa de simulare a procesului de deformare si de compensare a revenirii elastice prin modificarea formei si dimensiunilor matritei si poansonului, se masoara forta de deformare intr-un numar de puncte considerate de referinta si se compara valorile masurate ale fortei de deformare cu valorile de referinta, adica cele corespunzatoare cazului de referinta, pentru care a fost compensata revenirea elastica, si, pe baza diferentei constatate, se calculeaza modificarea necesara a fortei de retinere, intr-un numar de puncte considerate de referinta si aflate in cea de-a doua zona a cursei poansonului, numita zona de control, astfel incat nivelul revenirii elastice reale, la semifabricatul curent, sa corespunda cu nivelul la care aceasta a fost compensata, dupa care se comanda sistemului de retinere a semifabricatului, in cea de-a doua zona a cursei poansonului, adica zona de control, o forta de retinere, ce este modificata corespunzator cu rezultatul calculului si prin aceea ca, in scopul calculului modificarii necesare a fortei de retinere, in cea de-a doua zona a cursei poansonului, adica zona de control, astfel incat nivelul revenirii elastice reale la respectivul semifabricat sa corespunda cu nivelul la care aceasta a fost compensata, se construiesc o baza de date, care sa cuprinda valorile in punctele de referinta ale fortei de deformare si ale fortei de retinere a semifabricatului, precum si valorile parametrilor dimensionali ai revenirii elastice, atat cele corespunzatoare cazurilor simulate in cadrul programului de simulare, cat si cele corespunzatoare exemplarelor din lot, obtinute pana in momentul curent, apoi, prin procesarea datelor continute in baza de date, se construiesc modelul matematic, care, pentru cazurile curente, unde forma, dimensiunile, caracteristicile de suprafata si de material ale semifabricatului variaza in limite restranse, poate fi liniar si care descrie legatura dintre valorile fortei de deformare in punctele de referinta din zona de identificare a cursei poansonului si valorile fortei de retinere a semifabricatului corespunzatoare punctelor de referinta din zona de control a cursei poansonului, pe de o parte, si, pe de alta parte, valorile revenirii elastice in punctele caracteristice ale semifabricatului.

Inventia prezinta urmatoarele avantaje:

- reducerea erorilor dimensionale ale pieselor obtinute din table subtiri prin deformare plastica la rece;

- posibilitatea de a folosi semifabricate la care caracteristicile dimensionale de suprafata si de material pot fluctua in limite largi.

Inventia este in continuare exemplificata in legatura cu fig. 1...4, unde:

- fig. 1 reprezinta relatia dintre forta de retinere si deplasarea poansonului corespunzatoare cazului in care apare ruperea materialului, zona a, cazului in care apare cutarea materialului, zona b, si cazului in care cele doua fenomene nu apar, zona c.

-fig. 2 reprezinta variatia fortei de deformare  $P_0$  si a fortei de retinere a semifabricatului  $F_0$ , in lungul cursei  $L$  a poansonului, pentru semifabricatul de referinta, a carei revenire elastica a fost compensata prin modificarea geometriei poansonului si matritei, si pentru unul dintre semifabricatele destinate prelucrarii unui lot de piese, la care variatia fortei de deformare  $P$  si a fortei de retinere a semifabricatului  $F$  in lungul cursei  $L$  a poansonului difera de valorile corespunzatoare semifabricatului de referinta.

-fig.3 reprezinta schema de evaluare a revenirii elastice corespunzatoare unui exemplar din lotul de piese, unde  $a$  este forma nominala a piesei finite,  $b$  este forma reala a piesei finite, (1), (2), (3) si (4) reprezinta punctele caracteristice si senzorii folositi pentru evaluarea revenirii elastice in aceste puncte iar  $d_3$  este valoarea revenirii elastice corespunzatoare punctului caracteristic (3).

-fig. 4 reprezinta structura datelor rezultate din monitorizarea on-line a procesului de obtinere a pieselor din table subtiri prin deformare plastica, date ce sunt folosite pentru constructia modelului matematic, care descrie legatura dintre valorile fortei de deformare in punctele de referinta din zona de identificare a cursei poansonului si valorile fortei de retinere a semifabricatului corespunzatoare punctelor de referinta din zona de control al cursei poansonului, pe de o parte, si, pe de alta parte, valorile revenirii elastice in punctele caracteristice ale semifabricatului.

Metoda de conducere dimensionala a proceselor de obtinere a pieselor din tabla subtire prin deformare plastica presupune parcurgerea urmatoarelor pasi:

#### Pasul 1

Dandu-se valorile nominale ale dimensiunilor si caracteristicilor de material ale semifabricatului, precum si forma, dimensiunile si tolerantele piesei finite, se deruleaza un program de simulari numerice ale procesului de obtinere a piesei prin deformare plastica, cu diferite legi de variatie a fortei de retinere a materialului in lungul cursei poansonului, folosind in acest scop un produs software de simulare, de exemplu bazat pe metoda elementelor finite.

#### Pasul 2

Dintre cazurile simulate, se adopta unul considerat de referinta. Pentru exemplificare, in fig.2 cazul de referinta este acela in care forma, dimensiunile si caracteristicile de suprafata si de material ale semifabricatului au valorile corespunzatoare mijlocului campurilor lor de toleranta, forta de retinere a semifabricatului evolueaza dupa diagrama  $F_0$  iar forta de deformare evolueaza dupa diagrama  $P_0$ , in lungul cursei  $L$  a poansonului. Revenirea elastica ce apare la simularea cazului considerat ca referinta este cunoscuta, in urma simularii, si compensata, prin modificarea corespunzatoare a formei si dimensiunilor matritei si poansonului. Daca procesul de obtinere a pieselor din tabla subtire, prin deformare plastica, ar decurge in perfecta conformitate cu cazul considerat ca referinta, adica daca forma, dimensiunile, caracteristicile de suprafata si de material ale semifabricatului ar avea valorile considerate la simularea cazului de referinta, si daca forta de retinere ar fi setata sa evolueze dupa diagrama  $F_0$ , si in fine, daca erorile de simulare, precum si deviatiile dimensionale ale poansonului si matritei, datorate executiei acestora sau uzurii din exploatare, ar fi nule, atunci forta de deformare ar evolua dupa diagrama  $P_0$ , revenirea elastica ar fi la nivelul rezultatelor obtinute din simularea cazului de referinta iar dimensiunile piesei obtinute nu ar fi afectate de



revenirea elastica aparuta in urma procesului de deformare plastica. Pentru exemplificare in fig. 4, cazul de referinta este cazul 5.

#### Pasul 3

Se imparte cursa poansonului in doua zone, iar in fiecare zona se stabilesc puncte de referinta, asa cum se arata in fig.2, unde cele doua zone sunt urmatoarele:

- zona a, in care forta de retinere a semifabricatului este setata sa evolueze in conformitate cu diagrama F0, iar forta de deformare, care evolueaza dupa diagrama P de-a lungul cursei poansonului, este masurata intr-un numar de puncte de referinta. In fig. 2 se prezinta cazul procesului de deformare a semifabricatului curent, la care forta de retinere in punctele de referinta 1 si 2 este setata la nivelul valorilor de referinta F01 si F02 iar forta de deformare este masurata in aceleasi puncte de referinta 1 si 2 si are valorile P1 si P2, care sunt diferite de valorile P01 si P02 corespunzatoare cazului de referinta, ca urmare a faptului ca, la semifabricatul curent, forma, dimensiunile, caracteristicile de suprafata si de material difera de valorile lor corespunzatoare cazului de referinta.
- zona b, in care forta de retinere este programata sa evolueze cu deplasarea poansonului, dupa o alta lege decat cea corespunzatoare cazului de referinta, lege astfel aleasa incat revenirea elastica sa ramana la nivelul cazului de referinta, desi forma, dimensiunile, caracteristicile de suprafata si de material ale semifabricatului curent difera de valorile lor nominale. In fig.2 se prezinta cazul in care, in punctele de referinta 3, 4 si 5, forta de retinere corespunzatoare cazului de referinta variaza liniar, trecand prin valorile F03, F04, F05, iar forta de retinere corespunzatoare semifabricatului curent variaza liniar, trecand prin valorile F3, F4 si F5, astfel setate incat revenirea elastica corespunzatoare semifabricatului curent sa aiba valorile corespunzatoare cazului de referinta.

#### Pasul 4

Se stabilesc parametrii dimensionali ai revenirii elastice, tinand cont de cotele si tolerantele piesei finite. In fig.3 se prezinta cazul in care parametrii dimensionali ai revenirii elastice sunt deviatiiile formei piesei reale in raport cu forma nominala a acesteia, masurate in punctele caracteristice 1, 2, 3 si 4.

#### Pasul 5

Se construiesc o baza de date, care sa cuprinda valorile in punctele de referinta ale fortei de deformare si ale fortei de retinere a semifabricatului, precum si valorile parametrilor dimensionali ai revenirii elastice, atat cele corespunzatoare cazurilor simulate in cadrul programului de simulare cat si cele corespunzatoare exemplarelor din lot, obtinute pana in momentul curent. Prin procesarea datelor continute in baza de date se construiesc modelul matematic, care descrie legatura dintre valorile fortei de deformare in punctele de referinta din zona de identificare a cursei poansonului si valorile fortei de retinere a semifabricatului corespunzatoare punctelor de referinta din zona de control a cursei poansonului, pe de o parte, si, pe de alta parte, valorile revenirii elastice in punctele caracteristice ale semifabricatului.

In cazul prezentat in fig.2, modelul matematic este folosit pentru a stabili legatura dintre valorile F3, F4 si F5 ale fortei de retinere a semifabricatului si valorile P1 si P2 ale fortei de deformare, pentru care revenirea elastica in cele 4 puncte caracteristice se afla la nivelul cazului de referinta. Tipul modelului matematic folosit nu este impus, dar pentru cazurile curente, unde forma, dimensiunile, caracteristicile de suprafata si material ale semifabricatului variaza in limite restranse, se recomanda folosirea unui model liniar de ordinul 1. Pentru alte cazuri, ordinul poate fi majorat.

#### Pasul 6

Modelul matematic construit este folosit pentru controlul procesului de prelucrare a exemplarului curent.

#### Pasul 7

Dupa ce au fost prelucrate primele 10-15 exemplare din lot si s-au acumulat suficient de multe date in baza de date, se elimina datele corespunzatoare cazurilor simulate, urmand ca procesul sa fie

condus pe baza datelor obtinute din monitorizarea procesului in cursul prelucrarii exemplarelor ce alcatuiesc lotul.

### Revendicari

1. Metoda de conducere dimensionala a proceselor de obtinere a pieselor din tabla subtire prin deformare plastica la care principala sursa de erori dimensionale este variatia revenirii elastice, caracterizata prin aceea ca, in scopul obtinerii la fiecare semifabricat din lotul de piese a unei reveniri elastice egala cu valoarea compensata, chiar atunci cand caracteristicile dimensionale si de material, precum si fenomenele de frecare ce apar in cursul procesului de deformare, difera de la un semifabricat la altul, se imparte cursa poansonului in doua zone, apoi in prima zona a cursei poansonului, numita zona de identificare, zona in care forta de retinere evolueaza dupa o lege considerata de referinta si folosita in etapa de simulare a procesului de deformare si de compensare a revenirii elastice prin modificarea formei si dimensiunilor matritei si poansonului, se masoara forta de deformare intr-un numar de puncte considerate de referinta si se compara valorile masurate ale fortei de deformare cu valorile de referinta, adica cele corespunzatoare cazului de referinta, pentru care a fost compensata revenirea elastica, si, pe baza diferentei constatate, se calculeaza modificarea necesara a fortei de retinere, intr-un numar de puncte, considerate de referinta si aflate in cea de-a doua zona a cursei poansonului, numita zona de control, astfel incat nivelul revenirii elastice reale la semifabricatul curent sa corespunda cu nivelul la care aceasta a fost compensata, dupa care se comanda sistemului de retinere a semifabricatului, in cea de-a doua zona a cursei poansonului, adica zona de control, o forta de retinere, ce este modificata corespunzator cu rezultatul calculului.
2. Metoda de conducere dimensionala a proceselor de obtinere a pieselor din tabla subtire prin deformare plastica la care principala sursa de erori dimensionale este variatia revenirii elastice conform revendicarii 1, caracterizata prin aceea ca, in scopul calculului modificarii necesare a fortei de retinere, in cea de-a doua zona a cursei poansonului, adica zona de control, astfel incat nivelul revenirii elastice reale la respectivul semifabricat sa corespunda cu nivelul la care aceasta a fost compensata, se construiesc o baza de date care sa cuprinda valorile in punctele de referinta ale fortei de deformare si ale fortei de retinere a semifabricatului, precum si valorile parametrilor dimensionali ai revenirii elastice, atat cele corespunzatoare cazurilor simulate in cadrul programului de simulare, cat si cele corespunzatoare exemplarelor din lot, obtinute pana in momentul curent, apoi, prin procesarea datelor continute in baza de date, se construiesc modelul matematic care, pentru cazurile curente, unde forma, dimensiunile, caracteristicile de suprafata si de material ale semifabricatului variaza in limite restranse, poate fi liniar si care descrie legatura dintre valorile fortei de deformare in punctele de referinta din zona de identificare a cursei poansonului si valorile fortei de retinere a semifabricatului corespunzatoare punctelor de referinta din zona de control a cursei poansonului, pe de o parte, si, pe de alta parte, valorile revenirii elastice in punctele caracteristice ale semifabricatului.



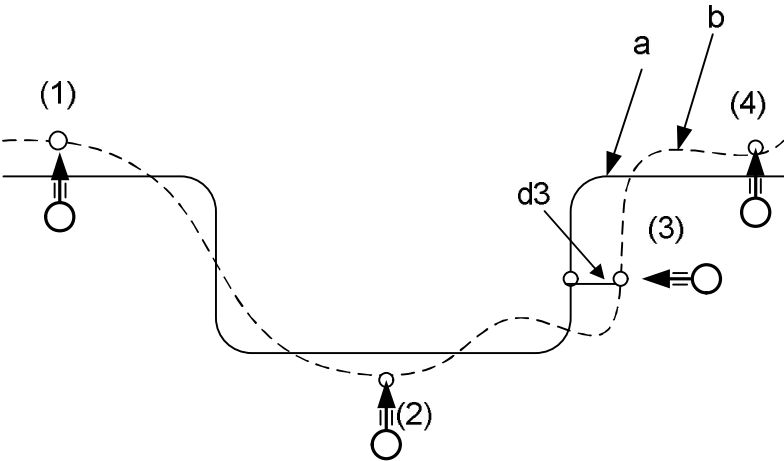


Figura 3

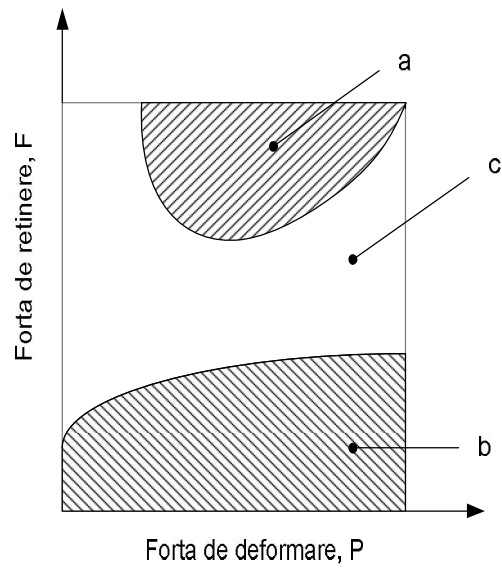


Figura 1

Nr. curent al semifabricatului	Procesele de deformare corespunzatoare semifabricatelor simulate								Procese de deformare corespunzatoare semifabricatelor reale ce compun lotul							
	1	2	3	4	<u>5</u>	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	<u>16</u>

Forța de  
deformare în  
punctele de  
referință  
Forța de  
reținere în  
punctele de  
referință  
Revenirea  
elastica în  
punctele  
caracteristice



Figura 4

- [1] Lin Zhong-qin, Wang Wu-rong, Chen Guan-long, A new strategy to optimize variable blank holder force towards improving the forming limits of aluminum sheet metal forming, *Journal of Materials Processing Technology* 183 (2007) 339–346.
- [2] Hiroshi Koyama, Robert H. Wagoner, Ken-ichi Manabe, Blank holding force control in panel stamping process using a database and FEM-assisted intelligent press control system, *Journal of Materials Processing Technology* 152 (2004) 190–196.
- [3] W. R. Wang , G. L. Chen , Z. Q. Lin , S. H. Li, Determination of optimal blank holder force trajectories for segmented binders of step rectangle box using PID closed-loop FEM simulation, *Int J Adv Manuf Technology* (2007) 32: 1074–1082.
- [4] Yongjun Shi, Yancong Liu, Zhenqiang Yao, and Hong Shen, A study on bending direction of sheet metal in laser forming, *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS* 103, 053101 \_2008.
- [5] Kiyoungh Yi, K. K. Choi ,Nam H. Kim and Mark E. Botkin, Design sensitivity analysis and optimization for minimizing springback of sheet-formed part, *Int. J. Numer. Meth. Engng* 2007; 71:1483–1511.
- [6] Wenjuan Liu , Qiang Liu , Feng Ruana, Zhiyong Liang , Hongyang Qiu , Springback prediction for sheet metal forming based on GA-ANN technology, *Journal of Materials Processing Technology* 187–188 (2007) 227–231.

**CERERE DE BREVET DE INVENTIE**

Nr. referinta solicitant/mandatar	Registratura OSIM (numarul si data primirii):
-----------------------------------	---

Numarul cererii de brevet de inventie	
Data primirii la Registratura Generala a OSIM - R.4(5)	
Data de depozit - R.8(1)	
Data primirii partii lipsa la Registratura Generala a OSIM - R.4(7),(8)	
Data de depozit noua - R.8(1)	
Data primirii cererii de retragere a partii lipsa la Registratura Generala a OSIM - R.4(14)	

Data de depozit atribuita cererii de brevet - R.8(14)	
---	--

<b>1.</b>	<b>Solicitanti</b>	(nume/denumire,
-----		
Universitatea "Dunarea de Jos" din Galati, str. Domneasca, nr.111, cod 800201, Galati		
-----		
-----		
-----		

<b>2.</b> Solicitam în baza art	Legii nr. 64/1991, republicata în temeiul Legii nr. 203/2002, un brevet pentru inventia cu titlul: METODA DE CONDUCERE DIMENSIONALA LA FABRICAREA PIESELOR DIN TABLA SUBTIRE PRIN DEFORMARE PLASTICA
---------------------------------	--

<b>2.1.</b> Referinta la o cerere anterioara (numar, data de depozit, tara/oficiul):
--

<b>3. Declaram ca inventatorii sunt:</b>
--

<input type="checkbox"/> <b>3.1</b> aceiași cu solicitantii (nume, prenume si loc de munca la data creării invenției)
-----
-----
-----

<input checked="" type="checkbox"/> <b>3.2</b> Persoanele din "Declarația privind desemnarea inventatorilor" care se anexează
---

<b>4.</b> Declaram ca inventia contine informatii care au fost clasificate de catre (denumirea, data si nivelul clasificarii):
--

<b>5.</b> Rezumatul se publica împreuna cu figura numarul:
--

<b>6.</b> Prioritati revendicate (stat, data depozit, numar):
---

<b>7.</b> Prioritati interne revendicate (numar cerere, data
--

<b>8.</b> Cererea de brevet este divizionara din cererea (numar, data depozit):
---



90. Solicitantul/solicitantii la data depunerii cererii		
9.1. Publicarea de urgenta a cererii, conform art. 23, alin. 3		<input type="checkbox"/>
9.2. Întocmirea unui raport de documentare, conform art. 24		<input type="checkbox"/>
9.3. Examinarea cererii cu luarea hotarârii în termen de 18 luni de la data de depozit, conform art. 25		<input checked="" type="checkbox"/>
9.4. Mentinerea informatiilor la nivelul de clasificare atribuit, conform regulii 7		<input type="checkbox"/>

11. Adresa solicitantului/mandatarului pentru corespondenta cu OSIM:  
 Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați  
 Str. Domnească 111, 800201, Galați  
 Tel: 0722362606 Fax: 0236461353 E-mail:alexandru.epureanu@ugal.ro

12. Reprezentare prin mandatar autorizat  procura  procura generala nr./data:

13.  
 solicitanți/mandatar:

14. Documente depuse la OSIM de solicitant/mandatar		15. Documente primite la	
14.1. Formular de cerere în 3 exemplare, a ..... file	<input checked="" type="checkbox"/>	în ....exemplare, a ....	<input type="checkbox"/>
14.2. Descriere în 3 exemplare, a ..... file	<input checked="" type="checkbox"/>	în ....exemplare, a ....	<input type="checkbox"/>
14.3. Revendicari în 3 exemplare, a ..... file	<input checked="" type="checkbox"/>	în ....exemplare, a ....	<input type="checkbox"/>
14.4. Desene în 3 exemplare, a .... file	<input checked="" type="checkbox"/>	în ....exemplare, a ....	<input type="checkbox"/>
14.5. Rezumat în 3 exemplare, a .... file	<input checked="" type="checkbox"/>	în ....exemplare, a ....	<input type="checkbox"/>
14.6. Lista de secvențe de nucleotide si/sau aminoacizi	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>
14.6.1. prezentata pe suport hârtie	<input type="checkbox"/>	în ....exemplare, a ....	<input type="checkbox"/>
14.6.2. prezentata pe suport electronic tip .....	<input type="checkbox"/>	tip..... în	<input type="checkbox"/>
14.7. Document privind dreptul la acordarea brevetului	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>
14.8. Document privind desemnarea inventatorilor	<input checked="" type="checkbox"/>	a .... file	<input type="checkbox"/>
14.9. Procura/copie procura generala	<input type="checkbox"/>	a .... file	<input type="checkbox"/>
14.10. Document referitor la plata taxelor	<input type="checkbox"/>	a .... file	<input type="checkbox"/>
14.11. Act privind acordarea reducerii taxelor	<input type="checkbox"/>	a .... file	<input type="checkbox"/>
14.12. Autorizatia privind transmiterea dreptului de prioritate	<input type="checkbox"/>	a .... file	<input type="checkbox"/>
14.13. Act de prioritate	<input type="checkbox"/>	a .... file	<input type="checkbox"/>
14.14. Act referitor la depozitul microorganismului/materialului biologic a ....	<input type="checkbox"/>	a .... file	<input type="checkbox"/>
14.15. Document privind o divulgare a inventiei, conform art.9 din lege a ....	<input type="checkbox"/>	a .... file	<input type="checkbox"/>
14.16. Copie/traducere a cererii anteroare de la rubrica 2.1.	<input type="checkbox"/>	a .... file	<input type="checkbox"/>
14.17. Alte documente	<input type="checkbox"/>	a .... file	<input type="checkbox"/>

OSIM (semnatura, LS)

## Declaratie

**continand desemnarea inventatorilor inventiei cu titlul:  
METODA DE CONDUCERE DIMENSIONALA LA FABRICAREA  
PIESELOR DIN TABLA SUBTIRE PRIN DEFORMARE PLASTICA**

Aceasta declaratie este facuta în conformitate cu prevederile art. 14 alin. 2 si Regulii 20E si trebuie depusa în termen de 18 luni de la data solicitarii examinarii în fond a cererii de brevet de inventie, conform Regulii 20E alin. (11).

**Nume si prenume: Marinescu Vasilică**

**Adresa: str. George Coşbuc, nr. 37, bloc C20, ap. 35, cod800350**

**Locul de munca la data crearii inventiei: Universitatea Dunarea de Jos Galati**

**Nume si prenume: Epureanu Alexandru**

**Adresa: str. Lapusneanu, nr. 16, bl. B 6, ap. 16, Galati, cod 800072**

**Locul de munca la data crearii inventiei: Universitatea Dunarea de Jos Galati**

**Nume si prenume: Banu Mihaela**

**Adresa: str. Saturn, nr. 10, bl. B 2, ap. 28, Galati, cod 800344**

**Locul de munca la data crearii inventiei: Universitatea Dunarea de Jos Galati**

**Nume si prenume: Constantin Ionut**

**Adresa: str. Domneasca, nr. 71, bl. B, ap. 33, Galati, cod 800215**

**Locul de munca la data crearii inventiei: Universitatea Dunarea de Jos Galati**

**Nume si prenume: Marin Florin Bogdan**

**Adresa: str.Tecuciul Nou nr.15, Tecuci, 805300, România**

**Locul de munca la data crearii inventiei: Universitatea Dunarea de Jos Galati**

*Alti inventatori sunt înscrisi în pagina urmatoare*

**Semnatura solicitantului sau a mandatarului autorizat** (numele si prenumele precum si calitatea persoanei cu capacitate de reprezentare a solicitantului sau a mandatarului autorizat):

*Prof. Dr. Ing. Mînză Viorel, Rector*

Semnatura: \_\_\_\_\_

Data: \_\_\_\_\_

L.S. \_\_\_\_\_

## **2 . Metoda si echipament pentru evaluarea prelucrabilitatii prin deformare plastica a tablelor subtiri**

**Autori:** Banu M., Marinescu V., Epureanu A., Tabacaru V., Constantin I., Marin F.B.

*Rezumat:* Inventia se refera la o metoda si la un echipament de determinare a prelucrabilitatii prin deformare plastica a tablelor subtiri destinate ambutisarii. Prin prelucrabilitate se intelege sensibilitatea materialului la revenirea elastica si la formarea cutelor in timpul si dupa deformare. Echipamentul, conform inventiei, permite ambutisarea epruvetelor dreptunghiulare, de diferite grosimi si latimi si variatia parametrilor de proces si de material, astfel incat sa se obtina evolutii ale revenirii elastice si cutarii la mici modificari ale factorilor de influenta. Metoda se refera la masurarea revenirii elastice tridimensionale obtinuta la epruvete cu forma initiala dreptunghiulara si supuse indoirii prin ambutisare, utilizand dispozitivul mentionat mai-sus. Ca urmare a utilizarii acestei metode, se poate afirma despre un material ca este mai prelucrabil prin deformare plastica decat un altul, daca revenirea lui elastica este mai putin sensibila la variatia factorilor care o influenteaza. Mai mult, prin utilizarea acestei metode si a acestui echipament se are in vedere gasirea acelor cupluri de materiale, care fiind utilizate in prelucrarea a doua piese ce urmeaza sa se asambleze, sa duca la o revenire elastica de compensare. Echipamentul este realizat dintr-un dispozitiv de deformare prin ambutisarea unor epruvete de forma dreptunghiulara

## **Cursuri doctorale restructurate:**

**Universitatea „Dunarea de Jos” din Galati**  
**Facultatea de Mecanica**  
**Scoala Doctorala**  
Anul univ. 2008-2009

### **Managementul proiectelor stiintifice**

*- curs doctoral -*

*Durata:* 2 ore curs si o ora aplicatii.

*Grup tinta:* toti doctoranzii scolii.

*Caracterul cursului:* obligatoriu.

Anul I, semestrul I

#### **A. Programa analitica a cursului**

##### **1. Aspecte generale privind managementul proiectelor stiintifice**

- 1.1. *Conducerea sistemelor tehnice.* Control, comanda, conducere, ciclu, program. Monitorizare, deviatie program, lege de conducere, sistemul tintelor si restrictiilor, corectii. Control limitativ, adaptiv, inteligent, optimal, predictiv.
- 1.2. *Managementul sistemelor socio-economice.* Gestionare, administrare, management, guvernare. Ierarhic, holarhic, heterarhic, anarhic. Program, proiect, politica, reglementari. Finantator, entitati legal constituite, persoana, mediu.
- 1.3. *Managementul sistemelor didactico-stiintifice.* Date, informatii, cunostinte, modele, principii. Descoperire-observare si caracterizare, identificare/invatare – constructie cauzala, modelare – compunere modele, cognitie-reprezentarea lumii reale, sinteza-generalizare.
- 1.4. *Cercetare-publicare:* modele (legi, reguli), paradigma (familie de modele), concept (familie de paradigme), conceptie (mod de abordare, viziune), teorii (conceptii ideatice).
- 1.5. *Creatie-brevetare:* procedee, tehnici, metode, metodologii, constructii fizice.
- 1.6. *Educatie-atestare:* profesionala-circuitul economic (investitie, marketing, proiectare, fabricatie, comercializare, investitie); stiintifica-circuitul stiintific (sistem tehnico-

economic, cercetare-publicare, creatie-brevetare, dezvoltare-proiectare, sistem tehnico-economic).

- 1.7. *Politici in domeniul cercetarii si creatiei stiintifice.* Organisme nationale si europene. Analiza comparativa.

## 2. Ciclul de viata al unui proiect stiintific

- 2.1. *Guvernare:* tinte strategice, monitorizare, definire program, decizie politica.
- 2.2. *Operationalizare program:* planificare program, sistem de management, decizie, apel proiecte: scop, obiective, prioritati, politici-reglementari, calendar.
- 2.3. *Analiza:* entitate legal constituita, persoana, scop, obiective, decizie.
- 2.4. *Elaborare proiect,* competitie finantare, oferta, decizie, contractare.
- 2.5. *Finantare,* executare, management, monitorizare, raportare.
- 2.6. *Diseminare,* sustenabilitate, audit proiect, audit program, dezvoltare proiect.

## 3. Conceperea proiectelor stiintifice de cercetare, dezvoltare, inovare

- 3.1 *Introducere.* Proiect de cercetare. Cerere de finantare. Proiectarea constructiilor. Proiectarea proceselor/activitatilor.
- 3.2 *Marketing in cercetare.* Informare privind oferte de finantare, domenii prioritare si alternative operationale.
- 3.3 *Analiza.* Analiza SWOT. Analiza la nivel personal. Analiza la nivel de de grup. Analiza la nivel de domeniu stiintific.
- 3.4 *Decizie privind continutul cercetarii.* Subiect, stadiul actual, scop, idei cheie, obiective, abordari, rezultate asteptate, importanta, relevanta.
- 3.5 *Sinteza activitatilor de cercetare.* Relatia obiective-activitati-tehnologii, metodologii si facilitati suport – tipologia activitatilor de cercetare – rezultate pariale.
- 3.6 *Dimensionarea activitatilor de cercetare.* Amploarea activitatilor. Resursele institutionale, logistice, materiale, informationale, umane si financiare necesare. Resurse existente. Resurse achizitionate. Constructie consortiu/echipa. Constructie buget pe activitati, pe linii bugetare, pe partener.
- 3.7 *Planificarea activitatilor de cercetare.* Flux *operational:* obiective – activitati - resurse-parteneri-rol-timp. Fluxul *financiar:* input financiar (finantator, cofinantator, parteneri, creditare parteneri, creditare echipa); output financiar (conform activitatilor desfasurate si a liniilor de finantare); soldul din contul proiectului. Fluxul *stiintific:* cercetare – cunoastere – creatie stiintifica – atribuirea rezultatelor – protectia/valorificarea rezultatelor.
- 3.8 *Managementul proiectului.* Organigrama. Management administrativ. Management stiintific. Management financiar.
- 3.9 *Diseminare. Sustenabilitate*
- 3.10 *Inregistrarea proiectului in competitia pentru finantare. Contractare.*

## 4. Tipologia si metodică activitatilor de cercetare si creatie stiintifica

- 4.1 *Tipologia si metodică activitatilor de cercetare.* Documentarea stiintifica. Demonstratia stiintifica. Experimentul stiintific. Tehnolgiu suport. Metodologii suport. Instrumente si

- facilitati. Prezentarea orala a unui rezultat stiintific. Conceperea si redactarea unei lucrari stiintifice. Sinteza si monografia stiintifica.
- 4.2 *Tipologia si metodica activitatii de creatie stiintifica*. Creatii de tip constructie sau metodologie. Documentare. Tehnici de stimulare a actului de creatie. Asocierea consonanta, inversia, empatia, combinarea, tehnica input-output, tehnica listelor interogative, demersul euristic. Structurarea unei creatii stiintifice. Descrierea unei inventii. Transfer tehnologic. Proprietate intelectuala si proprietate industrială. Drepturi de autor. Inventii si marci, patentare-inregistrare.
- 4.3. *Comunitatea stiintifica*. Forme de organizare si actiune. Presa stiintifica. Viata stiintifica. Forme de participare la viata stiintifica.

## 5. Evaluarea activitatilor de cercetare si creatie stiintifica

- 5.1. *Aspecte generale*. Relatia evaluare-masurare. Componentele subiectiva si obiectiva ale unei evaluari. Etica evaluarii. Evaluator si evaluat. Diferenta dintre subiectivism si incorectitudine. Reproductibilitatea evaluarii. Costul evaluarii.
- 5.2 Proceduri si criterii de *evaluare a propunerilor de proiecte* in vederea finantarii.
- 5.3 Proceduri si criterii de *evaluare a rezultatelor obtinute* din cercetarea stiintifica – creatia stiintifica, in vederea publicarii – brevetarii.
- 5.4 *Evaluarea stiintifica a cercetatorilor* in vederea angajarii-promovarii-premierii. Structurarea arborescenta a criteriilor. Etapizarea procedurilor de elaborare-evaluare. Criterii obligatorii de departajare. Selectia evaluatorilor. Importanta evaluarii pentru actorii activitatii stiintifice: finantator, cercetator, mediul stiintific.
- 5.5 *Concluzii pentru buna practica*.

## 6. Managementul proiectelor stiintifice de cercetare

- 6.1 Managementul stiintific.
- 6.2 Managementul administrativ si financiar.

## 7. Etica si deontologia cercetarii si creatiei stiintifice

- 7.1 Baza legala.
- 7.2 Aspecte manageriale/operationale.

## B. Continutul activitatilor aplicative

- 1) Conceperea si elaborarea unui *proiect de cercetare stiintifica* in cadrul PNCDI II, componenta IDEI.
- 2) Conceperea si elaborarea unui *articol stiintific*.
- 3) *Descrierea unei inventii* in conformitate cu reglementarile in vigoare, pentru brevetare la nivel national si la nivel UE.

Intocmit: Prof. Dr. Ing. Alexandru Epureanu DHC