

Universitatea Politehnică din București
Facultatea de Automatică și Calculatoare

**Sistem autonom, auto instruibil de comandă adaptivă robot -
CNC integrat în arhitectura orientată pe servicii pentru
reproducerea obiectelor din imagini tip hartă de profunzime**

Documentație tehnică

Contract nr. 69/01.10.2007

Cuprins

1. Modelarea, proiectarea si implementarea software a controlului si a comunicatiei sistemului CNC – AC ca un holon functional intr-o arhitectura de fabricatie multiagent.....	3
1.1. Introducere.....	3
1.2. Descriere generala a arhitecturii de comanda si control.....	5
1.3. Holonul resursă.....	8
2. Tehnici de verificare a calității produsului finit.....	11
2.1. Proiectarea metodelor de verificare a calității produselor obținute prin uzinare / asamblare.	11
2.1.1. Metode de verificare a produselor prin măsurători directe.....	11
2.1.2. Metode de verificare a produselor cu suprafețe de revoluție.....	13
2.1.2. Metode de verificare a produselor prin compararea hărților de profunzime.....	14
2.2. Implementarea tehnicilor de verificare a calității.....	15
2.2.1. Interfața cu programul de vedere artificială AdeptSight.....	15
Bibliografie.....	16

1. Modelarea, proiectarea si implementarea software a controlului si a comunicatiei sistemului CNC – AC ca un holon functional intr-o arhitectura de fabricatie multiagent

1.1. Introducere

In prezent chiar daca optimizarea procesului productiei ramane un aspect important in domeniul sistemelor de fabricatie, conceptul de *intreprindere agila* castiga din ce in ce mai mult teren [2, 3]. Sistemele de fabricatie flexibile trebuie sa se adapteze rapid perturbatiilor / situatiilor neprevazute precum defectiuni de resurse, adaugarea de noi echipamente in fluxul de productie, epuizarea stocurilor resurselor si preluarea ordinelor client rapide ("*rush orders*") [4].

Cercetarile in domeniul fabricatiei din ultima perioada au avut ca rezultat propunerea de noi arhitecturi de comanda si control de tip heterarhic (un grup de entitati independente denumite agenti care negociaza atribuirea spre executie a ordinelor de productie pe baza starii curente si a incarcarii viitoare). Acest tip de arhitecturi vin ca o alternativa la sistemele de comanda si control ierarhice folosite in domeniul fabricatiei [5].

Pentru structurile de fabricatie cu resurse conectate in retea (roboti, masini-unelte, vedere) si control al calitatii in timp real, o arhitectura de control semi-heterarhica a fost propusa [8] in care controlul este impartit pe doua niveluri, denumite generic global si local:

- Nivelul **global** este responsabil cu planificarea, alocarea si coordonarea activitatilor la nivelul celulei de fabricatie si cu rezolvarea conflictelor intre entitati ce au obiective locale care intra in conflict;
- Nivelul **local**, caracterizat de autonomie, poate sa intervina asupra unei alocari create offline si sa controleze activitatile interne ale sub-sistemelor care il compun. Acest nivel local, este la randul sau impartit in doua sub-niveluri datorita relatiei de subordonare dintre partea de control a sistemului de transport, care este reprezentativa si pentru ordinele de productie, si partea de control a resurselor. Astfel, sub-nivelul "controller-lor resurselor" devine nivelul automatizare si nivelul "automat programabil" devine un sub-nivel intermediar intre planificare si alocare si nivelul automatizare.

Infrastructura folosita la integrarea masinilor cu comanda numerica in celula de fabricatie contine (Fig. 1.1):

- 4 locatii de prelucrare a produselor constand dintr-una sau mai multe resurse, toate acestea fiind grupate si vizibile in exterior sub forma unei singure entitati denumita post de lucru;
- conveior in bucla inchisa care conecteaza posturile de lucru si pe care circula paletele pe care se executa ordinele client sub forma de produse;
- resurse de calcul (PC-uri si server) pentru comanda si controlul celulei de fabricatie.

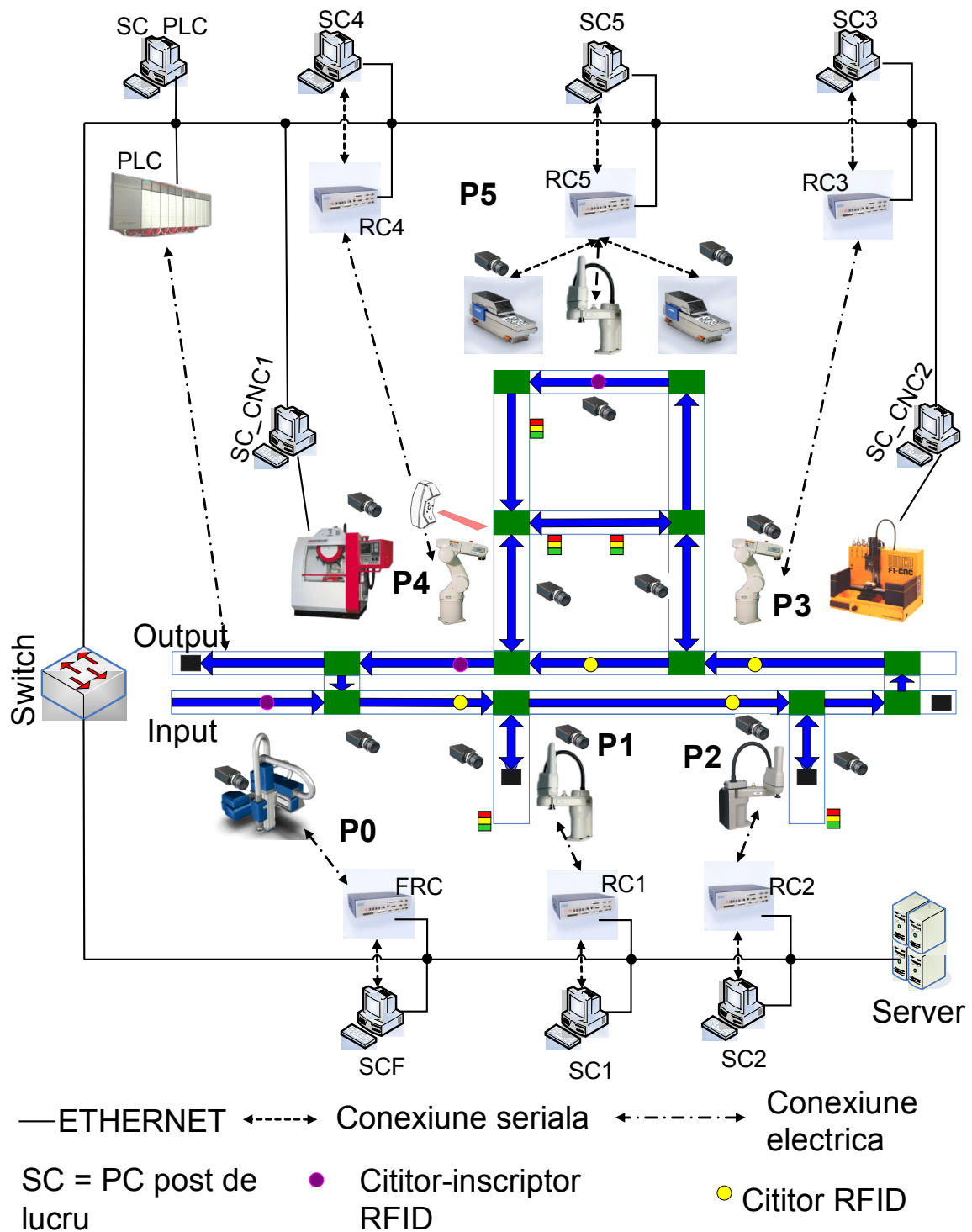


Fig. 1.1. – Structura de fabricatie holonica cu alimentare automata a posturilor de lucru

Paradigma de **fabricatie colaborativa**, pe "echipe de lucru" (*team-based manufacturing*), bazata pe mai multe criterii – similitudinea intre activitati, localizare, coalizarea resurselor in functie de sarcinile de executat – care descriu procesele de planificare si control [2, 9] a fost adaptata celulei de fata pentru a asigura *flexibilitatea*, *agilitatea* si *reactivitatea* necesare pentru a face fata unor cerinte ale clientilor din ce in ce mai dinamice.

1.2. Descriere generala a arhitecturii de comanda si control

Aceasta arhitectura a fost dezvoltata pentru a minimiza timpul total de fabricatie folosind in acest scop o planificare si o alocare globala a ordinelor de productie. Astfel, modul de functionare ierarhic, care asigura optimalitatea, este prioritar (implicit) atata timp cat frecventa defectiunilor de resurse este redusa. In acelasi timp, sistemul de fabricatie este unul de tip holonic [4] cu partea control robusta si distribuita in mod reactiv, in care partea de control heterarhic este activata la aparitia perturbatiilor. Acest tip de organizare permite resurselor individuale sa lucreze independent, urmarind ordine precise furnizate de sistemul de control care optimizeaza global procesul de productie. De indata ce o perturbatie a fost detectata, (defect resursa, terminare stoc) sistemul de control trece in mod heterarhic, abandoneaza recomandarile primite de la nivelul superior si foloseste partea distribuita pentru a reface in timp real alocarea operatiilor curente; imaginile informatice ale resurselor autonome comunica intre ele pentru a realiza aceasta alocare pe baza unui model de acces la servicii.

Conform [2] in prezenta aplicatie vom folosi urmatoorii termeni:

Componenta de fabricatie sau modulul: este un echipament fizic care poate executa un set de functii specifice sau actiuni de productie in celula de fabricatie precum: miscarea, transformarea, fixarea sau apucarea, acestea fiind extinse cu analiza conturului si testarea calitatii.

In cazul aplicatiei prezente, modulele de fabricatie sunt: *masina de frezat cu comanda numerica*, folosita pentru prelucrarea mecanica a pieselor, *robotul industrial*, folosit ca manipulator (piese neprelucrate sunt luate din depozitul aferent puse automat in masina si apoi luate din masina si depuse in depozitul cu piese prelucrate), *camerele video*, folosite pentru analiza si testarea calitatii produselor, si *scannerul laser*, folosit pentru generarea modelelor 3D ale obiectelor de interes.

Componenta de fabricatie agentificata: este compusa dintr-o componenta de fabricatie impreuna cu agentul care o reprezinta. Aptitudinile agentului sunt cele oferite de componenta de fabricatie care este conectata la agent printr-o interfata.

Prin actiunea de agentificare a unei resurse, in cadrul acestui proiect, se intelege atasarea *unui program de control de tip server sau client* resursei considerate, impreuna cu *definirea unor protocoale de comunicatie* (infrastructura fizica si formatul datelor schimbate) si *interactiune* (tipul de mesaje structurate, schimbate cu exteriorul, precum si modul in care raspunde acestor mesaje(ex.: start operatie, informare piesa terminata, etc.)). Acesta procedura de agentificare face ca resursa sa poata *opera autonom*, ea oferind o *interfata deschisa*, pe ETH, pentru obtinerea serviciilor pe pe care le ofera.

Componentele agentificate prezente in cadrul acestei aplicatii sunt: robotul industrial impreuna cu programele de control pentru alimentarea CNC-ului si manipularea pieselor / asamblarea produselor, masina CNC impreuna cu programele de control pentru prelucrarea pieselor si aplicatia de tip server pentru primirea comenzilor START/STOP operatie, si scannerul laser impreuna cu programul de scanare si memorare a datelor.

Coalitie/consortiu: este un grup agregat de componente de fabricatie agentificate a caror cooperare este regularizata printr-un contract de coalitie, care interactioneaza pentru a genera functionalitati agregate care, in unele cazuri, sunt mai complexe decât simpla adaugare a capacitatilor lor individuale.

In cadrul sistemului flexibil de fabricatie, din care fac parte ansamblul robot-masina CNC-scanner laser, aceste resurse sunt modelate printr-un consortiu ce ofera servicii entitatilor autonome holon ordin. Aceasta consortiu, sau holarhie, deoarece in modelarea sistemului s-au folosit principiile holonice de autonomie si cooperare [6], se formeaza la nivelul planificare globala a

productiei, pentru ca apoi in timpul executiei ordinelor de productie, operatiile complexe sa fie descompuse in operatii atomice de catre coordonatorul consortiului. In cazul aplicatiei de fata robotul ce face manipularea pieselor este coordonatorul consortiului, el fiind cel prin intermediul caruia consortiul primeste comenzile.

Exemplu: Holarhia formata din robotul industrial, CNC si scannerul laser ofera serviciul complex de extragere model piesa disponibila prin scanare si apoi reproducere piesa pe CNC.

Particularitatea acestei arhitecturi este imbinarea controlului ierarhic cu controlul heterarhic, rezultand astfel un sistem de control flexibil care se adapteaza in functie de context. Pe baza Fig. 1.1 in care este ilustrata distributia inteligentei, combinat cu domeniile conexe unui proces de fabricatie (productie, proces si afacere) si cu faptul ca se doreste un sistem de control holonic (resursele si elementele asupra carora se actioneaza sunt grupate in entitati autonome care pot fi accesate pe baza unor interfete deschise), rezulta urmatorul model structural al sistemului: **holon expert**/coordonator responsabil cu gestiunea la nivel global a procesului, **holon resursa** responsabil cu controlul unei resurse generice si interfatarea acesteia cu alte entitati, **holon produs** care contine informatia tehnica necesara executiei unui produs si **holon ordin** responsabil cu partea de timp real a executiei unui ordin client (Fig. 1.2).

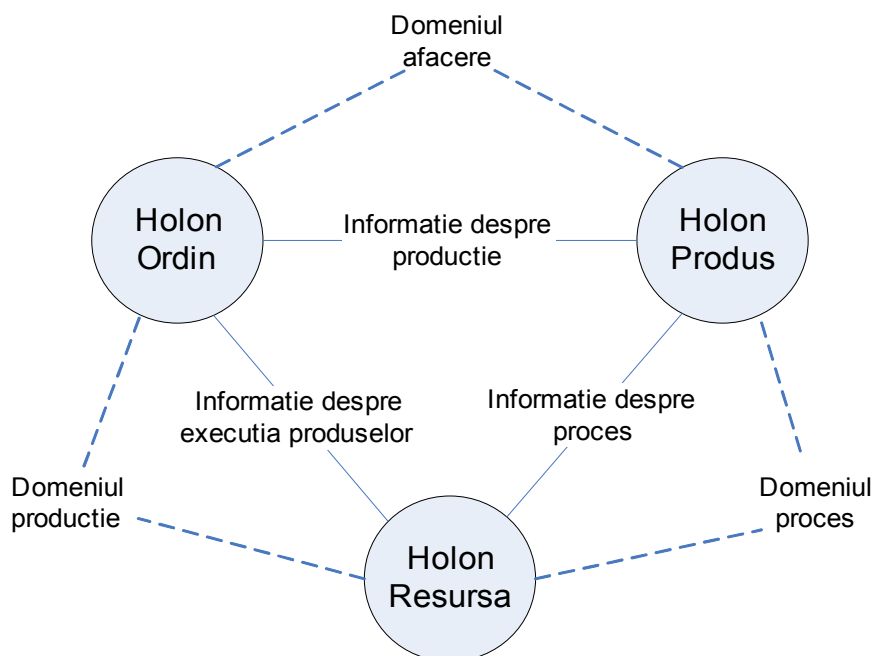


Fig. 1.2 – Structura sistemului de fabricatie: elementele componente si domeniile aferente [6,7]

Cu toate ca entitatile sistemului de fabricatie (Fig. 1.2) au roluri diferite, ele au structuri similare, toate fiind blocuri functionale caracterizate de *autonomie* si *cooperare*. Un motiv in plus pentru care s-a ales aceeași structura generica este acela ca arhitectura rezultanta devine scalabila in felul acesta. Astfel, structura generica urmatoare este propusa pentru a asigura functionalitatile si interactiunile intre entitatile active (holoni), ea avand la baza sincronizarea informational-fizic si localizarea inteligentei raportat la holonul generic (Fig. 1.3). Se observa astfel, ca o entitate autonoma este compusa dintr-o parte fizica (resursa efectiva) si un modul de augmentare a capacitatilor decizionale. In functie de localizarea acestui modul exista trei tipuri de sincronizari informational-fizic: inteligenta imbarcata (3), inteligenta la distanta (1) si inteligenta hibrida (2). Metoda aleasa in proiectul de fata a fost aceea a unei inteligente la distanta datorita necesitatii comenzilor de a trece prin mai multe entitati decizionale.

Entitatea informatională este compusa din trei parti care permit holonului generic sa fie autonom si cooperant/comunicativ. Prima parte este un modul de memorare pentru a stoca

informatii necesare receptiei serviciilor de fabricatie: propria structura, structura sistemului sistemului de fabricatie si modul de accesare al altor entitati si informatii suplimentare precum parametri ai resurselor si programe/proceduri de executat. Al doilea modul, cel care asigura autonomia decizionala, este modulul de procesare care prelucreaza informatiile schimbate între diferiti holoni si de asemenea cu controlul direct al entitatii in cauza. A treia parte a holonului generic este partea comunicationala care trateaza accesul la retelele informatice si schimbul de date între holoni.

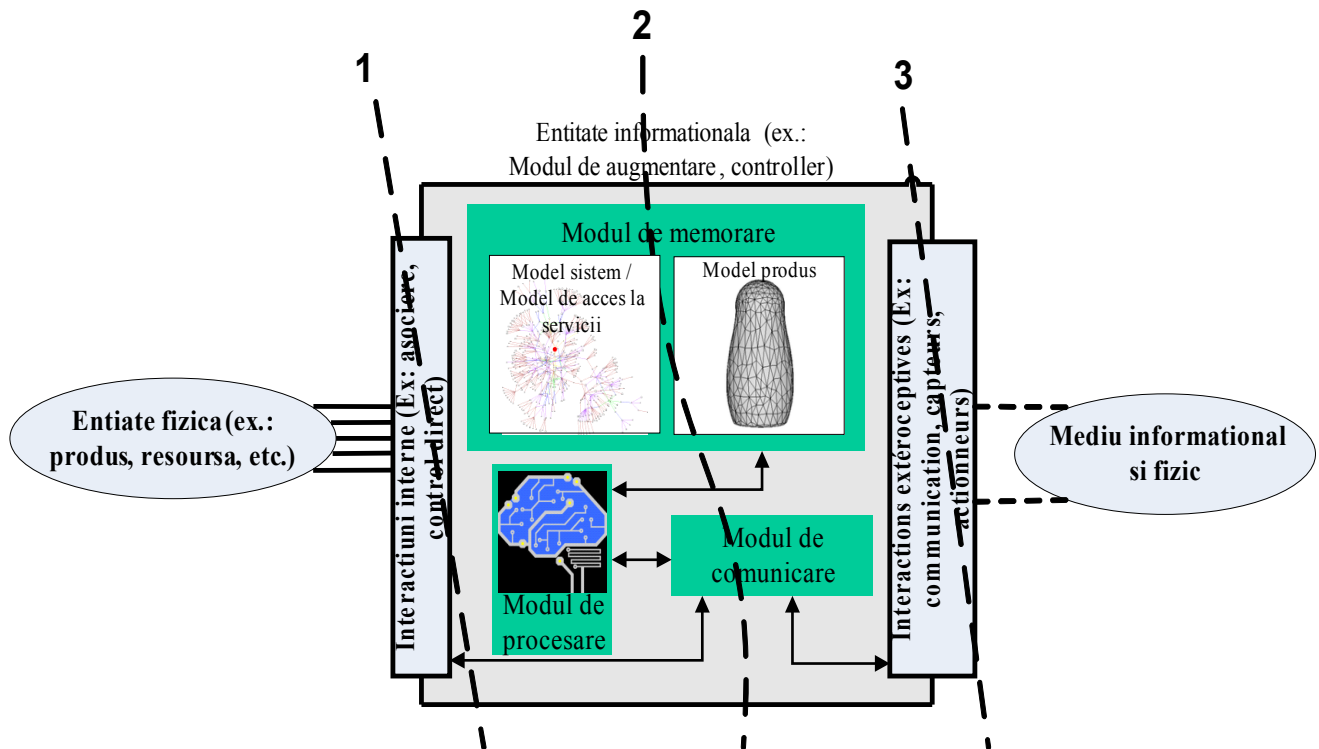


Fig. 1.3 – Structura unui holon generic

Datorita alegerii de implementare (1) din Fig. 1.3, care la randul ei a fost influentata de infrastructura existenta, partea informatională (modulul de augmentare) este distribuita pe doua niveluri (automat programabil pentru executia ordinelor si PC celula pentru replanificare) dupa cum este descris in Fig. 1.4, sincronizarea informational-fizic fiind facuta prin intermediul dispozitivelor RFID. Partea de control de nivel inalt este responsabila cu planificarea si alocarea ordinelor. O data obtinute informatiile acestea ele sunt transferate si utilizate de catre nivelul de jos prin intermediul automatului programabil pentru transport si pentru obtinerea serviciilor de fabricatie.

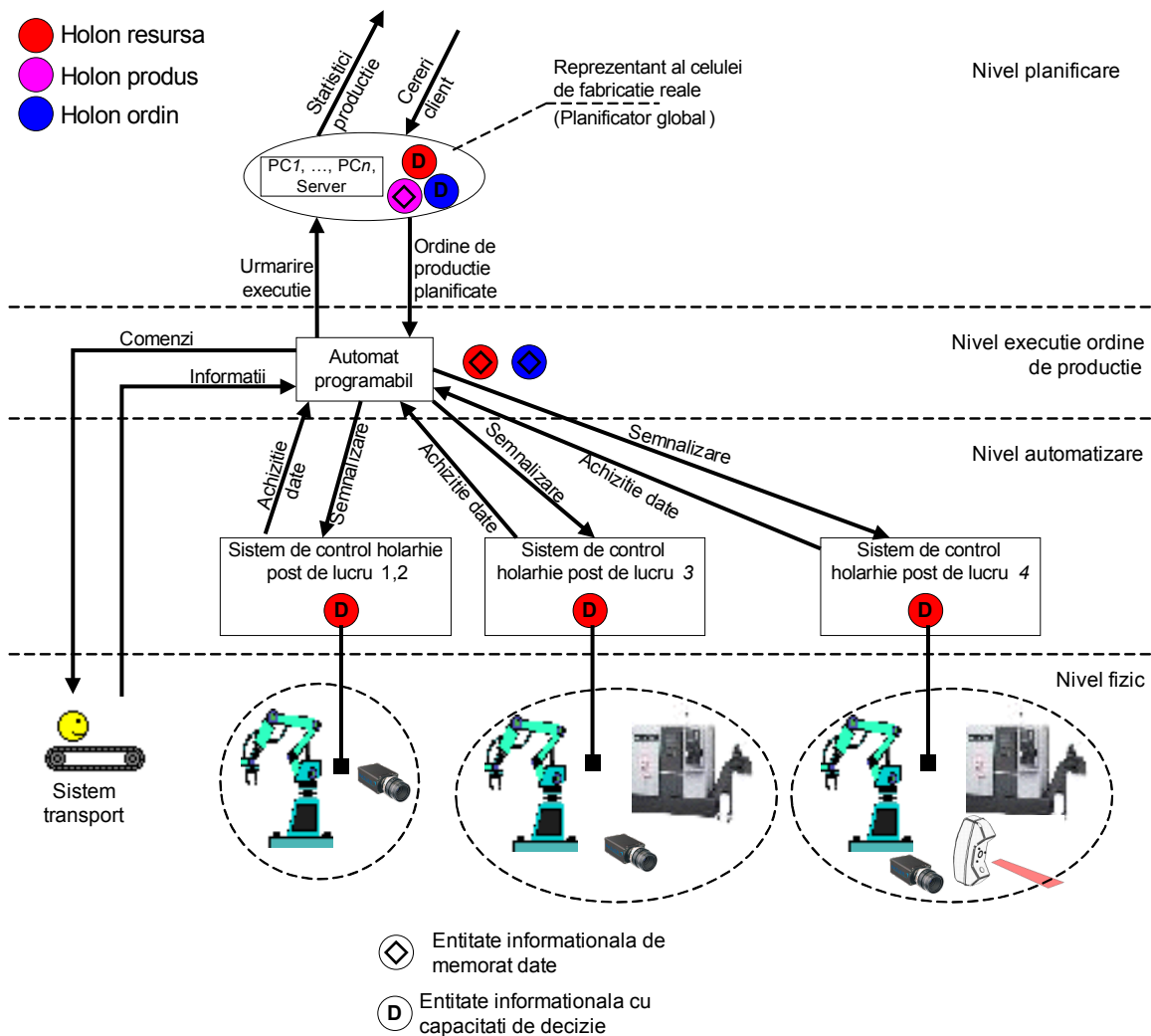


Fig. 1.4 – Localizarea holonilor pe arhitectura de control

Lucrarea respectiva se concentreaza pe partea de holon resursa si integrarea acesteia intr-o structura de fabricatie flexibila.

1.3. Holonul resursă

Alcatuit dintr-o parte informatională responsabilă cu luarea deciziei și una fizică responsabilă cu implementarea efectivă a operațiilor, elemente ale holonului resursa se regasesc pe cele trei niveluri ale sistemului de control prezent în Fig. 1.4:

- *partea decizională* a resursei (simbolul D în cerc roșu la nivelul holonului expert) participă activ la procesul de planificare și alocare al ordinelor de producție în mod heterarhic;
- *nivelul intermediar* are rol de memorare a stării curente (funcție simbolizată prin romb în cerc roșu) și de interfatare între nivelul superior de planificare și alocare și nivelul automatizare. Schimbul permanent de date între PGP și automatul programabil care controlează sistemul de transport al celulei asigură faptul că partea decizională de înalt nivel utilizează în procesul de planificare informații care sunt în conformitate cu realitatea;
- *nivelul automatizare*, unde este integrată și partea fizică a holonului, este responsabil cu controlul direct al resurselor fizice (simbolul D în cerc roșu la nivelul controller-ilor resurse) presupunând gestiunea în timp real a posturilor de lucru (ex.: număr de piese în stocuri) și cu sincronizarea cu nivelul de execuție a ordinelor de producție (procesul de lansare în execuție).

Cu toate ca exista o separare intre automatul programabil (nivelul intermediar) si posturile de lucru (nivelul automatizare), acestea sunt ambele incluse in ceea ce se numeste nivel de baza (Fig. 1.1), ele fiind responsabile cu materializarea comenzilor nivelului inalt. Astfel, proprietatile si functionalitatile unui holon resursa se impart intre aceste doua niveluri dupa cum urmeaza:

Informatii si metode de nivel inalt pentru identificare, pentru acces la operatiile pe care resursa este capabila sa le faca si pentru participarea la procesele de planificare si alocare. Aceste informatii cuprind: *nume/identificator resursa, operatii posibile* cu tot cu *timpii de procesare necesari, stare curenta, operatie curenta si ordin curent*.

Informatii de nivel jos, localizate pe nivelul "executie ordine productie" si "automatizare" care sunt utilizate in timp real pentru gestiunea inteligenta a sistemului de fabricatie. Aceste informatii care privesc procesul real de fabricatie sunt: stare curenta si operatiile pe care aceasta le poate executa. Tot la acest nivel, pe langa aceste date se regasesc functiile urmatoare, proprii holonilor resursa:

- *Controlul resursei atasate*: functie de timp real care asigura controlul direct al resursei fizice (ex.: controlul traiectoriei unui robot);
- *Interfata cu exteriorul*: aceasta functie este responsabila de standardizarea si securizarea comunicatiei (interconexiune fizica, protocol de comunicatie si protocol de interactiune) si de schimbul de date cu exteriorul (ex.: transfer operatii pentru executie, semnalizari stare operatie);
- *Gestiunea stocurilor*: functie care se ocupa de alimentarea si realimentarea posturilor de lucru cu materia prima. Aceasta functie este responsabila de actualizarea stocurilor (numar si amplasament de piese) si de semnalizarea intre resursa curenta si nivelul de executie a ordinelor care mai departe semnalizeaza postul de (re)alimentare.

O particularitate a holonilor resursa fata de celelalte tipuri de holoni este *structura lor recursiva*: un holon resursa poate fi format din mai multi holoni resursa de baza (CNC, camera video). Astfel, nivelul de executie a ordinelor nu discuta direct cu resursele de baza implicate in procesul de fabricatie, ci cu reprezentantul unei *echipe de lucru*. Urmand principiile holonice (autonomie si cooperare) de dezvoltare a partii control pentru un sistem de fabricatie flexibil, resursele existente se coalizeaza pe *echipe de lucru* formand consortii. Aceste consortii, denumite in practica posturi de lucru (P0 – P5 in Fig. 1.1) reprezinta un grup agregat de componente de fabricatie agentificate a caror cooperare este regularizata printr-un contract de coalitie, care interactioneaza pentru a genera functionalitati agregate care, in unele cazuri, sunt mai complexe decat simpla adaugare a capacitatilor lor individuale. In cadrul sistemului flexibil de fabricatie resursele existente sunt modelate prin consortii ce ofera servicii entitatilor autonome holon ordin, aceste servicii fiind accesibile prin entitatea responsabila cu dirijarea holonului resursa, care in fiecare caz este robotul asociat postului de lucru.

O detaliere a operatiilor (fizice) executate de fiecare element al consortiului robot-CNC este prezentata in continuare:

a. Uzinare pe MUCN (Masina Unealta cu Control Numeric)

Acest tip de operatie este realizat de resursa CNC (MUCN), se executa pentru un produs *produs / material*, necesita 1 sau *ns* scule si are obligatoriu predecesor operatia **Alimentare MUCN** si este urmata obligatoriu de operatia **Descarcare MUCN**, ambele efectuate cu robot.

Operatiile de uzinare pot fi de doua tipuri frezare (FR) si gaurire (GR) si pe langa tipul operatiei trebuiesc specificate urmatoarele:

- tipul produsului asupra caruia se executa operatia

- tipul materialului asupra caruia se executa operatia
- secventa operatiilor de uzinare executate asupra unui produs

Deasemenea, operatia **Schimbare Freză** necesara modificarii modului de procesare al pieselor se realizeaza automat prin programul de uzinare asociat.

- b. Manipulare cu robot** (resurse necesare: robot, gripper; presupune calibrarea electro-mecanica realizata)

Operatia generica de **manipulare** a unei piese de catre robot este folosita in mai multe scopuri, dupa cum urmeaza:

- **Alimentare MUCN:** alimentare robotizata a postului de lucru al unei MUCN. Aceasta operatie se executa automat atunci cand stocul de piese prelucrate scade sub un anumit numar pentru a se accelera procesul de montare a piesei fabricate. Odata realizata operatia de alimentare a MUCN, cele 2 resurse ale consorțiului cobot-CNC pot lucra in paralel: robotul realizeaza alte asamblari in timp ce CNC-ul prelucreaza piesa.
- **Descarcare MUCN:** descarcare robotizata a postului de lucru al unei MUCN specificate. Dupa prelucrarea unei piese de catre MUCN se asteapta interventia robotului care preia piesa si o depune in stiva de piese prelucrate de unde va fi luata pentru a fi montata pe produsul final.
- **Alimentare Depozit:** alimentare robotizata a unui depozit de materiale din postul de lucru al unui robot; se executa de catre robotul statiei de lucru a celulei cind depozitul e gol, pentru k unitati de material de acelasi tip aduse in postul robot de pe conveior pe 1 sau mai multe *supply pallets*; necesita un program cu o rutina "pick-and-place" executata in bucla de k ori.
- **Montaj Componente:** se executa pentru un produs aflat pe o paleta (transportata prin Order Holon) in postul robot de pe conveior, cu unu sau mai multe componente de montaj; necesita unu sau mai multe programe fiecare din ele cu o rutina "pick-and-place" a componentei curente.
- **Schimbare Instrument:** schimbarea sculei din gripperul unui robot; necesita un program cu o rutina "pick-and-place" (cind un instrument este introdus in / eliberat din gripper) sau doua rutine "pick-and-place" (cind un instrument existent este schimbat cu unul nou).
- **Prelucrare Produs:** prelucrare robotizata a unui produs cu ajutorul unei scule *tool* montate in gripperul robotului; necesita un program cu una sau mai multe rutine "pick-and-place".

Pentru operatiile de manipulare cu ajutorul robotului prezentate mai sus trebuiesc definite urmatoarele lucruri: punctele de prindere din baza stivelor, numarul piesei curente (daca este cazul, si nu se manipuleaza o singura piesa) si modul de prindere al piesei.

La cererile de interogare asupra starii curente, holonul resursa atasat resursei robot sau resursei MUCN intoarce unul din mesajele:

- *Operatie terminata* [ok / nok(... ; (op.uz_ i , cod.er_ i) ;...)]:
 - ok: terminare normala
 - nok, cod eroare: operatie neterminata, datorita terminarii anormale cu abandon si semnalarea codului de eroare asociat cod_er_ i
- *In executie*;
- *Operatie suspendata* in asteptarea unei confirmari de la controllerul robot si/sau de la PLC.

c. Controlul de calitate prin scanare laser

Această operație presupune inspecția geometrică 3D a produsului aflat în postul de lucru, care poate fi:

- produs obținut prin uzinare pe mașina din postul de lucru
- produs asamblat la o altă stație de lucru

La cererile de interogare asupra stării curente, holonul resursa atașat întoarce unul din mesajele:

- *Operatie terminata* [ok / nok(... ; (op.uz_i, cod.er_i) ;...)]:
 - ok: inspecție terminată cu succes (produs validat)
 - nok, cod eroare: inspecție eșuată sau eroare apărută în timpul efectuării procedurii de inspecție
- *In executie*;

2. Tehnici de verificare a calității produsului finit

2.1. Proiectarea metodelor de verificare a calității produselor obținute prin uzinare / asamblare

2.1.1. Metode de verificare a produselor prin măsurători directe

Suprafețele geometrice simple (plane, sferice) pot fi inspectate prin obținerea unor măsurători asupra profilului acestora. Aceste măsurători pot fi calculate dintr-o singură linie de scanare obținută de la senzorul laser.

Exemple de măsurători care pot fi obținute dintr-o singură linie de scanare:

- diametrul unui cerc sau al unui arc de cerc
- unghiul dintre două suprafețe plane

Pentru ca aceste măsurători să fie exacte, este necesar în primul rând ca senzorul să fie orientat perpendicular pe axa care determină trăsătura măsurată; în exemplele de mai sus, este vorba de axa cilindrului sau axa de intersecție a celor două suprafețe plane.

Măsurarea unghiurilor poate fi extinsă la suprafețe care nu sunt plane, dar a căror intersecție cu planul laser rezultă în două segmente de dreaptă. În acest caz, intersecția dintre cele două suprafețe va forma o muchie, descrisă de o curbă în spațiu, iar senzorul va trebui orientat perpendicular pe această curbă.

Dacă senzorul este deplasat manual, condiția de perpendicularitate poate fi satisfăcută doar aproximativ, însă este posibilă ajustarea automată a orientării senzorului, astfel încât acesta să fie plasat perpendicular pe piesa măsurată. În cazul general, se poate estima tangenta la muchia dorită pentru măsurare prin deplasări mici ale senzorului în jurul punctului amplasament învățat de utilizator. Pentru aceasta, senzorul va trebui așezat aproximativ perpendicular pe muchia dorită, cu o eroare mai mică de 30°.

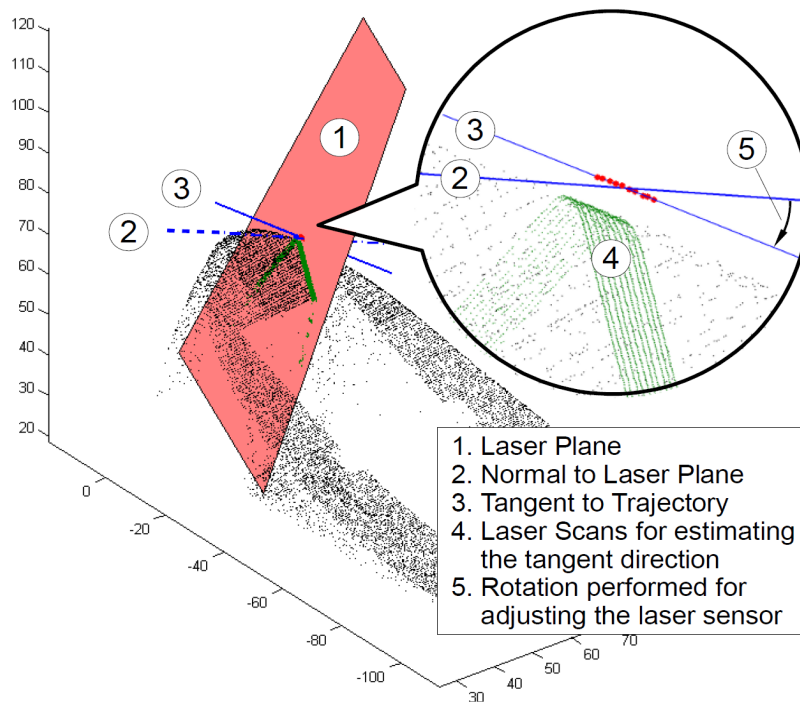


Fig. 2.1. Estimarea tangentei la o muchie a piesei în vederea reorientării senzorului

După ce tangenta la muchia dorită a fost estimată, se pot calcula unghiul și axa de rotație necesare pentru corecție efectuând produsul vectorial dintre tangenta curentă și tangenta dorită (Fig. 2.1).

Estimarea tangentei permite de asemenea detecția automată a conturului unei piese și generarea unei traiectorii de scanare de-a lungul acestui contur, prin re poziționarea automată a senzorului.

Măsurarea unghiului dintre două drepte obținute într-o singură linie de scanare presupune:

- segmentarea liniei de scanare (detecția muchiei)
- determinarea celor două segmente prin regresie liniară
- calculul unghiului

Segmentarea poate fi făcută automat prin aplicarea unui singur pas al algoritmului de simplificare al poliliniilor, Douglas-Peucker, în cazul în care punctele folosite reprezintă două segmente în formă de V. Acest pas va determina punctul cel mai depărtat față de dreapta care unește extremitățile liniei de scanare. Dacă în câmpul vizual al senzorului se află și alte elemente, care trebuie ignorate la măsurare, segmentarea va fi făcută selectând manual punctele de interes.

Pentru determinarea celor două segmente se va folosi regresia robustă, care elimină influențele negative ale punctelor care nu se află pe dreaptă (de exemplu, reflexii). Regresia robustă este implementată în funcția Matlab *robustfit*.

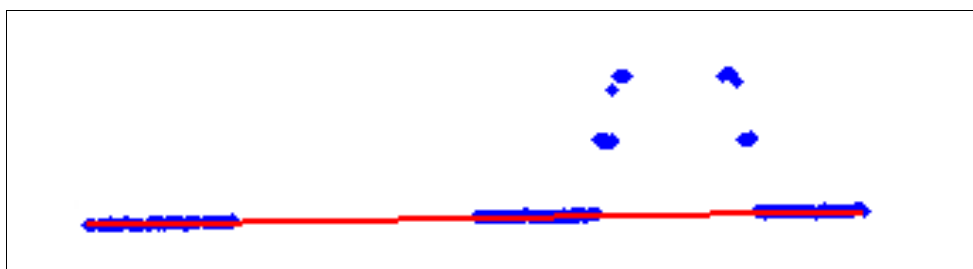


Fig. 2.2. Regresia robustă pentru un segment de dreaptă. Punctele care nu fac parte din segment sunt ignorate.

Măsurarea diametrului cercului presupune determinarea cercului care aproximează cel mai bine linia de scanare obținută, punctele acestea fiind dispuse pe un arc de cerc.

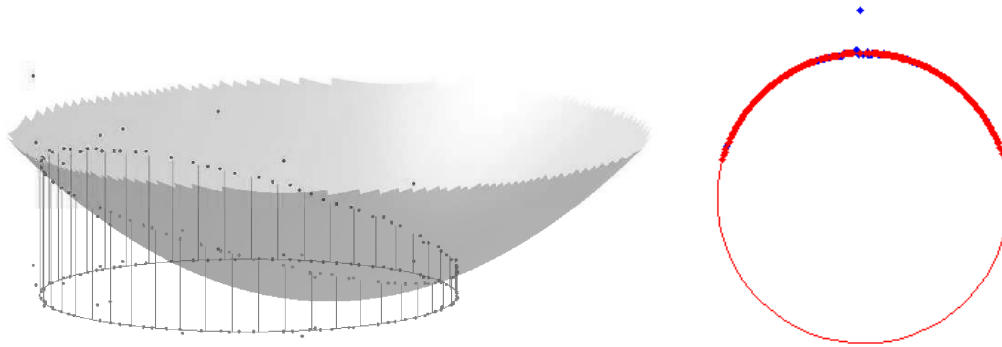


Fig. 2.3. Regresia robustă pentru un arc de cerc.

Ecuțiile de regresie necesare pentru a obține cercul care aproximează cel mai bine un set de date sunt neliniare, însă pot fi liniarizate prin metoda Riemann [10], care presupune proiecția punctelor pe un paraboloid 3D descris de ecuația:

$$t = x^2 + y^2$$

În urma acestei transformări, punctele obținute vor descrie un plan, care va fi identificat prin regresie liniară robustă. Planul obținut va fi descris de ecuația:

$$ax + by + c = 0$$

Coordonatele și raza cercului se pot recupera cu:

$$r = \frac{\sqrt{a^2 + b^2 + 4d}}{2}$$

$$x_c = a/2$$

$$y_c = b/2$$

Metoda poate fi extinsă imediat pentru obținerea centrului și razei unei sfere care aproximează cel mai bine un set de puncte tridimensionale. În acest caz, punctele 3D vor fi proiectate pe un paraboloid 4D, iar în urma regresiei liniare se va obține un hiperplan din care se vor recupera coordonatele și raza sferei.

2.1.2. Metode de verificare a produselor cu suprafețe de revoluție

Aceste produse sunt caracterizate de o suprafață rezultată în urma rotirii unei curbe bidimensionale în jurul unei axe fixe; ele sunt obținute de obicei în urma operațiilor de strunjire.

Deoarece aceste produse sunt fixate în menghina mașinii de prelucrare, care se poate roti în jurul axei piesei, o metodă foarte avantajoasă de a efectua inspecția acestor piese este prin scanarea piesei direct în mașina numerică, fără a scoate piesa din menghina de prindere.

Avantajele acestei metode sunt:

- piesa este perfect centrată în jurul axei sale; nu este necesară realinierea piesei într-un alt suport dedicat inspecției
- inspecția se poate face cu același robot care efectuează alimentarea / descărcarea mașinii
- după inspecție se pot face prelucrări suplimentare pe aceeași piesă, în vederea corectării

erorilor observate, în cazul în care a fost îndepărtat material mai puțin decât necesar. De asemenea, rezultatul inspecției poate fi folosit la calibrarea mașinii de prelucrare, pentru a îmbunătăți toleranțele pieselor următoare.

Inspecția se poate realiza printr-o singură trecere de scanare, de-a lungul axei principale a piesei. Fiecare linie de scanare va conține un arc de cerc. Deoarece în acest caz axa acestor arce de cerc este cunoscută (coincide cu axa articulației rotative a mașinii), setul de date obținut poate fi translatat și rotit astfel încât această axă să treacă prin originea sistemului de coordonate și să coincidă cu axa X. Această transformare simplifică mult procesul de estimare a razei locale a piesei, aceasta putând fi determinată prin calculul razelor pentru fiecare punct din setul de date și prin alegerea valorii mediane a razelor dintr-o linie de scanare.

Se poate obține astfel o semnătură radială a piesei inspectate, care reprezintă chiar profilul suprafeței de revoluție și care poate fi comparată foarte ușor cu o semnătură de referință.

2.1.2. Metode de verificare a produselor prin compararea hărților de profunzime

Pentru produsele cu suprafețe complexe, o verificare simplă se poate face prin comparația directă a hărților de profunzime, punct cu punct. Dezavantajul acestei metode este acela că poate supraestima diferența dintre cele două suprafețe în cazul regiunilor cu pantă abruptă, în special în cazul pereților verticali. Un exemplu de comparație directă este dat în Fig. 2.4, unde suprafața unei mașinuțe a fost realizată folosind o freză cu cap rotund. Prin simularea procesului de frezare, harta de profunzime obținută a fost comparată cu harta de profunzime ideală, iar diferența dintre cele două imagini evidențiază necesitatea unei prelucrări suplimentare folosind fie o freză cu diametru mai mic, fie o freză cu profil cilindric datorită existenței pereților verticali.

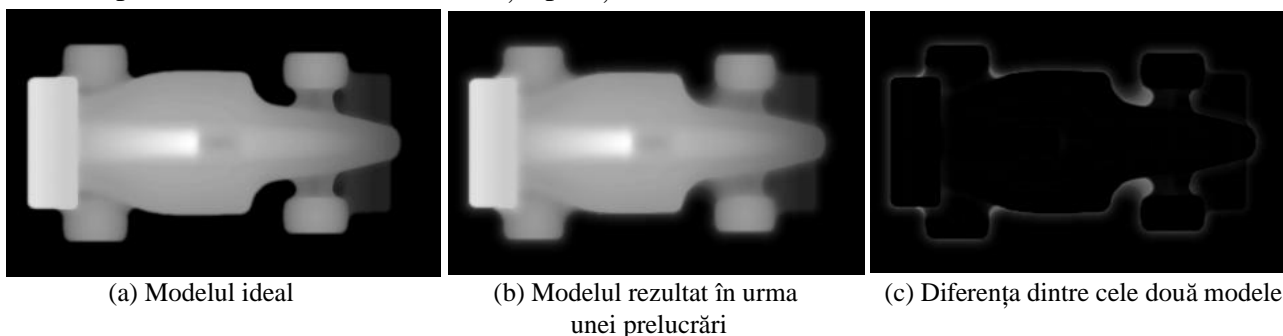


Fig. 2.4. Comparația directă a hărților de profunzime.

O comparație mai precisă presupune calculul distanței de la fiecare punct al hărții de profunzime de referință la cel mai apropiat punct al hărții verificate. Acest lucru presupune transformarea coordonatelor codate (pixeli + nivel de gri) în 3D (X,Y,Z) pentru efectuarea comparației, și este necesară testarea unei vecinătăți circulare în jurul punctului curent, a cărei rază este dată de diferența dintre coordonatele Z ale punctului curent pe cele două hărți de profunzime comparate.

Comparația poate fi făcută doar dacă cele două hărți de profunzime sunt achiziționate din aceeași orientare (yaw, pitch, roll) a senzorului față de produsul testat. Pentru produsele care vin pe palete fixate în suporturi, această restricție nu reprezintă o problemă.

Pentru produsele care prezintă o bază plană, astfel încât orientarea acestora diferă doar printr-o rotație în plan, alinierea celor două hărți de profunzime în vederea comparării se poate face doar printr-o operație de translație și rotație în plan, fiind necesară estimarea a 3 parametri: (x, y, θ) .

2.2. Implementarea tehnicilor de verificare a calității

Tehnicile de verificare a calității produselor au fost implementate după cum urmează:

- măsurătorile directe asupra datelor 2D au fost implementate sub forma unor funcții Matlab care comandă achiziția unei linii de scanare și afișează rezultatul numeric și reprezentarea grafică a setului de date din care s-a obținut măsurătoarea
- tehnicile de inspecție a produselor prin analiza și compararea hărților de profunzime au fost implementate folosind programul de vedere artificială AdeptSight
- metoda de verificare a produselor obținute prin strunjire (cu suprafețe de revoluție) a fost implementată folosind interfața robot - CNC, scanarea produsului având loc cu piesa montată în mașina de prelucrare.

2.2.1. Interfața cu programul de vedere artificială AdeptSight

Pentru a implementa funcțiile de verificare a calității produselor prin analiza hărților de profunzime a fost creată o interfață software între programul de vedere artificială AdeptSight și programul de digitizare a suprafețelor 3D prin scanare laser.

Legătura între programul de scanare și AdeptSight funcționează astfel:

- un program principal comandă începerea scanării pe o traiectorie predefinită, iar în urma acesteia rezultă o hartă de profunzime, salvată în format JPG.
- harta de profunzime este încărcată în AdeptSight printr-un driver realizat folosind kitul de dezvoltare software (SDK) de la Adept, în limbajul C#.
- rezultatele AdeptSight sunt salvate într-un fișier text, implicit “results.txt”, care este citit și interpretat de programul principal.

Interfața cu AdeptSight implementată în C# furnizează un driver de cameră 2D care va citi harta de profunzime și conține următoarele funcții:

- GrabImage: funcția citește harta de profunzime în format JPG și o convertește în format bitmap
- ShowProperties: afișează dialogul de configurare pentru selecția fișierului JPG folosit
- GetResolution: returnează rezoluția hărții de profunzime
- BitsPerPixel: returnează adâncimea de culoare (8 biți)
- DeviceName: returnează numele driverului (Image From Jpeg)
- OutputSource: returnează tipul imaginii, în cazul de față OutputSourceType.Grayscale.

O prezentare detaliată a tehnicilor de verificare a calității produselor prin scanare 3D a fost publicată în lucrarea [8].

Bibliografie

- [1] Anamaria Dogar, Integrating 3D Quality Control Function into an Automated Visual Inspection System for Manufacturing Industry, *Lucrare trimisă la Buletinul Stiintific UPB*, 2009
- [2] Barata,J.,2005.Coalition Based Approachfor ShopFloor Agility, OrionEd. Amadora, Lisbon.
- [3] Sauer O., Automated engineering of manufacturing execution systems – a contribution to “adaptivity” in manufacturing companies, *Proceedings of DET2008 5th International Conference on Digital Enterprise Technology Nantes, France 22-24, October 2008*
- [4] Borangiu Th., Gilbert P., Ivanescu N.A., Rosu A.: An implementing framework for holonic manufacturing control with multiple robot-vision stations, *EAAI*, 22, 4-5, Elsevier, June 2009, p. 505-521
- [5] Rahimifard, S., 2004. Semi-heterarchical production planning structures in the support of team-based manufacturing, *International Journal of Production Research*, 42, 17, September 1, 3369-3382(14), Taylor and Francis Ltd.
- [6] Brussel H.V., Wyns J., Valckenaers P., Bongaerts L., Peeters P.: Reference Architecture for Holonic Manufacturing Systems: PROSA, *Computers in Industry*, Volume 37, Issue 3 (November 1998), Special issue on manufacturing systems, Pages: 255 – 274, 1998, ISSN:0166-3615
- [7] Nylund H., Kai Salminen, Paul H Andersson, A multidimensional approach to digital manufacturing systems, *Proceedings of DET2008 5th International Conference on Digital Enterprise Technology Nantes, France 22-24 October 2008*
- [8] Raileanu, S., Berger, Th., Sallez, Y., Borangiu, Th. and D. Trentesaux, The Open-Control Concept in a Holonic Manufacturing System, *Proc. of the 18th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region - RAAD, Brasov, Romania, May 25-27, ISBN 978-606-521-315-9, pp. 86, ISSN 2066-4745, 2009*
- [9] Leitao,P.,Restivo,F.,2006.ADACOR:A Holonic architecture for agile and adaptive manufacturing control.*Computers in Industry*57(2),121–130.
- [10] Frühwirth R, Strandlie A et.al. (2003). A review of fast circle and helix fitting. *Nuclear Instruments, and Methods in Physics Research*, vol. A 502, pp. 705-707.