

Universitatea Politehnica din Bucuresti
Facultatea de Automatica și Calculatoare

Tehnici Avansate de Prelucrare a Imaginilor pentru Optimizarea Controlului de Calitate Asistat

Advanced Techniques of Image Processing for Optimization of Assisted Quality Control

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC
Prof. dr. ing. Theodor Borangiu

AUTOR
Ing. Anamaria Dogar

- 2009 -

Cuprins

1. Introducere	3
1.1 Obiectivele tezei de doctorat	3
1.2 Descrierea capitolelor tezei de doctorat	5
2. Stadiul actual al sistemelor de inspecție vizuală automata (SIVA). Criterii de alegere a componentelor SIVA	6
2.1 Structura sistemelor de vedere artificiala 2D moderne	6
2.2. Set de specificații functionale in proiectarea unui sistem de vedere artificiala 2D	7
2. Configurarea mediului de operare al sistemelor de vedere artificiala pentru control de calitate	11
2.1 Proiectarea și implementarea sistemului de iluminare	11
2.2 Alegerea și configurarea camerelor video. Analiza tipurilor de rezoluție	12
2.3 Configurarea parametrilor de achiziție a imaginii și sesiuni de calibrare camera robot	15
3. Metode, algoritmi și tehnici de realizare a funcțiilor de măsurare bazate pe trăsături extrase din imagini 2D	17
3.1 Definirea tipurilor de trăsături – punct de tip ancora	17
3.2 Utilizarea trăsăturilor punct de tip ancora in aplicații de măsurare pentru controlul de calitate	18
4. Sisteme de inspecție a geometriei bazate pe descrierea 3D a formelor și primitive de măsura	21
4.1 Arhitectura sistemului de scanare laser	21
4.2 Planificarea traiectoriilor de scanare in vederea optimizării procedurii de inspecție 3D	24
4.3 Proiectarea și implementarea primitivelor de măsura 3D	28
5. Integrarea controlului de calitate prin vedere artificiala in sisteme de fabricație holonica	31
5.1 Arhitectura sistemului holonic de fabricație	31
5.2 Integrarea controlului de calitate 2D și 3D in platforma de fabricație flexibila	33
6 Concluzii	37
6.1 Contribuții importante ale tezei de doctorat	37
6.2 Noi direcții de cercetare in viitor	39
Bibliografie (selecție)	40

1. Introducere

În ultimii ani, cerințele de calitate din industrie au fost din ce în ce mai crescute, concomitent cu diversificarea criteriilor de inspecție a produselor, creșterea numărului de produse inspectate dintr-un lot de fabricație, a complexității taskurilor de control în vederea obținerii unei informații cât mai complete despre produse și a frecvenței de realizare a inspecțiilor interfazice în fluxul de fabricație, cu scurtarea intervalelor de inspecție și impunerea asigurării trasabilității produselor.

Din considerente economice, se impune totodată ca aceste cerințe de control de calitate să afecteze cât mai puțin bugetele și timpurile de producție, ceea ce a condus la necesitatea găsirii unor soluții de inspecție *in line*.

În plus, odată cu micșorarea continuă a intervalelor de timp de upgradare și îmbunătățirea produselor, apare necesitatea reducerii timpurilor de proiectare, a creșterii gradului de reutilizare selectivă a reperelor din produse complexe sau a unor părți din aceste repere, ceea ce a condus la necesitatea găsirii unor soluții de prototipare rapidă și de integrare a proceselor de proiectare și inginerie asistată (CAD, CAE) într-un flux informațional complet – de la digitizarea 3D a formelor complexe până la generarea programelor de prelucrare pe mașini cu comandă numerică.

Extensia controlului manipularii tradiționale a materialelor la funcții de condiționare a materialelor, permite atât relaxarea constrângerilor impuse sistemelor de transport și manipulare de către fluxul de materiale și procesele de prelucrare, cât și *integrarea în timp real a controlului calității* în sistemul global de fabricație. Această extensie funcțională devine posibilă în arhitectura robot-vedere artificială prin: (i) o descriere consistentă a fluxului de materiale printr-un set eficient de trăsături de tip formă, suprafață și poziție a pieselor în circulație, bazată pe prelucrarea de mare viteză, în timp real a imaginilor și (ii) aplicarea conceptelor Inteligenței Artificiale pentru obținerea unui comportament autonom global, de auto-învățare, dependent de sarcini și de context al sistemului robotizat de fabricație cu adaptare la mediul de lucru. Unitățile Robot-Vedere reprezintă componente inteligente ale viitoarelor sisteme inteligente și autonome de producție și transport.

1.1 Obiectivele tezei de doctorat

Sistemele de inspecție vizuală 2D și 3D propuse în această teză încearcă să răspundă acestor deziderate de îmbunătățire și diversificare a metodelor, tehnicilor și soluțiilor

de control de calitate bazat pe inspecție vizuală automată (IVA) cu camere video și dispozitive de scanare laser, propunându-se să furnizeze soluții complete de control al produselor în structuri de fabricație flexibilă, agile la dinamica cerințelor de inspecție și trasabilitate.

Concepția, proiectarea și implementarea sistemelor IVA sunt orientate către principiul de descriere a componentelor fluxurilor de materiale prin trăsături extrase din imagini achiziționate în timpul circulației acestor componente (materii prime, repere prelucrate, subansamble, montaje) pe sistemele de transport uzinal.

Un obiectiv major al tezei de doctorat constă în elaborarea de soluții pentru optimizarea controlului de calitate al produselor în mediul de fabricație. Obiectivul se axează pe integrarea sistemelor de vedere artificială 2D / 3D și dezvoltarea de strategii optime de inspecție în vederea îndeplinirii cerințelor de calitate și performanța impuse producătorilor.

Alte obiective principale ale tezei de doctorat constau în: analiza și definirea riguroasă a specificațiilor pentru proiectarea și implementarea sistemelor de vedere artificială în producție; proiectarea, dezvoltarea și implementarea de seturi de măsuratori bazate pe trăsături – punct de tip ancora pentru optimizarea controlului de calitate 2D al pieselor; propunerea unei arhitecturi de inspecție 3D ca soluție de înaltă precizie pentru inspecția de calitate și prototipare rapidă, astfel crescându-se flexibilitatea și adaptabilitatea la cerințe specifice de verificare și reproducere a sistemelor de producție.

Sistemul de inspecție vizuală automată propus oferă o soluție eficientă pentru aplicații de măsurare geometrică în timp real. El poate fi materializat cu grade de complexitate diferite – de la o simplă cameră video firewire, o bibliotecă de funcții de prelucrare a imaginilor și o interfață grafică utilizator (IVA_2D) la un ansamblu compus din dispozitiv de scanare laser, robot antropomorfic, dispozitiv de prezentare a pieselor, controlere multitasking, sistem de comunicație robust și sisteme de programe ce rulează în mod sincronizat (IVA_3D).

Soluțiile structurale și de prelucrare software a informațiilor despre forma și conturul produselor pot fi adaptate la cerințe de măsurare, inspecție și localizare particulare prin reconfigurare. Această concepție de proiectare, bazată pe principiul RDA (*Rapid Deployment Automation*) oferă flexibilitate necesară adaptării sistemului

IVA la sarcini specifice de control vizual de calitate, realizare de măsuratori de înaltă precizie și evaluare a amplasării corecte a subansamblelor prelucrate și montate.

Astfel, sistemul de asigurare a calității propus reprezintă o soluție optimă pentru platformele de fabricație ce trebuie să ofere control complet al calității, atât pentru produse de cost scăzut cât și pentru componente complexe cu detalii complicate de uzinare și asamblare/montaj.

Teza prezintă realizarea acestor obiective și descrierea soluțiilor propuse.

1.2 Descrierea capitolelor tezei de doctorat

Teza de doctorat este organizată în 6 capitole:

Capitolul 1 prezintă un studiu amanunțit al stadiului actual al sistemelor de vedere artificială 2D, cuprinzând o descriere completă a problematicei asigurării controlului de calitate a produselor cât și specificațiile funcționale pentru proiectarea și implementarea unor astfel de sisteme.

Capitolul 2 cuprinde descrierea sistemului de vedere artificială 2D dezvoltat și metode de configurare a parametrilor acestuia în funcție de tipul de aplicație și specificațiile de control în vederea funcționării la performanțe maxime.

Capitolul 3 constă în definirea, proiectarea și implementarea setului de trăsături-punct de tip ancora, care reprezintă o soluție eficientă pentru controlul de calitate 2D, atât din punctul de vedere al costului cât și al timpului de prelucrare. Pe baza trăsăturilor punct de tip ancora, sunt definite și implementate seturi de măsuratori și calibre de măsură pentru asigurarea calitatii produselor atât în timpul prelucrării cât și post-prelucrare.

În **Capitolul 4** este descrisă arhitectura sistemului de scanare laser proiectat și implementat pentru asigurarea inspecției vizuale 3D a produselor. Sunt prezentate metodele, algoritmi și procesele utilizate în integrarea dispozitivului de scanare laser, a robotului articulat vertical și a mesei rotative în celule de fabricație flexibile. O atenție deosebită a fost acordată procedurilor de calibrare robot – dispozitiv de scanare laser, în vederea achiziției exacte a datelor 3D și referențierii acestora într-un sistem unic de coordonate. O contribuție semnificativă o reprezintă definirea și dezvoltarea strategiilor de scanare în funcție de tipul aplicației, ținând cont atât de constrângerile hardware ale robotului, de constrângerile mediului de lucru (inclusiv obiectul de inspectat) cât și de cele impuse de dispozitivul de scanare laser. Sunt

descrise de asemenea în acest capitol etapele de îmbunătățire, referințiere și segmentare a norului de puncte, etape premergătoare fazei de inspecție. Sunt definite setul de primitive de măsură 3D pentru verificarea pe baza modelului și toleranțelor de calitate specificate a produselor.

Integrarea sistemelor de vedere artificială 2D și 3D în structura de fabricație cu control holonic reprezintă subiectul major tratat de **Capitolul 5**. Este prezentată arhitectura de control distribuit și implementarea acesteia cu integrarea funcțiilor de control al calitatii produselor.

Ultimul capitol al acestei teze, **Capitolul 6**, prezintă concluziile cu privire la metodele, tehnicile și algoritmiile folosite pentru integrarea funcțiilor de inspecție a calitatii în celule de fabricație flexibile.

2. Stadiul actual al sistemelor de inspecție vizuală automată (SIVA). Criterii de alegere a componentelor SIVA

2.1 Structura sistemelor de vedere artificială 2D moderne

Sistemele de vedere artificială moderne conțin platforme PC rapide și puternice, și aplicații software integrate, ceea ce face ca aceste sisteme să fie mai ușor de folosit și mult mai ieftine. Sistemele de vedere artificiale pot fi folosite într-o mare varietate de operații de fabricație pentru taskuri repetitive de inspecție în care este nevoie de acuratețe și fiabilitate.

Deoarece sistemele de vedere artificială sunt foarte diverse, componentele specifice variază de la sistem la sistem. Totuși, majoritatea sistemelor includ o sursă de intrare, optică, iluminare, senzori de piese, o placă de achiziție, o platformă PC, software de inspecție, I/E digitale și conexiune rețea. Iluminarea pieselor pentru achiziția optimă de date presupune surse de lumină externe. Astfel sistemele de iluminat sunt de forme și mărime variabile și cu intensități variate. Placa de achiziție sau de captură grafică, realizează interfatarea între unitățile de imagine și calculatorul stație. Placa de achiziție ia datele de imagine oferite de cameră într-un format digital sau analog și îl convertește într-o informație ce poate fi utilizată de PC (Fig. 1). Software-ul sistemelor de vedere artificială poate fi în diverse forme și poate avea o singură funcție (proiectat doar pentru o singură operație ca inspecție LCD, taskuri de

alinieri, etc.) sau multifuncțional (proiectat cu o serie de funcționalități: citire coduri de bare, calibrare, ghidare vizuală a roboților, verificarea prezenței, și altele).

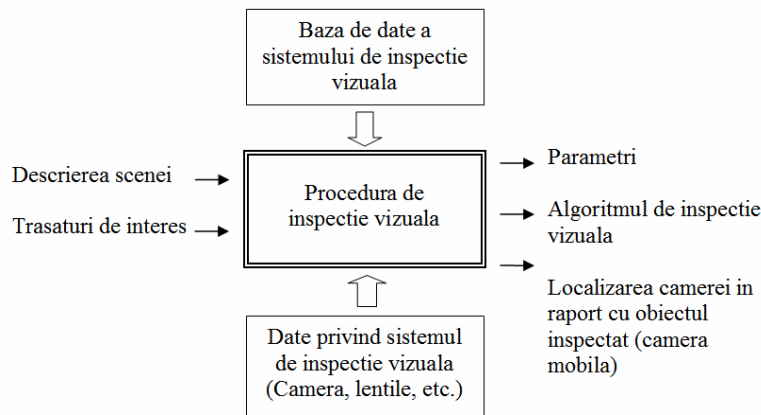


Figura 1 Arhitectura sistemului de inspecție vizuală 2D

Operațiile de inspecție fac parte din următoarele categorii: realizarea de măsurători și calibrări, recunoașterea și identificarea unor trăsături specifice, citirea caracterelor sau a informației încodate, detectarea prezenței unui obiect sau marcaj, compararea unui obiect cu un model sau ghidarea unei mașini sau unui robot.

Un sistem de vedere artificială este atât de puternic pe cât de puternice sunt componentele individuale. Orice limitare făcută în timpul procesului de selecție – în special la optica și achiziția de imagine – poate reduce semnificativ eficacitatea sistemului. Selectarea camerei este direct legată de cerințele aplicației și de obicei implică trei mari criterii: imagine specifică, dacă obiectele inspectate sunt în mișcare și rezoluția cerută.

2.2. Set de specificații funcționale în proiectarea unui sistem de vedere artificială 2D

În dezvoltarea oricărui sistem de inspecție vizuală automată se începe cu ceea ce este cunoscut, și de acolo se determină în continuare care sunt componentele necesare sistemului. În timp ce configurația sistemului însuși este o necunoscută compusă din elemente ce trebuie determinate, sunt cunoscute intrările sistemului – piesele de prezentat sistemului de vedere – și ieșirile acestuia. Aceste informații sunt bazate pe specificații funcționale.

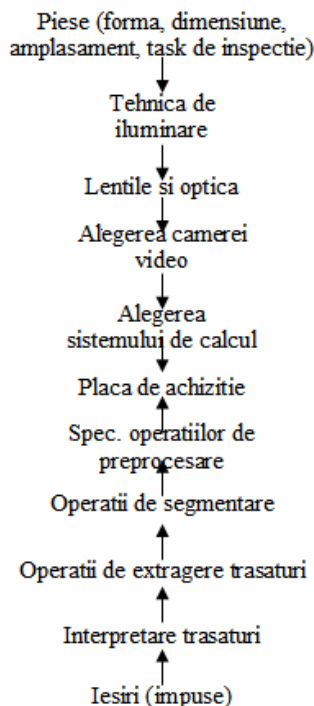


Figura 2 Dezvoltarea progresiva a sistemului de inspecție vizuală automata

Aceasta dezvoltare in progresie (Fig. 2) este in general rezonabila, dar exista și exceptii. De exemplu, nu este practic sa se aleaga o lentila inainte de a se alege camera. De asemenea, unele componente interactioneaza și trebuie alese impreuna. De exemplu, camera și placa de achiziție trebuie sa se potriveasca. In general, placa de achiziție și software-ul folosit trebuie sa fie compatibile. In plus, multe proiecte contin caracteristici unice care cer dezvoltatorului sa se abata de la acest ghid.

Succesiunea etapelor : Lansare proiect, Planul de baza, Studiu de fezabilitate, Realizare sistem performant impune specificatiile urmatoare, care trebuie considerate și urmate in proiectarea și implementarea sistemului de vedere artificiala 2D pentru o caracterizare completa a mediului de lucru, aplicațiilor și performantelor cerute:

- ❑ *Descriere generala* – include modul in care de executare a unui task (a unei operații) curent(e) de tip inspecție vizuală automata (AVI), ghidare vizuală a robotului (GVR), sau mixt AVI-GVR, și ce beneficii sunt preconizate de la sistemul robot-vedere artificiala DVAIRP pentru o aplicație particulara.
- ❑ *Definirea obiectelor*: dimensiuni, "culoare", gradul de reflexie al suprafetelor, variatii predictibile de amplasare, numar maxim de obiecte in scena.
- ❑ *Definirea modulelor hardware de achiziție a imaginilor*.

- ❑ *Prescrierea valorilor parametrilor de configurare pentru sistemul de iluminare.*
- ❑ *Calibrarea camera – partener de aplicație* (ex. camera – robot): evaluează parametrii de transformare a coordonatelor imagine în coordonate de referință (ale lumii reale). Aceasta este echivalent cu determinarea transformării relative între sistemul de coordonate asociat câmpului vizual și sistemul de referință al partenerului de aplicație.
- ❑ *Cerințe de performanță:* rata de apariție a obiectelor, rezoluție de măsură, back-up și revenire din situații de blocare/avarie.
- ❑ *Prezentarea obiectelor/produselor:* modul în care produsele sunt introduse în câmpul vizual al camerei (camerelor), grad de cunoaștere al tipului și precedentei de apariție în scenă a obiectelor, a riscului de atingere sau suprapunere a obiectelor.
- ❑ *Dimensiunile și amplasarea câmpului vizual* (pentru scene cu obiecte staționare și în mișcare).
- ❑ *Comunicatia sistemul central de control (SCC) – SIVA*
 - Colectarea datelor necesare ce trebuie transferate către SCC;
 - Transferul pachetelor de date către SCC utilizând canalul de comunicație LAN;
 - Colectarea pachetelor de date recepționate de la SCC;
 - Distribuirea datelor primite de la SCC celorlalte procese din sistemul de VA
- ❑ *Interfața utilizator*
 - Interfața utilizator pentru Configurarea Camerelor Virtuale
 - Interfața utilizator pentru Calibrare Camera-Robot
 - Interfața utilizator pentru definirea măsurătorilor relativ la trăsăturile-ancora
 - Interfața utilizator pentru învățarea modelelor: de recunoaștere, de prindere, de evitare a coliziunilor
 - Interfața utilizator pentru monitorizarea și reactualizarea parametrilor de achiziție și prelucrare a imaginilor
 - Interfața utilizator pentru testarea validității și a performanțelor sistemului

- ❑ *Utilitati disponibile:* alimentare electrica, aer comprimat, dispozitive de fixare / depozitare / transfer
- ❑ *Mediu de lucru* – iluminare ambientala, temperatura, umiditate, impuritati, proceduri de curatire
- ❑ *Interfete cu echipamentele (I/E)* – tipul retelei de comunicatie locala și al echipamentelor cu care are loc comunicatia locala
- ❑ *Interfața cu operatorul (om-mașina)* – afisare, comenzi de urgenta, prioritati operator
- ❑ *Cerințe de suport tehnic:* instruire, mentenanța, upgrade
- ❑ *Modificari viitoare estimate de-a lungul ciclului de viața al produsului* (pe etape)
- ❑ *Testarea validitatii și a performanțelor sistemului* (test de acceptanta), teste asupra capacitatii de operare multitasking corecta a SVA dupa operații AVI și GVR:
 - *Interfața utilizator* – exista și sunt functionale toate componentele de control și afisare date și imagini ?
 - *Operații de baza* – pot fi realizate procedurile prevazute ?
 - *Precizie și repetabilitate* – produce sistemul de vedere artificiala rezultate de calitate ?
 - *Productivitate* – indeplineste sistemul de vedere artificiala cerințele de viteza ?
 - *Senzitivitate* – schimbari minore in mediul de lucru sau in setarile camerelor virtuale determina variatii de performanta majore ?
 - *Mentenabilitate* – procedurile de baza de mentenanța (de exemplu inlocuirea unei surse de lumina, a unui obiectiv) și procedurile de calibrare sunt usor de realizat ?
 - *Disponibilitate* – ce procent de timp este disponibil sistemul pentru utilizare ?

2. Configurarea mediului de operare al sistemelor de vedere artificială pentru control de calitate

2.1 Proiectarea și implementarea sistemului de iluminare

Sistemul de vedere artificială 2D pentru controlul de calitate integrat în celule flexibile de fabricație este compus din următoarele componente:

- ❑ *Camere video matriciale industriale* 640 x 480 pixeli cu obiective de 16, 25 și 50 mm.
- ❑ *Terminale Robot-Vedere Artificială*
- ❑ *Sistem de iluminare a scenei*: directă și în diascopie, surse multiple de lumină (de exemplu neon)
- ❑ *Mediul de execuție a aplicațiilor*: mediu structurat de tip multi-aplicație – (de exemplu AdeptWindows, AdeptSight)

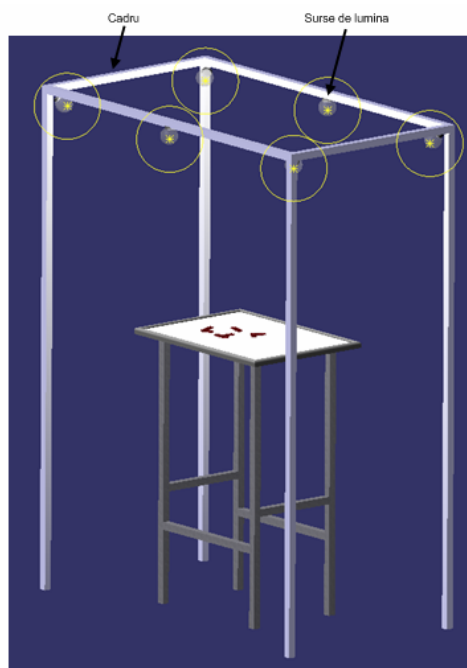


Figura 3 Sistem de iluminat cu multiple surse de lumină

În ceea ce privește proiectarea și validarea sistemului de iluminare a scenei s-au folosit două camere industriale Basler A601f. Una dintre ele este montată pe link-ul 2 al unui robot Adept Cobra s600, cealaltă este montată pe un suport construit din profile de aluminiu; ambele camere sunt orientate în jos (*downlooking*). Sistemul de iluminare testat și validat ca soluția aleasă pentru sistemul de vedere artificială

proiectat și integrat în platforma de fabricație este bazat pe două tipuri de iluminări: iluminare difuză și în diascopie (vezi Figura 3)

2.2 Alegerea și configurarea camerelor video. Analiza tipurilor de rezoluție

Pentru aplicațiile de inspecție vizuală automată este necesară parcurgerea secvenței de proiectare (specific imagisticii) de bază compusă din următorii pași, în vederea controlului de calitate al produselor:

- Alegerea tipului de camera video – matricială sau liniară
- Alegerea direcției de vedere a camerei și calculul cimpului vizual (de vedere, FOV – *Field of View*)
- Evaluarea rezoluției necesare
- Estimarea caracteristicilor de viteză de procesare
- Selectarea camerei video și a obiectivului (+ eventual extensiei mecanice)

Pentru alegerea direcției de vedere a camerei video matriciale (CVM) este necesară cunoașterea unui număr de aspecte: (i) unde sunt amplasate pe produs trăsăturile de interes; (ii) ce trăsături pot determina (dacă este cazul) ambiguități pentru SIVA, și unde sunt localizate; (iii) localizarea produselor (gradul de cunoaștere/restricționare a poziției și orientării obiectelor, variații previzibile de amplasament); (iv) dispozitive care restricționează (eventual) poziția CVM (de exemplu bratul robotului). Aceste date trebuie să fie disponibile din specificațiile inițiale.

Pentru calculul campului vizual (FOV), cunoașterea tipului de CVM și a direcției de vedere furnizează o informație suficientă. Dimensiunea FOV într-o direcție va fi obținută din ecuația

$$FOV = (D_p + L_v)(1 + P_a)$$

unde:

- FOV este dimensiunea necesară a cimpului vizual de-a lungul unei direcții: H (*horizontal*) sau X, respectiv V (*vertical*) sau Y;
- D_p este dimensiunea maximă a obiectului în direcția H sau V a FOV;

- L_v este variatia maxima tinind cont de translatia și orientarea conjugate ale obiectului;
- P_a este factorul de expandare a FOV [%] estimat din considerente tehnologice.

Dimensiunea maxima a obiectului, D_p și variatia totala de amplasament estimata L_v trebuie sa fie disponibile din specificatiile initiale ale aplicației.

Factorul de expandare a FOV, P_a , deriva dintr-o judecata inginereasca. Este evident ca nu este de dorit niciodata ca trăsături importante in imagine sa fie in contact sau sa depaseasca limitele analizabile ale imaginii, dupa cum nu este practica o CVM ce trebuie aliniata și mentinuta la nivel de pixel in raport cu un detaliu al obiectului analizat. O alegere obisnuita pentru P_a este 10%.

Referitor la evaluarea rezoluției necesare, trebuie considerate 5 tipuri de rezoluție in SIVA:

- *Rezolutia imaginii*: este data de numarul de linii și coloane de pixeli din imagine, fiind determinata de tipul camerei (și implicit al senzorilor sai) și de frame grabber. Pentru sistemul implementat, rezolutia imaginii este de 640 x 480 pixeli. Atunci cind CVM și frame grabber-ul sunt comandate de același ceas, exista o corespondenta 1 la 1 intre pixelii produși de camera video și cei furnizati de frame grabber procesorului de prelucrare a imaginilor.
- *Rezolutia spatiala*: este spatierea intre centrele pixelilor atunci cind acestia sunt raportati (mapati) la scena; ea este exprimata prin raportul dimensiunii fizice in standard SI [mm] per pixel (de exemplu 0.5 mm/pixel). Rezolutia spatiala este determinata de rezolutia imaginii și de marimea cimpului vizual. Pentru o rezoluție a imaginii data, rezolutia spatiala depinde de FOV sau de amplificarea produsa de optica obiectivului camerei.
- *Rezolutia trăsăturilor*: este exprimata prin cea mai mica trăsătura vizualizata in mod sigur de sistem. O limita practica confirmata in SIVA este de 3-4 pixeli care acopera trăsătura de dimensiune minima detectabila intotdeauna. Aceasta limita de detectabilitate certa a trăsăturilor presupune insa un bun contrast și un zgomot redus in imaginile achiziționate. Daca imaginea are un contrast prost sau nivelul de zgomot este ridicat, este necesar un numar mai mare de

pixeli pentru a detectata cu certitudine maxima o trăsătura (de tip muchie sau punct).

- *Rezolutia de măsura*: este cea mai mica modificare in dimensiunea sau amplasamentul unui obiect care poate fi detectata; este exprimata ca o dimensiune liniara (de exemplu 0.1 mm). Din statistica teoretica și aplicata se stie ca daca sunt efectuate N observatii (măsuratori) fiecare cu o eroare asociata ε , atunci eroarea medie este $\sqrt{\varepsilon / N}$. Rezolutia de măsura ce poate fi atinsa depinde de algoritmi de calcul la nivel de subpixel (1/10 pixel este o rezoluție de măsura ce poate fi atinsa). Rezolutia de măsura este echivalenta cu repetabilitatea unei măsuratori. Cea mai mare parte dintre specificatiile functionale indica fie toleranța unui obiect, fie precizia cu care acesta trebuie sa fie măsurat. In mod obisnuit, cerințele de măsurare pentru SVA sunt specificate cu o precizie de 4-5 ori mai buna decit toleranța, și rezolutia de 4-5 ori mai buna decit precizia, deci un raport total rezoluție/toleranța de cca 20.
- *Rezolutia unui pixel*: este granularitatea in reprezentarea fiecarui pixel, adica rezolutia pe scara nivelelor de gri cu care poate fi reprezentat un pixel. Pentru SIVA, rezolutia unui pixel (cuantificarea) este de 128 de nivele de reprezentare a imaginilor monochrome.

Cerințele unei aplicații de CAQC (Computer Aided Quality Control) cu SIVA furnizeaza informațiile din care se va determina rezolutia trăsăturilor impusa, rezolutia de măsura impusa, sau ambele. Vor fi folosite urmatoarele relatii de calcul:

$$R_s = FOV/R_i \text{ sau } R_i = FOV/R_s$$

$$R_m = R_s \cdot M_p \text{ sau } R_s = R_m / M_p$$

$$R_f = R_s \cdot F_p \text{ sau } R_s = R_f / F_p,$$

unde

- R_s este rezolutia spatiala, poate fi in lungul axei $H(X)$ sau $V(Y)$;
- FOV este dimensiunea cimpului vizual (in X sau Y);
- R_i este rezolutia imaginii, exprimata prin numarul de pixeli într-o linie (dimensiune in X) respectiv coloana de imagine (dimensiune in Y);

- R_m este rezolutia de măsura dorita, exprimata in unități fizice (de exemplu milimetri);
- M_p este rezolutia de măsura a sistemului de vedere artificiala exprimata in pixeli sau fractiuni de pixel;
- R_f este rezolutia trăsăturilor (cea mai mica trăsătura ce trebuie detectata și extrasa in mod sigur din imagine), exprimata in unități fizice [mm];
- F_p este numarul de pixeli care formeaza trăsătura de dimensiune minima.

2.3 Configurarea parametrilor de achiziție a imaginii și sesiuni de calibrare camera robot

In mediul de programare AVI se pot configura parametrii software și electrici ai camerei video fizice, creand astfel camerele video virtuale, sub-componente ale holonului resursa "vedere".

Platformele AVI suportă un număr maxim de 4 camere video *fizice* cărora le pot fi asociate un număr maxim de 32 de camere virtuale. Fiecare cameră virtuală reprezintă un set individual de comutatoare și parametri sistem, de date de calibrare cameră – robot și o coadă VA (*vision queue*) – vezi Figura 4.

O cameră fizică poate avea asociate până la 32 de camere virtuale. Numărul unei camere fizice este determinat de portul la care este conectată camera respectivă la placa procesoare VA AVI, în timp ce numărul camerei virtuale (și camera fizică asociată) este specificat în timpul calibrării cameră – robot sau când datele de calibrare (anterior realizată) sunt încărcate în memoria activă a sistemului. O singură cameră fizică poate fi asociată unei camere virtuale definite. [2]

Procedura de creare a camerelor virtuale implica configurarea parametrilor software și electrici ai camerei fizice. Acești parametri se pot clasifica astfel: parametrii de limitare a campului de vedere, filtre de arie, detectare de muchii, gain/offset, praguri de binarizare și parametrii de accentuare a conturilor.

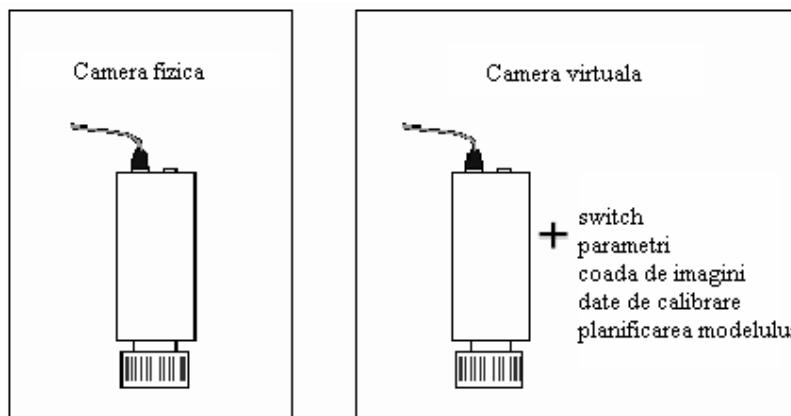


Figura 4 Relatia de asociere camera fizica – camera virtuala.

În cazul mediului software AdeptSight, se pot ajusta parametrii electrici și software ai camerei fizice video în vederea obținerii maximului de informație din imaginea achiziționată. Un dispozitiv de emulare se manifestă ca o camera virtuală pentru a simula achiziția imaginii, folosind imaginile dintr-o bază de date, care se numește de obicei fișier de emulare.

Construcția modelelor de calibrare camera-robot $S_m(cam, R, mount)$ a fost realizată în cadrul unor sesiuni off-line dedicate, bazate pe *proceduri interactive de învățare*.

Un număr de componente fizice ale holonului resursă VA influențează acuratența și repetabilitatea rezultatelor returnate la o rezoluție dată, după calibrarea ansamblului camera-robot: calitatea camerei și a senzorului CCD, optica, cablurile de semnal, și sistemul de iluminare (incluzând consistența sa).

După alegerea, configurarea, instalarea și *calibrarea* sistemului robot – vedere artificială, trebuie efectuată și o testare pentru a verifica faptul că sistemul de vedere artificială asigură măsurători cu precizia și repetabilitatea cerute.

Pentru a realiza calibrarea camera-robot trebuie parcurse două etape: calibrarea camerei video matriceale și calibrarea camera-robot. Calibrarea camerei video are ca rezultat valoarea raportului pixel/milimetru al imaginilor preluate de către camera, în timp ce rezultatul calibrării camera-robot este transformarea relativă camera-robot care descrie amplasamentul planului imaginii față de originea sistemului de coordonate din baza robotului. Ambele informații sunt memorate de sistemul de vedere, nefiind necesare alte intervenții ale utilizatorului pentru determinarea poziției de prindere a obiectelor învățate. [39]

3. Metode, algoritmi și tehnici de realizare a funcțiilor de măsurare bazate pe trăsături extrase din imagini 2D

3.1 Definirea tipurilor de trăsături – punct de tip ancora

Recunoașterea automată a unor trăsături este un subiect supus studiului încă de la apariția imaginilor digitale. În unele cazuri, în cadrul aplicațiilor de inspecție vizuală nu este necesară învățarea modelelor obiectelor de inspectat. În aceste tipuri de aplicații, obiectele inspectate pot să nu facă parte din aceeași clasă de obiecte, trăsătura de interes – trăsătura ancora fiind comună și fiind necesară unei etape intermediare în procesul de producție. Definirea, învățarea și recunoașterea unei trăsături ancora este mult mai puțin consumatoare de resurse, eficientizând aplicația din punct de vedere al puterii de calcul, de aceea este o metodă de inspecție de calitate utilizată atât în etapele intermediare cât și în cele finale ale prelucrării.

Această abordare este utilă nu numai în localizarea caracteristicilor individuale, dar combinate acestea pot localiza produsul sau realiza o evaluare calitativă a acestuia în funcție de un model (vezi Figura 5).

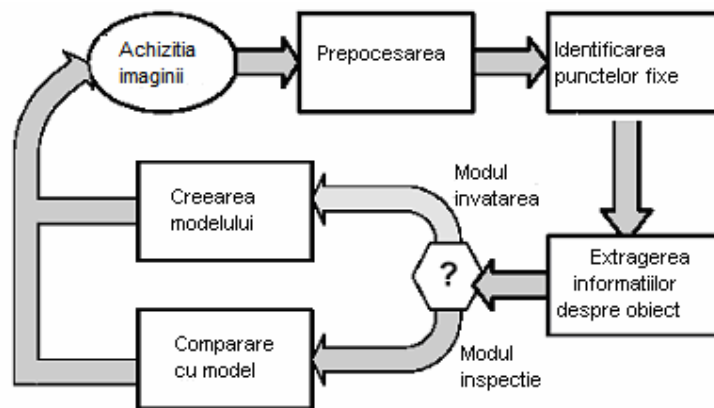


Figura 5 Realizarea funcției de Inspecție vizuală automată utilizând trăsături-ancora.

În aplicațiile de inspecție vizuală, utilizarea trăsăturilor ancora a fost într-un con de umbră. Deși are o largă utilitate și utilizare, puține din activitățile de cercetare tratează acest subiect. În aplicațiile de inspecție vizuală 2D a pieselor, marea majoritate a aplicațiilor utilizează modele a priori învățate și raportează setul de măsurători la valorile definite în cerințele de calitate. În ultimul timp, datorită

utilizării sporite a camerelor inteligente în aplicațiile de control al calitatii obiectelor trăsăturile ancora sunt utilizate în realizarea măsurătorilor. Un motiv este și că în cazul camerelor inteligente puterea de calcul este limitată la puterea procesorului camerei și aceasta este destul de redusă astfel încât optimizarea timpului de calcul și eficiența sunt absolut necesare în succesul aplicației. [15]

În cadrul acestui capitol s-au prezentat tipurile de trăsături ancora definite, etapele de învățare, recunoaștere și măsurare asociate inspecției vizuale prin trăsături ancora și setul de măsurători complexe efectuate pe baza trăsăturilor de tip punct învățate. Acest capitol tratează doar trăsăturile ancora de tip punct, unitatea de bază și setul de măsurători de bază pornind de la aceste trăsături. Se definesc trei clase majore de puncte de tip ancora:

- punct ancora de tip *centru de gaură*
- punct ancora *pe contur* (un *colt* al piesei inspectate)
- punct ancora *pe suprafață* (punct de intensitate particulară pe suprafață)

Fiecare dintre aceste tipuri de trăsături – punct sunt caracterizate prin proprietăți geometrice de tip poziție și/sau orientare în raport cu o referință invariantă la rotație și translație (axa de inerție minimă (AIM), centrul de masă al obiectului inspectat). Trăsăturile ancora învățate și detectate sunt folosite ca suport pentru realizarea de măsurători geometrice de bază în vederea controlului de calitate al componentelor materiale. Măsurătorile se realizează utilizând primitive de măsură predefinite ale sistemului de vedere artificială de tip rigle, predicate și calibre de măsură geometrică.

3.2 Utilizarea trăsăturilor punct de tip ancora în aplicații de măsurare pentru controlul de calitate

Punctele ca *trăsătura-ancora* sunt fie raportate la conturul obiectelor, caz în care pot fi referite la centrul de masă al obiectului prin coordonate polare, fie exprimate relativ la oricare altă trăsătură internă a unei regiuni prin offseturi ce sunt definite de utilizator.

În etapa de învățare, utilizatorul definește caracteristicile trăsăturii ancora, urmând că în etapa de recunoaștere sistemul să detecteze automat punctele de interes și pe baza acestora să realizeze măsurătorile geometrice de nivel scăzut/înalt.

În cazul trăsăturilor ancora de tip centru gaura, elementele frecvent utilizate în localizarea acestora sunt:

- Coordonatele x_c , y_c ale centroidului, unghiurile minime și maxime ale razei
- Centrele altor gauri
- Marginile și colturile conturului obiectului.

Măsurătorile implementate presupun determinarea distantelor și unghiurilor dintre centrele gaurilor sau localizarea gaurilor relativ la centrul de referință a altor gauri (vezi Figura 6).

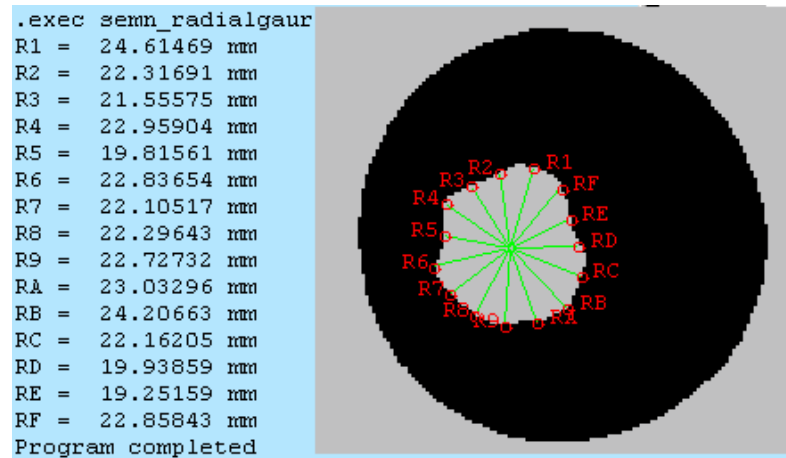


Figura 6 Semnatura radială a unei gauri oarecare.

În cazul în care obiectul nu are gauri interioare, pentru recunoașterea și inspecția acestuia se vor folosi puncte din interiorul conturului, cum ar fi un marcaj interior de arie mică. Acesta împreună cu centroidul piesei vor forma un vector referință care va stabili orientarea obiectului în fața model și va permite efectuarea măsurătorilor necesare inspecției în faza a doua. Învățarea acestei trăsături ancora efectuată pe imagini alb-negru este similară învățării unei trăsături de tip centru gaura, adăugându-se o etapă suplimentară în care imaginea este binarizată utilizând un prag de binarizare determinat astfel încât punctele aparținând marcajului să fie considerate albe.

Pentru obiectele care nu au particularități interne, se pot folosi ca trăsături ancora caracteristicile marginilor acestora. Principalele forme care le căutăm de-a lungul marginii sunt liniile drepte, respectiv segmentele de linie, arcele de cerc și punctele interesante cum ar fi colturile.

Un mod de a descrie formele de pe contur este prin alegerea unor puncte pe suprafața acestora ale caror coordonate le stabilim local, cum ar fi mijlocul sau capetele segmentului de linie, centrul cercului din care face parte arcul de cerc sau intersecția a doua linii, respective colturile. Odata realizata aceasta segmentare vom putea cauta și alte elemente caracteristice ale obiectului care pot fi folosite in procesul de inspecție. In figura 7 este prezentata detectia unui colt al obiectului cunoscand in prealabil unghiul pe care-l fac 2 margini ale acestuia. Coordonatele punctului vor fi stabilite radial fata de centroidul obiectului și vor fi memorate in procesul de modelare într-un vector Euclidian.

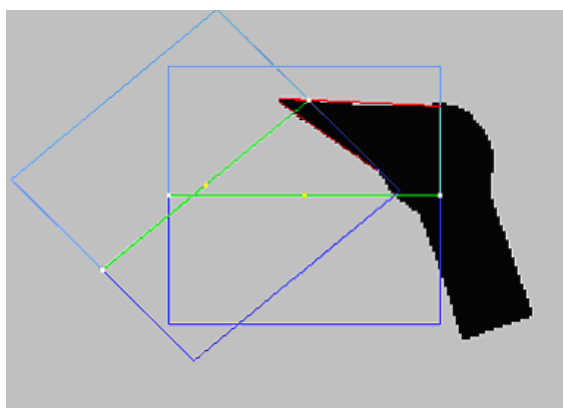


Figura 7 Detectarea trăsăturii ancora de tip colt prin utilizarea instrumentelor de detectie

Odata definite și extrase puncte, linii și arce de cerc ca trăsături-ancora, modele (*patterni*) simple de tipul: triunghi, dreptunghi, paralelogram sau disc circular pot fi specificate pentru măsurare de detalii pe obiecte in timpul cautarii de timp real. *Functiile* utilizate pentru măsuratori sunt bazate pe predicate de biblioteca de functii care se grupeaza in doua categorii: **predicate de recunoaștere de nivel primar** și **calibre de măsura** (Figura 8).

Predicatele și calibrele de măsura proiectate au fost integral implementate folosind mediul de dezvoltare V+ cu biblioteca AdeptSight de functii de prelucrare de imagini in conjunctie cu sisteme robot industriali Adept. [3]

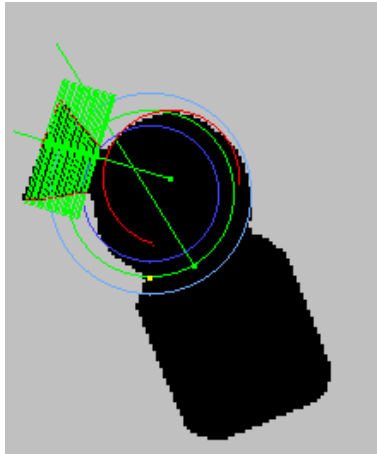


Figura 8 Folosirea trăsăturilor ancora pentru realizarea de măsuratori

Primitivele de măsura a detaliilor de geometrie (distanțe, unghiuri, orientări relative între drepte, apartenența unor puncte la interiorul unor regiuni, existența unor puncte particulare pe contur – colțuri, s.a.). cit și predicatele de măsura elaborate și implementate cu ajutorul bibliotecii AdeptVision vor fi utilizate în cadrul Sistemului de Inspecție Vizuală Automată proiectat ca elemente de baza pentru realizarea – prin combinare – a funcțiilor de control al calitatii produselor obținute prin prelucrare și asamblare/montaj.

4. Sisteme de inspecție a geometriei bazate pe descrierea 3D a formelor și primitive de măsura

4.1 Arhitectura sistemului de scanare laser

Sistemul propus pentru scanare, achiziție, aliniere și inspecție a datelor ce descriu suprafețe 3D este compus din următoarele elemente de baza:[21][23][24]

- *Dispozitiv de măsurare cu laser* (laser probe): sistem de achiziție, hardware și bibliotecă software de funcții de achiziție și prelucrare primară (îmbunătățire imagini, aliniere, eliminare puncte în exces, asociere culoare).
- *Braț robot articulat vertical* (antropomorfic) cu 6 grade de libertate (de exemplu Adept Viper s650) – sistem mecanic, controler multitasking, ghidare prin reacție vizuală de la camera firewire (GVR), modul de învățare, software de comandă mișcare robot, cu extensie GVR.

- *Masă rotativă* cu poziționare precisă în bucla de reglare a deplasării și vitezei de rotație

Masa rotativă este comandată ca axa externă de mișcare de controller-ul brațului robot, iar mișcarea mesei este sincronizată cu mișcarea robotului. Cu alte cuvinte, robotului are adăugat un grad de libertate suplimentar (al 7-lea). Utilizarea mesei rotative este necesară deoarece brațul robot nu poate ajunge în spatele obiectului fără a provoca o coliziune.

Din punct de vedere al procedurii de inspecție vizuală 3D, piesele pot fi inspectate direct pe paleta pe bandă de transport sau pe masa rotativă. În cazul prezentării pieselor pe banda transportoare, trebuie considerate și eliminate punctele aferente mecanismelor de fixare și transport. În cazul obiectelor cu suprafața complexă, este de preferat ca inspecția de calitate 3D a obiectului să fie executată folosind masa rotativă. Utilizatorul (sau robotul) așează obiectul scanat în centrul mesei rotative și își va alege o strategie de scanare, predefinită sau adaptivă pe baza modelului CAD existent, urmând ca obținerea modelului tridimensional al obiectului analizat să se realizeze automat.

Dispozitivul de scanare laser ales este tip laser Clasa II de distanță scurtă, cu triangulație, având doi senzori de achiziție CMOS. În general dispozitivele de scanare prezintă doar un senzor, soluția propusă fiind ideală pentru scanarea suprafețelor complexe. Distanțele optime de scanare sunt cuprinse între 71 mm și 242 mm. Lățimea liniei de scanare variază între 31 și 83 mm. Precizia medie de măsură la nivel de punct este de 31 μm . Rata de achiziție este cuprinsă între 50 și 150 cadre pe secundă, iar numărul de puncte citite pe o linie de scanare este egal cu 480. Acest sistem de achiziție laser se interfațează cu PC-ul folosind un port USB standard, și dispune de un semnal digital RS485, care poate fi folosit pentru sincronizarea cu controller-ul robotului.

Sistemul robot folosit pentru baleierea razei laser este un robot articulată vertical cu 6 grade de libertate. Repetabilitatea mișcării brațului robot este de 0.02 mm. Domeniile de deplasare (6 axe, 6 articulații de rotație) ale sistemului robot sunt: axa (articulația) 1: $\pm 170^\circ$, axa (articulația) 2: $-170^\circ, +45^\circ$, axa (articulația) 3: $-29^\circ, +256^\circ$, axa (articulația) 4: $\pm 190^\circ$, axa (articulația) 5: $\pm 120^\circ$, axa (articulația) 6: $\pm 360^\circ$. Viteza maximă compusă la varf este 8200 mm.

Pentru integrarea dispozitivului de scanare cu bratul robot au fost dezvoltate următoarele module software:

- *Encoder Latching Server*: asigura integrarea scanner-ului laser cu bratul robotic, comunicand pozitia instantanee a robotului către software-ul de achiziție Surveyor Scan Control.
- *Generator de traiectorii*: calculeaza traiectoriile dupa care va fi efectuata scanarea, in functie de strategia selectata de utilizator.
- *Interfața grafica cu utilizatorul*, care va rula pe PC.

Intrucat in urma testelor efectuate se poate citi la fiecare 1 milisecunda pozitia sistemului robot, *rata de achiziție* este cea a dispozitivului de scanare.

Precizia măsurătorii este de ordinul zecilor de microni, intrucat atat dispozitivul de scanare cat si bratul articulat sunt dispozitive de înaltă precizie. [26]

Timpul de scanare estimat pentru o suprafața simpla:

- a) Scanare rapida, cu rezolutia de 1 mm:
 - $2500 \text{ mm}^2/\text{s}$ cu o viteza de inaintare de 50 mm/s și o rata de achiziție de 50 de cadre/secunda;
 - O suprafața de $50 \times 50 \text{ mm}^2$ va fi scanata într-o secunda.
- b) Scanare precisa, avand rezolutia de 50 μm :
 - $375 \text{ mm}^2/\text{s}$, cu o viteza de inaintare de 7.5 mm/s și o rata de achiziție de 150 cadre/secunda;
 - o suprafața $50 \times 50 \text{ mm}^2$ va fi scanata in 7 secunde.

Timpii de scanare au fost calculati in conditiile in care latimea medie a liniei de scanare este de 50 mm.

Avand dispozitivul de scanare montat in flansa bratului robot, se considera ca obiectul scanat poate fi marginit de un cilindru vertical, avand diametrul și inaltimea maxima specificate dupa cum urmeaza:

- pentru scanare completa de deasupra, inaltimea maxima a piesei este de 200 mm, și este impusa atat de distanta maxima de scanare a dispozitivului laser, cat și de constrangeri datorate miscarii robotului. Diametrul maxim al piesei este de 450 mm.

- pentru scanare din lateral, diametrul maxim este de 200 mm, iar înălțimea maximă este de 500 mm. Restricția de 200 mm este din cauza necesității unei distanțe minime între dispozitivul de scanare și piesa.
- pentru scanare combinată, din lateral și de deasupra, diametrul maxim este de 200 mm, iar înălțimea maximă de 200 mm.

În urma studiului realizat și a programelor de test executate, se propune următoarea structură hardware și software a sistemului de scanare laser adaptiv și de înaltă precizie (Fig. 9).

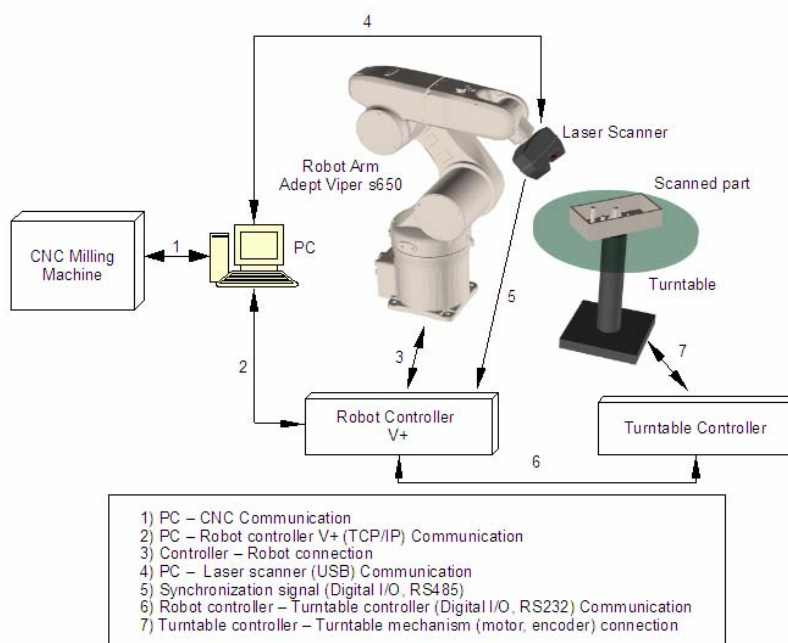


Figura 9 Structura hardware și software a sistemului de scanare laser și procesare 3D a obiectelor.

4.2 Planificarea traiectoriilor de scanare în vederea optimizării procedurii de inspecție 3D

Platforma de fabricație flexibilă combină diverse componente pentru a oferi o soluție eficientă pentru realizarea de măsurători în timp real în vederea asigurării controlului de calitate al produselor. Soluția propusă și implementată oferă flexibilitatea necesară adaptării la sarcini de inspecție vizuală specifice și măsurători de înaltă precizie.

Platforma propusă este soluția optimă pentru industria de fabricație aflată sub presiunea de a livra produse de calitate, de la piese de cost scăzut la produse cu forma

complexa. Inspecția pieselor prelucrate este realizată implicit de către sistemul de vedere artificială 2D. Acesta oferă o precizie a măsurătorii de până la 0.007 mm. În cazul în care cerințele de calitate sunt de înaltă precizie sau necesită măsurători complexe (trăsături conice, profile sau alte dimensiuni critice) soluția propusă este reprezentată de către sistemul de scanare 3D compus din bratul robot articulat vertical, dispozitivul de scanare și masa rotativă. Aceasta soluție oferă flexibilitatea și adaptabilitatea sistemului de control al calității cât și o precizie de microni.

Un aspect important al sistemului implementat îl reprezintă adaptabilitatea acestuia la un interval mare de produse, acoperind diverse mărimi, forme; de asemenea sistemul propus este flexibil în definirea și incorporarea unor noi ordine de inspecție pentru noi produse.

În prima etapă a procedurii de inspecție 3D, informația despre suprafața inspectată este extrasă folosind modelul CAD existent. Pe baza informației privind măsurătorile ce trebuie executate, cea de-a doua etapă a procedurii constă în generarea direcțiilor de scanare și a regiunilor ce trebuie inspectate analizând vectorii normali la suprafață. Metoda de creștere a suprafeței poate fi folosită pentru a găsi direcția de scanare potrivită și regiunea de scanare aferentă. Acestea pot fi variate prin modificarea dimensiunii unghiului de vizualizare în toleranțele impuse. Ultima etapă a procedurii constă în generarea traiectoriilor de scanare, acestea fiind validate în raport cu constrângerile impuse de sistemul de scanare laser și de robot.

A fost proiectată și implementată planificarea bazată pe constrângeri a mișcării robotului împreună cu masa rotativă. Planificatorul de mișcare generează traiectorii de scanare valide în cele două etape de achiziție a datelor 3D. În prima etapă a procesului de scanare, pe baza traiectoriilor de scanare dezvoltate pentru clasele de obiecte de interes și a constrângerilor hardware și software, este generată traiectoria de mișcare flexibilă fără coliziuni. Constrângerile de tip hardware și software sunt incluse în funcția de cost a planificatorului mișcării.[22][25][27]

Masa rotativă este considerată cel de-al șaptelea grad de libertate adăugat celor șase ale sistemului robot. Masa rotativă permite scanarea obiectului de interes din direcții diferite, aceste perspective putând fi obținute doar prin rotirea obiectului de interes. Problema de planificare a mișcării mesei rotative constă în determinarea în mod continuu a unghiului de rotație al mesei rotative astfel încât sistemul de scanare

laser montat pe bratul robot sa fie in pozitia dorita de scanare iar aceea pozitie sa fie confortabila. Planificatorul de miscare al mesei rotative va efectua calculele necesare dupa definirea traiectoriilor de scanare. (Fig. 10)

Datele de intrare ale acestei probleme constau in traiectoriile de scanare, care sunt reprezentate ca o serie de locatii (pozitie și orientare), in sistemul de referinta atasat obiectului scanat. Sistemul de scanare trebuie sa se miste in mod continuu și sincron cu masa rotativa, astfel incat sa ajunga in locatiile de scanare și sa realizeze măsurătorile necesare.[28]

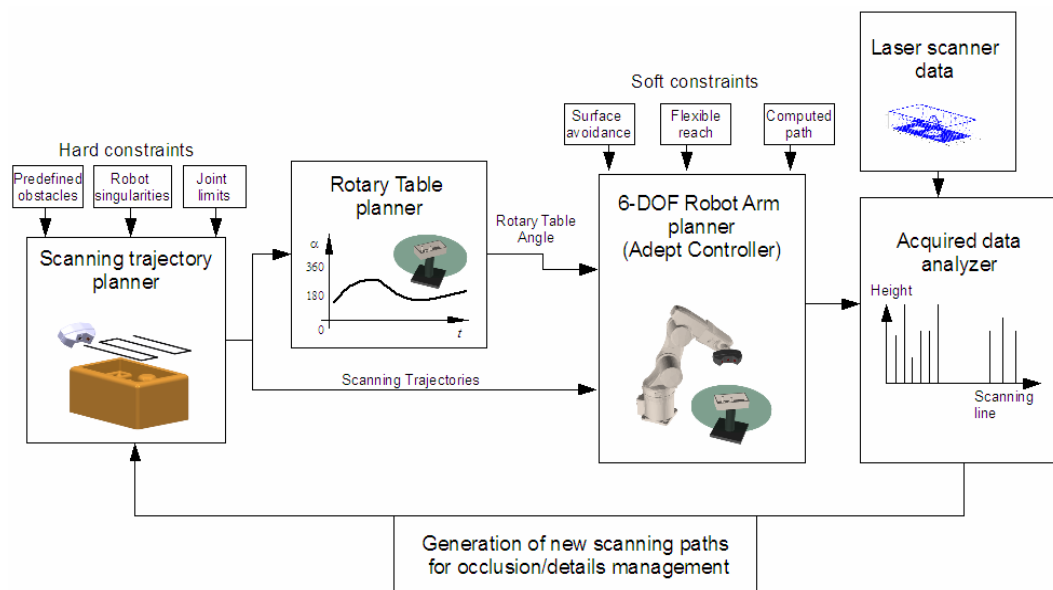


Figura 10 Planificarea bazata pe constrangeri a miscarii in cadrul procesului de scanare constituit din doua etape.

Constrangerile sistemului robot definit sunt de doua tipuri: constrangeri *hardware* și constrangeri *software*. Constrangerile hardware trebuie avute in vedere la fiecare pas al procesului de planificare a miscarii pentru asigurarea unei traiectorii valide. Constrangerile software definite constau in evitarea suprafetelor de coliziune (pastrarea distantei minime permise de scanare fata de obiectul de interes), pozitie flexibila (evitarea pozitiilor inconfortabile a brațului robot pentru robot) și urmarirea traiectoriei de scanare calculate.

Se definesc in continuare constrangerile software ale dispozitivului de scanare laser. Se introduc notatiile P_i și N_i care semnifica punctul pe suprafata scanata și normala la suprafata a acestui punct. B_i este bisectoarea razei laser iar L reprezinta dipozitivul laser. (Fig. 11). Toate notatiile sunt definite in planul razei laser.

Constrangerile impuse de dispozitivul de scanare laser sunt urmatoarele:

- Unghiul de vizualizare al dispozitivului de scanare laser, este o constrangere ce trebuie satisfacuta la fiecare măsurătoare ce este realizata de acesta. Unghiul dintre raza laser incidenta și normala la suprafața a unui punct măsurat trebuie sa fie mai mic decat unghiul minim de incidenta α (20°).

$$d_i \cdot N_i \geq \cos(\gamma), \text{ unde } d_i = (L - P_i) / \|L - P_i\|$$

- Obiectul ce trebuie măsurat trebuie sa fie in campul de vedere al dispozitivului de scanare laser. Asta duce la constrangeri aditionale asupra pozitiei dispozitivului de scanare laser. Punctul de măsurat trebuie sa fie in intervalul de lungime al razei laser.

$$(-d_i) \cdot B_i \geq \cos(\delta/2), \text{ unde } \delta \text{ este unghiul FOV (campul de vedere).}$$

- Adancimea campului: punctul măsurat trebuie sa fie in intervalul specificat de distanța fata de sursa razei laser.

$$l_{STAND} - l_{DOF}/2 \leq \|L - P_i\| \leq l_{STAND} + l_{DOF}/2 \text{ unde } l_{STAND} \text{ și } l_{DOF} \text{ reprezinta distanta stand-off și lungimea adancimii campului.}$$

- Raza incidenta cat și raza reflectata nu trebuie sa interfereze cu obiectul de inspectat. [33][34]

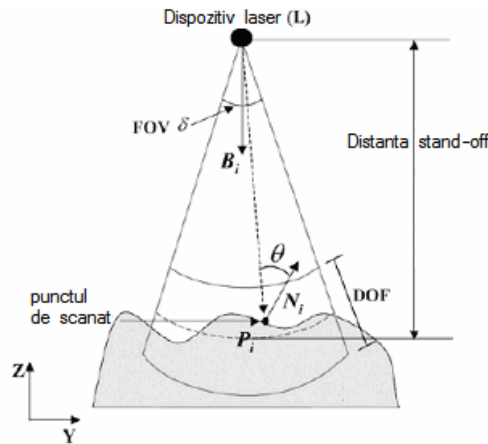


Figura 11 Constrangeri optice ale sistemului de scanare laser.

Constrangerile hardware constau in: obstacole cunoscute in volumul de lucru al sistemului, singularitati ale robotului și limitari ale unghiurilor de rotatie ale articulatiilor. Obstacolele predefinite in spatiul de lucru al robotului sunt: masa rotativa, obiectul de interes, conveiorul și masina CNC. Un aspect ce va fi luat in calcul într-o dezvoltare ulterioara consta in modelarea spatiului de lucru al robotului (implicit definirea obstacolelor) folosind sistemul de scanare.

Controlul de calitate 3D este realizat pe baza traiectoriilor de scanare generate, datele colectate fiind comparate cu parametrii de calitate impuși (Fig. 12).

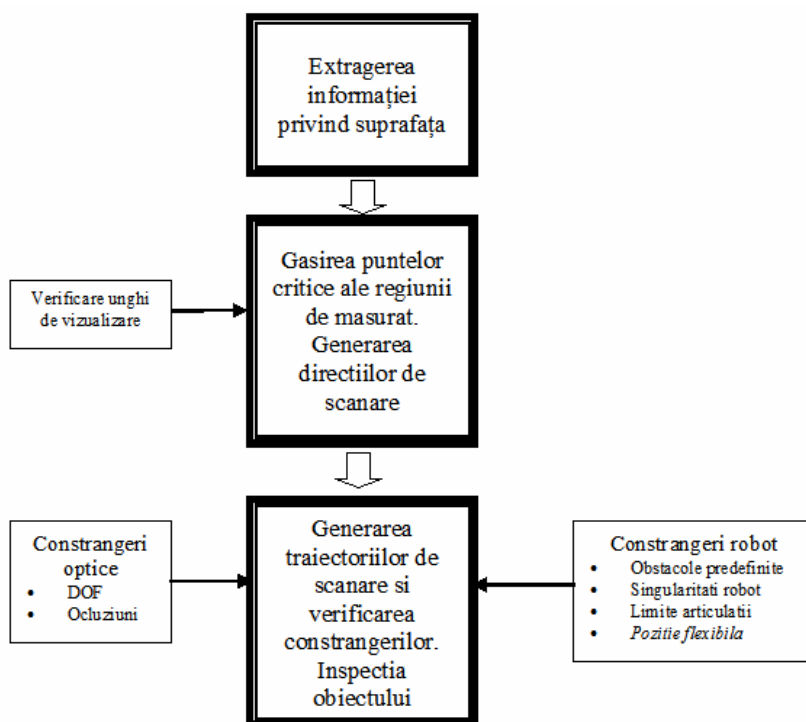


Figura 12 Generarea traiectoriilor de scanare laser.

Generarea automata a traiectoriilor duce la construirea de către utilizator a unui plan de scanare eficient și consistent pentru evitarea interacțiunilor cu utilizatorul ce nu sunt necesare și pot genera erori nedorite. Chiar și pentru un operator calificat generarea manuala a unui plan de scanare optim confirm complexitatii obiectului de scanat (cazurile cele mai dificile fiind obiectele de forma libera), poate fi foarte complicata. Prin automatizarea acestui proces, operația de inspecție va fi mai puțin costisitoare, din punctul de vedere al resurselor și al timpului necesar.[30]

4.3 Proiectarea și implementarea primitivelor de măsură 3D

Precizia și viteza dispozitivelor de scanare laser le fac ideale pentru inspecții rapide și aplicații de verificare cum ar fi: măsurarea cavităților, profile sectionate, înalțimi ale trăsăturilor, etc.

Sistemul de scanare laser dezvoltat poate măsura obiecte având orice orientare a dispozitivului de scanare laser, ce poate fi obținută respectând constrângerile

impuse. Datele rezultate în urma inspecției pot fi comparate cu parametrii de calitate impuși pentru asigurarea preciziei obiectului prelucrat supus inspecției (Figura 13).

Inspectia vizuală 3D este bazata pe dispozitivul de scanare laser care genereaza un nor de puncte foarte dens; aceste date trebuie esantionate spatiaș și filtrate. Zgomotul din norul de puncte este neglijat. Norul de puncte este apoi referentiat într-un sistem unic de coordonate și segmentat. [1][35]

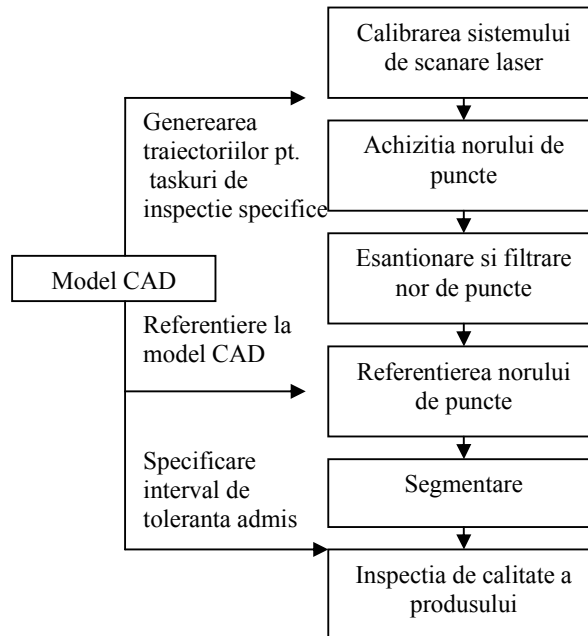


Figura 13 Diagrama bloc procedurii de inspecției de calitate 3D .

Se pot defini tolerantele ca fiind specificații ce descriu variațiile în dimensiune sau geometrie acceptabile pentru o componentă. Au fost considerate și testate două tipuri de măsuratori industriali:

1. Măsuratori de dimensiune și unghi
2. Măsuratori geometrice

Măsurătorile geometrice au fost la rândul lor împartite în cinci categorii importante: Forma, Profil, Orientare, Locație, "Runout". [9][36]

Dintre acestea, cele mai uzitate sunt măsurătorile geometrice de tip orientare și locație. Au fost considerate următoarele măsuratori geometrice de tip formă: netezime, rectilinilitate, circularitate și cilindricitate (Figura 14). Aceste entități nu necesită o geometrie de referință pentru a fi verificate. Măsurătorile privind orientarea se referă la poziționarea unghiulară a suprafețelor sau a axelor în raport cu planul

setului de date referinta. Se pot clasifica și acestea in trei tipuri: perpendicularitate, paralelism și forma unghiulara. Măsuratoarea de perpendicularitate specifica o zona care se afla intre doua planuri paralele care sunt perpendiculare pe planul de referinta al zonei. Paralelismul este conditia impusa unei suprafete, axe sau plan ca punctele sale sa fie echidistante fata de planul sau axa de referinta. Toleranța de paralelism specifica o zona care se afla intre doua planuri paralele intre ele și paralele cu planul de referinta. Forma unghiulara este conditia impusa unei suprafete, axe sau plan de se afla la un unghi specificat altul decat 90° fata de planul de referinta.[37]

Măsurătorile de locatie definesc conditii de pozitie sau se refera la concentricitate sau simetrie. Acest tip de măsuratori sunt in general folosite pentru a verifica distante între trăsături de tip gauri, locatia unor grupuri de trăsături, coaxialitatea unor trăsături; etc. Măsurătorile privind conditiile de pozitie definesc zona in care pozitia unui centru sau a unei axe trebuie sa fie localizata.

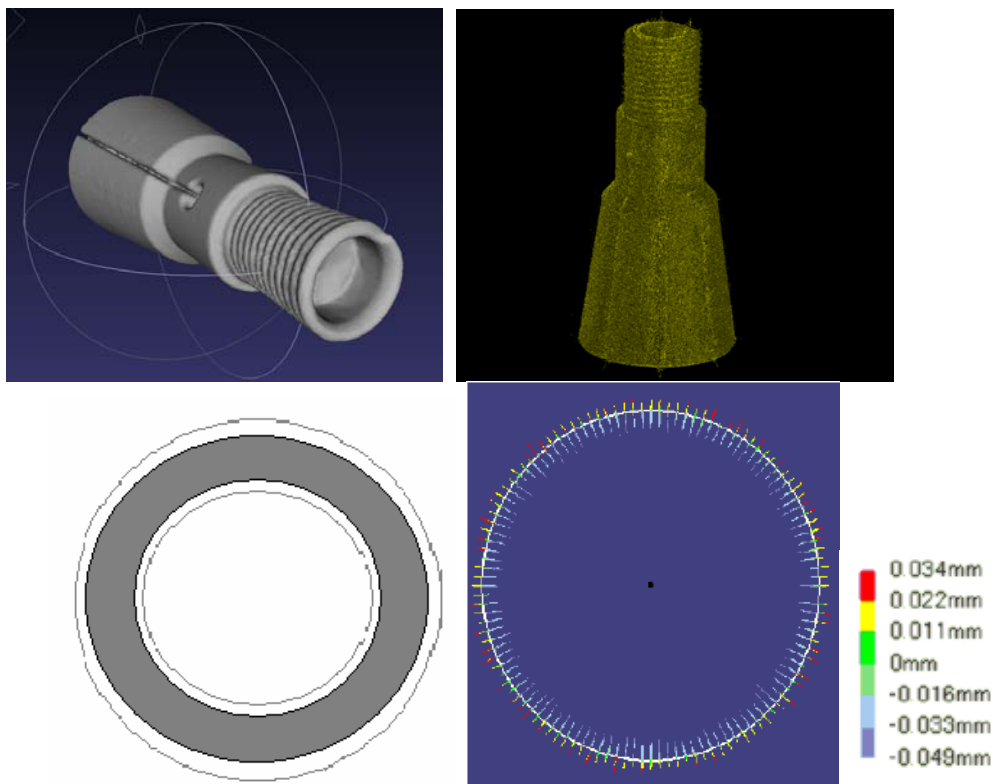


Figura 14 Măsurarea cilindricității unei piese: modelul CAD al piesei, norul de puncte achiziționat, definirea planelor cilindrice analiza deviatilor in urma măsurătorii

Intregul proces de control de calitate al pieselor 3D poate fi automatizat. Specificarea toleranțelor minime și maxime acceptate in care subsetul de puncte al suprafeței inspectate trebuie sa se afle și a valorii prag permit afisarea punctelor cu

diverse culori în funcție de rezultatele obținute în urma măsurătorilor, punctele cu o toleranță mai mică decât valoarea de prag fiind afișate cu o culoare diferită de punctele cu o valoare mai mare.

5. Integrarea controlului de calitate prin vedere artificială în sisteme de fabricație holonică

5.1 Arhitectura sistemului holonic de fabricație

Nevoia de agilitate și reconfigurabilitate necesită o nouă clasă de sisteme de control al producției caracterizată de:

- (i) Un set de blocuri de control distribuite, autonome și inteligente;
- (ii) Autonomia fiecărui bloc de control care are propriile obiective, cunoștințe și competențe;
- (iii) Deciziile globale sunt obținute prin cooperarea mai multor unități de control;
- (iv) Unitățile de control se adaptează schimbărilor fără intervenții din exterior;
- (v) Unitățile de control al dispozitivelor mecatronice (mașini prelucrătoare, roboți, benzi de transport și senzori de vedere) fac parte din arhitectura de comandă, monitorizare și control de calitate reconfigurabilă, cu planificare toleranță la defect a sistemului global de producție; [38]
- (vi) Datele de intrare și formatul acestora pentru prelucrarea materialelor pot fi de o diversitate mare, necesitând atât cooperare de viteză înaltă între senzorii externi, roboți și mașinile cu comandă numeric cât și sisteme software dirijate de taskuri, ușor reconfigurabile capabile să detecteze, să recunoască, să localizeze, să califice, și să inspecteze obiecte complexe – componente ale fluxului de materiale inclusiv prin reprezentarea cât mai precisă într-un format digital a formelor/suprafețelor lor 2D / 3D. [6] [8] [14]

Se consideră trei mari domenii de activitate atunci când se definește planificarea bazată pe echipă și controlul în cadrul structurilor de fabricație:

- *Activitățile de pre-producție:* proiectare și inginerie dezvoltate conform cerințelor de business (CAD/CAE), căutare în baze de cunoștințe, inginerie inversă și planificarea proceselor și a producției (CAPP).
- *Activitățile de producție:* includ toată gama de activități de condiționare a materialelor – alimentare, prelucrare, manipulare robotizată, montaj /

asamblare, finisare – toate acestea realizate la nivelul atelierului de productie ("*shop-floor*" – CAM).

- *Activitatile de post-productie*: sortare, măsurare, inspecție de calitate (CAQC, CAI), ambalare și etichetare – toate acestea fiind efectuate înainte de distributie. [7][10][13]

Structura de productie in care au fost experimentate, testate și validate solutiile de Inspecție Vizuală Automata (IVA) a componentelor fluxului de materiale dezvoltate in cadrul tezei este compusa din sase roboti industriali (un robot Cartezian pentru alimentarea cu palete a celulei de fabricație, doi roboti SCARA pentru asamblare-montaj, doi roboti articulati vertical pentru operații de asamblare-montaj și alimentare a doua masini de frezat cu comanda numerica, și un robot SCARA pentru alimentarea cu componente a depozitelor fiecarei statii de lucru robotizate) (Fig. 15).

Produsul final rezulta din executarea unui numar de operații de prelucrare, montare, asamblare și fixare realizate de ansamblul celor doua masini de frezat CNC și a celor patru roboti industriali. Produsele, asamblate pe palete, viziteaza una sau mai multe resurse (masini, roboti) conform unri planificari calculat off-line și furnizate ca *recomandare* (și nu ca impunere).[11][17][19]

Astfel, functionalitatile de control și urmarire a productiei au fost extinse in cadrul acestei platforme de fabricație multifunctionale, agile și auto-adaptive capabile sa realizeze toate activitatile bazate pe echipa cu functionalitati de tip IVA:

- generarea programelor de prelucrare CNC a produselor din datele 3D obtinute prin scanare laser;
- asamblarea robotizata a produselor cu control vizual;
- alimentare cu componente materiale conditionate prin vedere artificiala (detectare, recunoaștere, localizare și calificare, prindere din miscare cu ghidare vizuală a robotilor);
- inspectia de calitate interfazica, in line (geometria și starea suprafetelor prelucrate, alinieri in montaj). [5][12]

Realizarea in sistemul de productie global a noilor functionalitati IVA se bazeaza pe integrarea resurselor specifice SIVA (camere video stationare și mobile, dispozitive de scanare laser, software de achiziție și prelucrare a imaginilor 2D și 3D, mecanisme multi-tasking "*Look-and-Move*" și "*Visual Servoing*") într-un sistem

- planificarea vizuală a miscării roboților;
- descrierea, interacțiunea și inspecția componentelor fluxului de materiale prin mijloace tehnice bazate pe trăsături vizuale ale pieselor mecanice.

Controlerele robot (-vedere artificială) prevăzute au rol de master asupra stațiilor de lucru în celula de fabricație, deoarece manipuloarele robot conectează două fluxuri de materiale importante: *fluxul de procesare* și *fluxul de transport*. Soluția propusă constă în integrarea acestor două fluxuri cu *controlul calității on-line* în sistemul de producție holonic, conectabil în rețea extinsă cu modulele de proiectare și planificare asistate de calculator, prin adoptarea unei descrieri unificate bazată pe trăsături a:

- Pieselor și montajelor (*modele de recunoaștere* – R_P);
- Operațiilor tehnologice (*modele de procesare* – P_P);
- Controlului calității geometriei și a stării suprafețelor (*modele de măsură* – Q_P);
- Prinderii și manipulării (*modele de prindere* – G_P);

Această descriere bazată pe trăsături este asigurată pe de-o parte de sistemul de vedere artificială 2D prin procesarea imaginii obținută de la camere video matriciale multiple (staționare, montate pe braț, privind spre banda conveyer, depozit, plan de montaj/asamblare, etc.) printr-un proces de gestiune a informației realizat în trei etape:

1. *Definirea trăsăturilor de procesare mecanică* (e.g. muchie, colț, gaură, buzunar, etc.) și translatarea lor în trăsături de tip ancora, punct, muchie sau trăsături combinate extrase din imagini.

2. *Modelarea*: clase de piese pentru recunoașterea în toate etapele de procesare; stiluri de prindere cu evitarea coliziunilor pentru fiecare clasă de piese, etapa de procesare și obiectiv al prezentării; aparenta scenei și a prim-planului (amplasamente restricționate ale pieselor, grad de certitudine despre posibile atingeri și/sau suprapuneri de componente mecanice); modele de măsurare pentru inspecția automată (utilizând instrumente ale vederii artificiale).

3. *Implementarea unei baze de date relaționale* cu asocierile R_P:P_P:Q_P:G_P care sunt comparate în timpul execuției programelor cu seturi de parametri standard din lanțul de asocieri predefinite. Detectia, identificarea,

măsurarea și localizarea materialelor în funcție de taskurile impuse confirmă o urmărire normală a secvenței de producție preplanificată sau o vor putea altera.

Platforma de inspecție 3D este integrată în sistemul de fabricație propus, oferind o flexibilitate crescută acestuia și adaptabilitatea la diferite sarcini de inspecție. Inspecția 3D este realizată doar în cazul cerințelor specifice de măsurători, sistemul de vedere artificială 2D fiind principalul executant al taskurilor de asigurare al controlului de calitate al produselor fabricate. Arhitectura propusă se aliniază conceptului de control pe întreg ciclul de viață al produsului, furnizând o soluție eficientă și flexibilă și înglobează funcțiile oferite de platforma de modelare și inspecție 3D în vederea prelucrării optime și furnizării de produse de calitate înaltă.

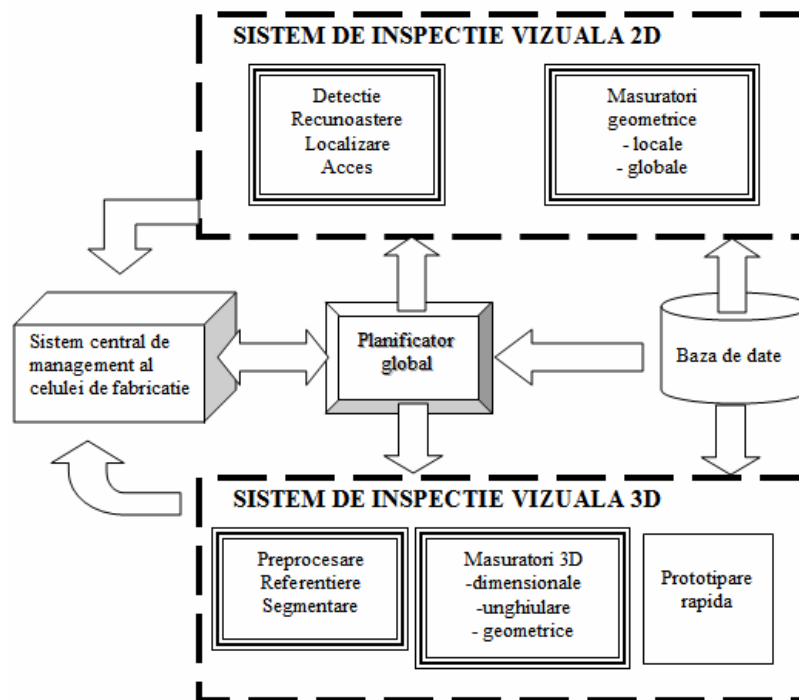


Figura 16 Integrarea controlului de calitate 2D și 3D în platforma de fabricație flexibilă

Integrarea procesului de inspecție 3D (Fig.16) în sistemul de fabricație flexibilă presupune mai multe etape specifice ce au fost proiectate și implementate în cadrul tezei de doctorat:

- *Etapa de modelare:* Proiectantul în etapa de modelare descrie piesa exprimat prin formă, dimensiuni; după prelucrarea piesei se verifică dacă piesa se încadrează în intervalul de toleranțe admis. Aceste atribute sunt stocate în structura de date CAD. Extragerea trăsăturilor constă în găsirea elementelor

din prescripțiile de toleranțe generând o listă de proprietăți pentru fiecare trăsătură.

- *Implementarea și actualizarea bazei de date relationale*: Integrarea inspecției vizuale 3D în celula de fabricație flexibilă presupune în primul rând un set de toleranțe prescrise atasate fiecărui model CAD, fiecare cu un număr de identificare: $\{Toleranța (numar_id), metoda (grup, tipologie)\}$. Metodele de măsurare specifice fiecărei toleranțe sunt colectate în baza de date ce oferă reguli și proceduri de executare a măsurătorii specificate. $\{Trăsătura (numar_id), tipologie (i.e. axa), Centru (gx, gy, gz), Referința(id), Toleranța (tipologie, valoare, referința)\}$. Trebuie precizate de asemenea informațiile specifice legate de sistemul de referință și geometria trăsăturilor inspectate. Structura modelului CAD este inspectată și la găsirea trăsăturii ce trebuie inspectate sunt preluate din baza de date toate specificațiile legate de acesta (referință, toleranțe, tipologie).
- *Analiza modelului CAD și generarea automată a traiectoriilor*: pe baza informației despre suprafața inspectată extrasă din modelul CAD existent sunt generate direcțiile de scanare a regiunilor ce trebuie analizate analizând vectorii normali la suprafață. Metoda de creștere a suprafeței este folosită pentru a găsi direcția de scanare potrivită și regiunea de scanare aferentă. Acestea pot fi variate prin modificarea dimensiunii unghiului de vizualizare în toleranțele impuse. Traiectoriile de scanare sunt validate în raport cu constrangerile impuse de sistemul de scanare laser, mediul de fabricație și de robot.
- *Operații de prelucrare a norului de puncte*: norul de puncte achiziționat este supus operațiilor de filtrare și decimare cu păstrarea trăsăturilor de interes, conform algoritmilor prezentați în capitolul 4 al tezei. În cadrul acestei etape se execută referențierea norului de puncte atât *suprafața la suprafață* cât și *suprafața la punct*. După referențierea norului de puncte la un sistem unic de coordonate, procesul de segmentare a norului de puncte este realizat prin calcularea distanțelor minime între trăsăturile de interes din modelul CAD și subseturile de puncte aferente din norul de puncte.

- *Executia seturilor de măsuratori 3D*: sistemul de scanare laser poate măsura obiecte având orice orientare a dispozitivului de scanare laser ce poate fi obținută respectând constrangerile impuse. Datele rezultate în urma inspecției sunt comparate cu parametri de calitate impuși pentru asigurarea conformității obiectului prelucrat. Se alege metoda specifică de inspecție și strategia de inspecție; pentru fiecare tip de măsurătoare pot exista mai multe strategii. În final punctele identificate în subsetul de puncte corespunzătoare trăsăturii măsurate sunt inspectate și rezultatele măsurătorii sunt furnizate către sistemul central de control.

6 Concluzii

6.1 Contribuții importante ale tezei de doctorat

În conformitate cu obiectivele propuse, pe baza cercetărilor fundamentale și aplicative realizate, precum și în urma testării și a experimentărilor efectuate pe parcursul elaborării tezei de doctorat pe platforma industrială pilot, au fost aduse o serie de contribuții științifice importante, dintre care menționez următoarele:

- O analiză completă a stadiului actual al sistemelor de vedere artificială 2D și 3D utilizate în industrie pentru asigurarea controlului de calitate al produselor, în care s-au evidențiat principalele probleme ale sistemelor IVA utilizate în mod curent, cit și cerințele structurale și de mod de comandă / operare pentru asigurarea flexibilității, a adaptabilității și reconfigurabilității la cost redus în structuri flexibile și agile de fabricație discretă, repetitivă.
- O metodologie de alegere a componentelor unui sistem de inspecție vizuală automată – SIVA, având ca date de intrare specificațiile mediului de operare, taskurile de realizat și eventuala corelare cu ghidarea vizuală a mișcării mecanismelor inteligente care asistă aceste taskuri (roboti inteligenți).
- Configurarea sistemului de inspecție vizuală de viteză înaltă și timp real robotizat, rezultat ca ansamblu de elemente specifice lanțului SIVA (achiziție, iluminare, amplasare, sincronizare cu fluxul materialelor, automatizare, robotizare, monitorizare, integrare) determinate pe baza datelor de intrare în sistemul global – obiectele de prezentat sistemului de vedere artificială, operațiile de realizat asupra acestora, și ieșirile sistemului – modul de

prezentare și utilizare a rezultatelor inspecției vizuale (raportare, generare a referintelor de mișcare a mecanismelor de prezentare / manipulare / stocare a componentelor fluxului de materiale pentru aplicații de viteză înaltă și timp real.

- Definirea și implementarea primitivelor de măsură a detaliilor de geometrie (distanțe, unghiuri, orientări relative între drepte, apartenența unor puncte la interiorul unor regiuni, existența unor puncte particulare pe contur – colțuri, s.a.) cit și a predicatelor de măsură cu ajutorul unei biblioteci de funcții de achiziție și prelucrare de imagini (AdeptVision) utilizate în cadrul Sistemului de Inspecție Vizuală Automată drept elemente constitutive de bază ce permit – prin combinare, și folosind conceptul RDA – realizarea eficientă a diverselor tipuri de funcții de control al calității produselor obținute prin prelucrare și asamblare/montaj, sau de proceduri de prototipare rapidă.
- Integrarea procesului de inspecție 3D a suprafețelor complexe ale produselor în sisteme de fabricație flexibilă prin definirea, sinteza structurală, proiectarea și implementarea următoarelor etape specifice:
 - Reprezentarea și generarea modelului pieselor, exprimat prin formă, dimensiuni și locație, și stocarea acestor atribute în structura de date CAD.
 - Specificarea setului de toleranțe prescrise atasate unui model CAD, fiecare cu un număr de identificare propriu și a metodelor de măsurare asociate fiecărei toleranțe definite prin reguli și proceduri de executare a măsurătorii specificate.
 - Analiza modelului CAD și generarea automată a traiectoriilor de scanare, cât și validarea acestora în raport cu constrangerile impuse de sistemul de scanare laser, mediul de fabricație și de robotul utilizat.
 - Prelucrarea norului de puncte prin aplicarea operațiilor de filtrare și decimare cu păstrarea trăsăturilor de interes; referențierea norului de puncte atât în tehnica *suprafața la suprafața* cât și în cea *suprafața la punct* și segmentarea acestuia prin calcularea distanțelor minime între trăsăturile de interes din modelul CAD și subseturile de puncte aferente din norul de puncte.

- o Executia seturilor de măsuratori 3D și compararea datelor rezultate in urma inspecției cu parametrii de calitate impuși pentru asigurarea preciziei obiectului prelucrat.
- Extinderea functionalitatilor de control și urmarire a productiei in cadrul unei platforme de fabricație multifunctionale, agile și auto-adaptive capabile sa realizeze ansamblul activitatilor bazate pe mecanismul de cooperare multi-agent (echipa, consortiu) cu functionalitati de tip IVA:
 - o generarea programelor de prelucrare CNC a produselor (cod G) din datele 3D obtinute prin scanare laser;
 - o asamblarea robotizata, cu control vizual a produselor pentru verificarea alinierilor și a amplasamentelor relative ale componentelor;
 - o alimentarea cu componente materiale condiționate prin funcții de vedere artificiala (detectare, recunoaștere, localizare și calificare, prindere din miscare cu ghidare vizuală a roboților);
 - o inspecția de calitate interfazica in line din date 2D obținute de la camere matriceale (geometria și starea suprafetelor prelucrate, alinieri in montaj).

Toate aceste contribuții ale tezei au fost publicate în cărți, reviste și volume ale unor conferințe. Rezultatele au fost prezentate în public, la conferințe, sesiuni de instruire și expoziții (postere).

6.2 Noi direcții de cercetare in viitor

Subiectele abordate in cadrul acestei teze de doctorat ofera un suport solid pentru dezvoltarea și optimizarea arhitecturilor de control a productiei și integrarea sistemelor de inspecție a calitatii 2D și 3D.

Dintre activitatile de cercetare viitoare ce pot fi dezvoltate pe baza rezultatelor obtinute in prezenta teza de doctorat, mentionez:

- Definirea setului complet de măsuratori 3D asociat unor clase de obiecte pentru verificarea completa a calitatii produselor conform specificatiilor impuse.
- Optimizarea algoritmilor de generare a traiectoriilor de scanare in vederea eficientizarii timpilor de calcul, minimizarii consumurilor energetice, s.a.

- Dezvoltarea și implementarea algoritmilor de analiza a deviațiilor produsului fata de intervalul de tolerante de calitate admis și generarea automata a unor noi ordine de productie (i.e. prelucrare pe masina CNC in vederea corectarii erorilor de adaos inspectate).
- Dezvoltarea și implementarea strategiilor de scanare adaptiva pentru achiziția norilor de puncte a obiectelor de forma complexa fara model.
- Extinderea setului de functii realizate de sistemul de scanare laser (i.e. urmarirea in timp real a conturului suprafetelor in vederea execuției de sarcini de productie specifice fara informație apriori cunoscute.
- Realocarea automata a resurselor pe tipuri de produse in functie de cerințele de precizie a prelucrării/montajului impuse și estimarea in line a alterării preciziei de procesare a resurselor.

Bibliografie (selecție)

- [1] Akca, D., 2003. Full automatic registration of laser scanner point clouds. Optical 3-D Measurement Techniques VI, 22-25 September, Zurich, pp. 330-337.
- [2] Borangiu, Th., Intelligent Image Processing in Robotics and Manufacturing, Romanian Academy Press, Bucarest, pp. 1 – 650, 2004 ; ISBN 973-27-1103-5 ; L
- [3] Borangiu Th., Anton, F., Tunaru, S., Dogar, A., Object Recognition Method Using a Network Oriented Skeleton Computation, Proceedings volume of the 14h Int. Conf. Robotics in Alpe-Adria-Danube Region RAAD'05, May 26-28, 2005, Bucharest.
- [4] Borangiu, Th., Anton, F., Tunaru, S., Dogar, A., Manu, M., High Speed, Multitasking Visual Robot Guidance, Proceedings volume of the 15th International Conference On Control Systems And Computer Science, May 25 - 27, 2005, Bucharest
- [5] Borangiu, Th., Manu, M., Anton. F.-D., Tunaru, S., Dogar, A., High-speed Robot Motion Control under Visual Guidance, 12th International Power Electronics and Motion Control Conference - EPE-PEMC 2006, Portoroz, Slovenia, August 30 - September 1, 2006

- [6] Borangiu, Th., Ivanescu, N., Raileanu, S., Rosu, A., Dogar, A., Anton, F.D., Anton, Silvia și Al. Dumitrache, Holonic Manufacturing Control with Robot-Vision Part Supply, Proc. of the National Conf. "Excellence Research – A Way to Innovation", July 27-29, 2008, Brasov, Romania, ISSN 1844-7090, pp. 146-1 – 146-6
- [7] Borangiu Th., Anton F.D., Tunaru S., Dogar, A., A Holonic Fault Tolerant Manufacturing Platform With Multiple Robots , 15 th International Workshop Robotics in Alpe-Adria-Danube Region RAAD 2006, June 15-17, Balatonfured, Lake Balaton, Hungary
- [8] Borangiu T., Luis Manuel Tomas Balibrea, Florin Daniel Anton, Nick Ivanescu, Silvia Tunaru, Silviu Raileanu, Dogar, A, Holonic Fault-Tolerant Control of Networked Robot-Vision Assembly Stations , Intelligent Assembly and Disassembly - IAD 2007 , 23-25 May, Alicante, Spain
- [9] Boulanger, P. 1994 Extraction multiechelle d'el ements geometriques, PhD Dissertation: Genie Electrique, Universite de Montreal, Canada.1994.
- [10] Christensen J., HMS/FB Architecture and its Implementation, în: Agent-Based Manufacturing. Advances in the Holonic Approach, Springer Verlag, pg. 53-88, 2003.
- [11] Dogar A., Borangiu Th., Anton, F., Tunaru, S., Interactive Visual Based Learning of Grasping Models, Proceedings volume of the 14h Int. Conf. Robotics in Alpe-Adria-Danube Region RAAD'05, May 26-28, 2005, Bucharest.
- [12] Dogar, A., Borangiu, Th., Anton, F., Tunaru, S., Manu, M., High Speed Real-Time Robot Vision Design for Flexible Part Feeding, Proceedings volume of the 14h Int. Conf. Robotics in Alpe-Adria-Danube Region RAAD'05, May 26-28, 2005, Bucharest.
- [13] Dogar, A., Borangiu, Th., Anton, F.-D., Tunaru, S., Nick Ivanescu, Interactive Teaching in Flexible Manufacturing by Remote Robot Vision Learning and Control, 17 th EAEEIE Conference , Craiova, June 1-3, 2006.
- [14] Dogar, A., Borangiu, Th., Anton, F.-D., Tunaru, S., Holonic Control of a Multiple Robot-Vision System with Fault-Tolerant Communication, 3 rd

- International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics – ICINCO 2006 , August 1-5, Setubal, Portugal
- [15] Dogar, A., Borangiu Th., Anton, F.D., Tunaru S, Ivanescu N., Interactive Learning of Scene-Robot Models Based on AI Techniques, 12th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing - INCOM 2006 , May 17, 18, 19, Saint-Etienne, France
 - [16] Dogar, A., Anton F.D., Borangiu Th., Tunaru S., Gheorghiu S., Remote Monitoring and Control of a Robotized Fault Tolerant Workcell, 12th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing - INCOM 2006 , May 17, 18, 19, Saint-Etienne, France
 - [17] Dogar A, Theodor Borangiu, Alexandru Dumitrache, Automatic Generation of 3D Machining Surfaces with Tool Compensation from Graylevel Image Models, Intelligent Manufacturing Systems -IMS 2007 , 23-25 May, Alicante, Spain
 - [18] Dogar A, Theodor Borangiu, Florin Anton, Silvia Anton, Andrei Nick Ivanescu, Silviu Raileanu, Adrian Bruja, Embedded Control of a Bricklaying Robot from CAD Production Data, 16 th International Workshop Robotics in Alpe-Adria-Danube Region - RAAD 2007, June 7-9, Ljubljana, Slovenia
 - [19] Dogar A, Theodor Borangiu, Andrei Nick Ivanescu, Alexandru Dumitrache, Andrei Rosu, Continuous Path Following with Applications in Different Robotic Tasks, 16 th International Workshop Robotics in Alpe-Adria-Danube Region - RAAD 2007, June 7-9, Ljubljana, Slovenia
 - [20] Dogar A, Borangiu, Th. și Al. Dumitrache, Modelling and Simulation of Short Range 3D Triangulation-Based Laser Scanning System, Proc. of the International Conf. ICCCC'08, May 15-17, 2008, Baile Felix-Spa Oradea, Romania
 - [21] Dogar, A, Borangiu, Th. și Al. Dumitrache, Modelling and Simulation of Short Range 3D Triangulation-Based Laser Scanning System, Int. Journal of Computers, Communications & Control IJCCC, Vol. 3, No. 4, 2008 (ISI Thomson Reuters Journal)
 - [22] Dogar, A, Borangiu, Th. și Al. Dumitrache, Constraints-based Motion Planning for an Automatic, Flexible Laser Scanning Robotized Platform, Proc.

- of IEEE Int. Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics AQTR 2008 - THETA 16th Edition, May 22-25, Cluj-Napoca, Romania, ISBN 978-1-4244-2576-1
- [23] Dogar, A, Borangiu, Th. si Al. Dumitrache, Implementation Issues Regarding a 3D Robot – based Laser Scanning System, Proc. of the Int. Conf. CONTROLO'08, July 21-23, 2008, Utad Vila Real, Portugal
- [24] Dogar, A, Borangiu, Th. si Al. Dumitrache, Integrating a Short Range Laser Probe with a 6-DOF Vertical Robot Arm and a Rotary Table, Proc. of the 17th Int. Workshop Robotics in Alpe-Adria-Danube Region RAAD08, September 15-17, Ancona, Italy, ISBN 978-88-903709-0-8, pp. 14
- [25] Dogar, A, Borangiu, Th. si Al. Dumitrache, Generation of Adaptive Robot Scanning Paths for 3D Surface Reconstruction, Proc. of Int. Conf. ROBOTICA'08, November 13-14, 2008, Braşov, Romania
- [26] Dogar, A, Borangiu, Th. and Al. Dumitrache, Calibration of Wrist-Mounted Profile Laser Scanning Probe using a Tool Transformation Approach, Pr. of the RAAD 2009 18th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region May 25-27, 2009, Brasov, Romania
- [27] Dogar, A, Borangiu, Th. and Al. Dumitrache, A Heuristic Approach for Constrained Real Time Motion Planning of a Redundant 7-DOF Mechanism for 3D Laser Scanning, 13th IFAC Symposium on INFORMAȚION CONTROL PROBLEMS IN MANUFACTURING, June 3-5, Moscova, 2009
- [28] Dogar, A, Borangiu, Th., Dumitrache, Al. and Flexible 3D Trajectory Teaching and Following for Various Robotic Applications, 9th International IFAC Symposium on Robot Control (SYROCO2009), September 9 – 12, 2009, Gifu, Japan.
- [29] Dogar A, Borangiu, Th., Al. Dumitrache and Heuristic Solution for Constrained 7-DOF Motion Planning in 3D Scanning Application, Control Engineering Practice, număr manuscris: CONENGPRAC-D-09-00229, 2009
- [30] Dogar A., Integrating 3D Quality Control Function into an Automated Visual Inspection System for Manufacturing Industry, UPB Scientific Buletin, 2009
- [31] Giret A., Botti V., Analysis and design of holonic manufacturing systems, The 18th International Conference on Production Research, 2004.

- [32] Ji, Q., Zhang, Y., 2001, Camera Calibration with Genetic Algorithms, IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, pp.120-130
- [33] Kim. J.H. and et al., Collision Avoidance Planning of Jointed Robots using Configuration Space, Korean Society of Automotive Engineering, Vol. 2, No. 6, 1994.
- [34] Lee KH, Park H, Son S A framework for laser scan planning of freeform surfaces, Int J Adv Manuf Technol 17(3):171–180, 2001
- [35] Pauly M, Gross M, Kobbelt LP (2002) Efficient simplification of point-sampled surfaces. In: Proceedings of the 13th IEEE Visualization Conference, Boston, MA, pp 163–170
- [36] Prieto, F. Redarce, T.Lepage, R. Boulanger,P. : An Automated Inspection System, International Journal of Advanced Manufacturing Technology 19 (2002), 917–925.
- [37] R. A. Edinbarough, R. A. Nainar and P. Radhakrishnan, “Automated visual inspection of geometric tolerance in circular components”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 10(6), pp. 367–373, 1995.
- [38] S. Rahimifard, Semi-heterarchical product planning structures in the support of team-based manufacturing”, Int. J. Prod. Res., vol. 42, 2004, pp. 3369-82.
- [39] W. K. Pratt, Digital Image Processing 4th Edition, John Wiley & Sons, Inc., Los Altos, California, 2007