

**UNIVERSITATEA POLITEHNICA DIN BUCURESTI**

**Facultatea de Automatica si Calculatoare**

**Departamentul Automatica si Informatica Industriala**

Spl. Independentei, 313, ED 111, Sector 6, 060032 Bucuresti, Romania Tel: +402 93 14, Fax: 317 09 12

## **Sistem autonom, auto instruibil de comanda adaptiva robot - CNC integrat in arhitectura orientata pe servicii pentru reproducerea obiectelor din imagini tip harta de profunzime**

### **Sinteza Tehnica Etapa I (2007)**

#### **Cuprins**

- 1. Determinarea metodelor optime de achiziție, înregistrare si validare a datelor de la dispozitivul de scanare laser. Managementul proiectului. Coordonare grupuri de lucru si analiza proiect**
  - 1.1. Definirea tehnicii optime de scanare a suprafețelor complexe 3D. Studiu de soluții
    - 1.1.1. Stadiul pe plan mondial
    - 1.1.2. Principiul de functionare a unui dispozitiv de scanare laser de distanta scurta
    - 1.1.3. Strategii de scanare proiectate pe clase de obiecte. Scanare adaptiva
    - 1.1.4. Solutii privind sincronizarea achizitiei datelor de la scannerul laser cu miscarea robotului
  - 1.2. Definirea si proiectarea algoritmilor pentru eliminarea punctelor în exces, alinierea si validarea datelor obținute de la scannerul laser
    - 1.2.1. Metode de eliminare a punctelor in exces
    - 1.2.2. Metode de inregistrare a masuratorilor intr-un sistem de coordonate unic
    - 1.2.3. Teste pentru validarea datelor
  - 1.3. Metode de prelucrare a datelor achiziționate in vederea obținerii de imagini tip harta de profunzime
    - 1.3.1. Obținerea unei imagini tip harta de profunzime prin prelucrarea norilor de puncte
    - 1.3.2. Obținerea unei imagini tip harta de profunzime la rezolutie scazuta, pentru procesul de degrosare, folosind aproximare prin adaos

**2. Proiectarea sistemului software de prelucrare a imaginilor tip harta de inaltimi in vederea generării traiectoriilor de prelucrare. Diseminare rezultate științifice**

- 2.1. Metode si algoritmi de imbunatatirea si prelucrare a imaginilor tip harta de profunzime
  - 2.1.1. Operatii de imbunatatire a imaginilor de tip harta de profunzime
  - 2.1.2. Algoritmi de extragere si prelucrare a contururilor din imagini tip harta de inaltime
- 2.2. Metode de generare a traiectoriilor optime de prelucrare bruta din imagini tip harta de profunzime
  - 2.2.1. Strategii de prelucrare prin aschiere in vederea degrosarii
  - 2.2.2. Generarea traiectoriilor de degrosare din imagini de tip harta de profunzime
- 2.3. Metode de generare a traiectoriilor optime de prelucrare in vederea finisării din imagini tip harta de profunzime
  - 2.3.1. Strategii de prelucrare prin aschiere in vederea finisarii
  - 2.3.2. Optimizarea traiectoriilor de finisare din imagini de tip harta de profunzime
  - 2.3.3. Adoptarea unei strategii de finisare adaptiva pentru suprafete complexe

# 1. Determinarea metodelor optime de achiziție, înregistrare și validare a datelor de la dispozitivul de scanare laser. Managementul proiectului. Coordonare grupuri de lucru și analiza proiect

## 1.1 Definiția tehnicii optime de scanare a suprafețelor complexe 3D. Studiu de soluții

### 1.1.1 Stadiul pe plan mondial

În multe domenii tehnice, este necesară crearea de modele geometrice ale unor obiecte existente care nu au un astfel de model disponibil. În studiul elaborat se identifică scopul și principalele domenii de aplicații ale reproducerii obiectelor având forme complexe. Au fost definiți și se prezintă pașii algoritmiți ce trebuie parcurși și strategii diferite de construcție. Se realizează de asemenea o prezentare a diverselor tehnici de achiziție, fiecare cu avantajele și dezavantajele acesteia. Reproducerea obiectelor (inginerie inversă) constă în duplicarea unei componente deja existente, prin achiziția dimensiunilor fizice ale acesteia. Astfel sistemele de vedere artificială au fost adaptate domeniului ingineriei inverse. Atât în industria de fabricație, în industria medicală cât și în industria militară, există nevoia reproducerii 3D a scenelor și a obiectelor. Scopul ingineriei inverse – așa cum este tratat în prezentul proiect – este de a obține cu succes un model CAD 3D al unui obiect, sistem, scenă atunci când un astfel de model nu există.

În Fig. 1 sunt reprezentați pașii ce determină construirea unui model 3D; această schemă reprezintă principiul de bază, generic al reproducerii unui obiect, etapele putând să se întrepătrundă de-a lungul procesului.

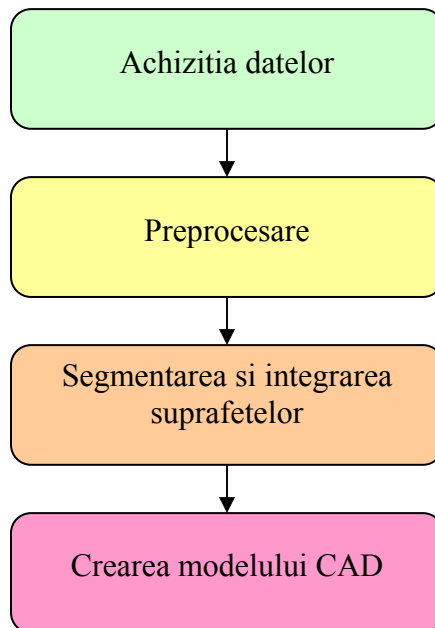


Fig. 1 – Etapele reconstrucției unui model 3D.

Există diferite metode de a achiziționa datele 3D de diferite forme. Fiecare metodă folosește un mecanism sau un fenomen pentru a interacționa cu suprafața sau volumul obiectului de interes.

Astfel exista metodele non-contact in care lumina, sunetul sau campurile magnetice sunt folosite, dar si metode tactile in care suprafata este atinsa folosind probe mecanice la capatul unui brat (Fig. 2).

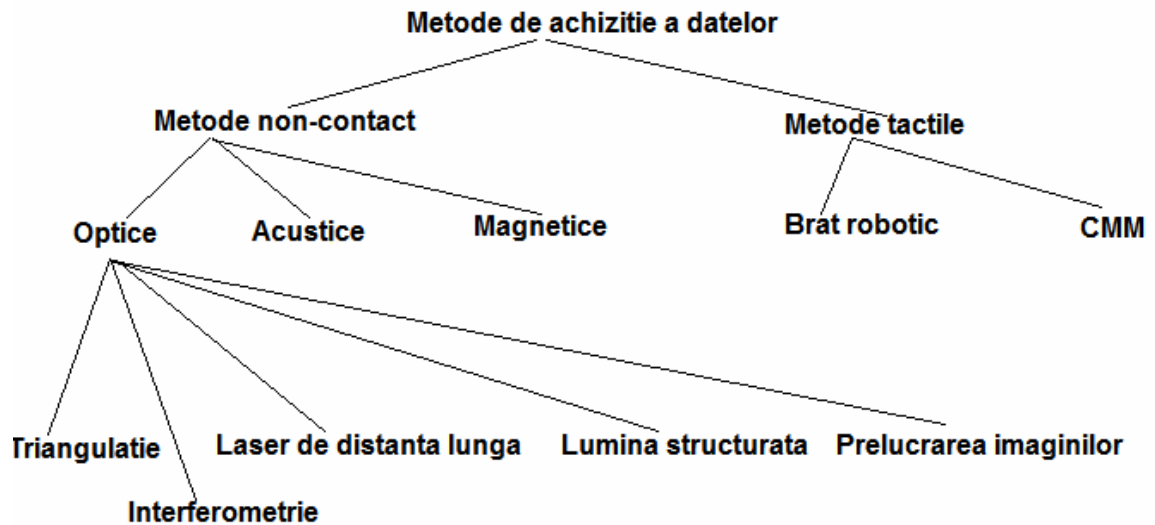


Fig. 2 – Metode de achizitie a datelor 3D.

Metodele optice de achizitie a datelor 3D sunt cele mai folosite, avand rate de achizitie foarte mari. Traingulatia este metoda care foloseste locatia si unghiurile intre sursa de lumina si sensor pentru a deduce pozitia. Prin triangulatie se achizitioneaza date la rate foarte inalte, iar acuratetea este determinate de rezolutia senzorului folosit si a distantei dintre suprafata de interes si sistemul de scanare laser.

Sistemele laser de distanta lunga masoara distantele prin masurarea timpului de zbor al razei de lumina. Interferometria masoara distantele in termeni de lungimi de unde folosind modele de interferenta. Aceasta poate fi o metoda foarte exacta intrucat lumina vizibila are o lungime de unda de ordinal sutelor de nanometri, in timp ce in majoritatea aplicatiilor de inginerie inversa distantele sunt de ordinal centimetrilor/metrilor. Lumina structurata presupune proiectarea unor modele de lumina pe suprafata de interes si achizitia imaginii rezultate a modelului reflectat de suprafata. Imaginea trebuie analizata pentru determinarea coordonatelor punctelor pe suprafata.

In cazul prelucrării imaginilor, se folosesc mai multe imagini ale obiectului de interes din perspective (directii) diferite pentru a extrage informatiile privind inaltimea si pozitia coordonatelor. Aceasta metoda este catalogata drept o metoda pasiva, in timp ce celelalte metode sunt considerate active intrucat folosesc surse de lumina artificiala pentru achizitia datelor.

Metodele tactile sunt o alta abordare frecventa de capturare a formei, in acest caz folosindu-se brate mecanice pentru a atinge suprafata. Senzorii din articulatiile bratului determina coordonatele relative ale locatiilor. Aceste metode sunt limitate de performantele dispozitivului de masura, nu sunt foarte eficiente in cazul suprafatelor concave si reprezinta o metoda cu rate de achizitie foarte scazuta. In cazul metodelor tactile se folosesc brate robot sau masini de masurat coordonate (CMM). In cazul metodelor acustice, sunetul este reflectat de suprafata, sonarul fiind una dintre cele mai folosite metode. Masuratorile campului magnetic implica determinarea fortei sursei campului magnetic.

Principalele probleme practice in achizitia datelor 3D sunt:

- **Calibrarea:** reprezinta partea esentiala a configurarii si operarii sistemului de masurare a pozitiei. Orice senzor trebuie calibrat astfel incat sa determine cu precizie parametrii cum ar fi

puncte si orientari ale camerei si modeleze si sa permite cu precizia maxima posibila sursele sistemice de eroare.

- **Accesibilitatea:** implica datele ce nu sunt accesibile din cauza configuratiei sau topologiei obiectului scanat. O astfel de problema este in general rezolvata prin scanari multiple din diverse perspective. In functie de metoda de achizitie a datelor aleasa, exista posibilitatea ca aceasta problema sa nu poate fi rezolvata.
- **Precizia:** depinde foarte mult de rezolutia senzorului in cazul metodelor optice. Distanța între sistemul de scanare si obiect este un alt factor care influenteaza precizia.
- **Ocluziunea:** reprezinta blocarea mediului de scanare din cauza umbrelor sau obstacolele. Este o problema in general specifica metodelor optice. Ocluziunile duc la aparitia erorilor in datele achizitionate. Eliminarea punctelor care nu apartin obiectului scanat este dificila. Scanarile multiple ale obiectului reprezinta o solutie, dar inregistrarea perspectivelor multiple induce erori in norul de puncte de asemenea.
- **Dispozitive de fixare:** eliminarea datelor false induse de dispozitivele de fixare folosite in pentru obiectul de interes, este dificila si necesita de asemenea scanari multiple.
- **Vederi multiple:** implica procesul de inregistrare a datelor rezultate, de aducere a acestora intr-un sistem de coordonate unic si de combinare a datelor suprapuse.
- **Zgomot si date incomplete:** zgomotul apare dintr-o multitudine de cauze cum ar fi vibratii externe, reflectii speculare, etc. Una dintre probleme este daca zgomotul trebuie eliminat in timpul sau dupa constructia modelului. In anumite cazuri zgomotul nu trebuie eliminat deloc, intrucat acesta poate duce la distrugerea muchiilor ascutite. Lipsa datelor apare din cauza inaccesibilitatii sau ocluziunilor. In aceste cazuri trebuie reconstruita suprafata lipsa prin aproximari folosind datele existente.
- **Distributia statistica a obiectelor:** orice obiect care este scanat, reprezinta un esantion dintr-o populatie distribuita.
- **Gradul de finisare a suprafetei:** natura/aspectul/textura materialului suprafetelor obiectelor poate afecta grav procesul de achizitie a datelor.

Sistemul propus pentru scanare, achizitie, aliniere si validare a datelor ce descriu suprafete 3D va fi compus din următoarele elemente de baza (Fig. 3):



Fig. 3 – Sistemul de scanare, achizitie si aliniere cu scanner laser.

- *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 va fi comandată ca axa externă de mișcare de controller-ul brațului robot, iar mișcarea mesei va fi sincronizată cu mișcarea robotului. Cu alte cuvinte, robotului i se va adăuga 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 utilizatorului, acesta va așeza obiectul scanat în centrul mesei rotative și își va alege o strategie de scanare, predefinită sau adaptivă, urmând ca obținerea modelului tridimensional al obiectului analizat să se realizeze automat.

Sistemul de coordonate al piesei este sistemul de coordonate în care vor fi exprimate coordonatele din norul de puncte obținut în urma scanării. Acest sistem este atașat piesei analizate, și implicit, mesei rotative (Fig. 4).

Originea acestui sistem este în centrul mesei rotative, planul  $XY$  coincide cu planul mesei, pe care este așezată piesa, iar axa  $Z$  este orientată în sus. Sistemul de coordonate are axele paralele cu sistemul cartezian World folosit de brațul robotic.

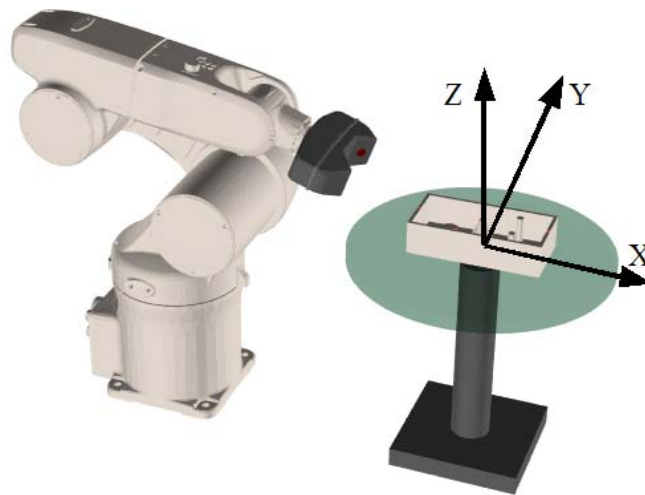


Fig. 4 – Sistemul de coordonate al piesei.

### 1.1.2 Principiul de funcționare a dispozitivului de scanare laser de distanță scurtă – ales ca dispozitiv de măsură

Un dispozitiv de scanare cu laser este alcătuit dintr-o diodă laser și o cameră de luat vederi, ambele montate într-un ansamblu rigid. Dioda laser emite un fascicul de raze laser focalizate sub formă de triunghi, forma ideală a acestuia fiind dată de intersecția dintre un con și un plan, ca în Fig.5. Atunci când raza laser va ilumina un obiect având o suprafață mată, aceasta va descrie o linie curbă care va fi detectată de cameră. Prin procedeul de triangulație se pot calcula coordonatele tridimensionale ale fiecărui pixel de pe curba văzută de cameră, relative la sistemul de coordonate atașat dispozitivului de scanare.

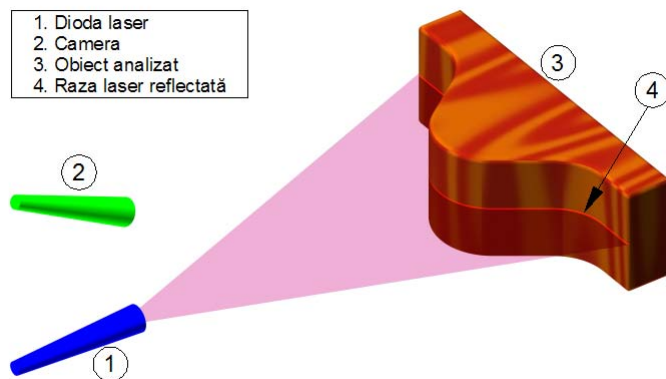


Fig. 5 - Raza laser (simulare).

Pentru a calcula coordonatele 3D ale curbei descrise de raza laser sunt necesare două etape:

- Identificarea razei laser pe imaginea de la cameră
- Trecerea de la coordonatele 2D din planul imaginii la coordonatele 3D raportate la poziția dispozitivului de scanare

Identificarea razei laser poate fi realizată prin achiziția a două imagini succesive folosind camera de luat vederi: prima imagine va fi luată cu dioda laser oprită, iar a doua va fi luată cu dioda laser activată. Prin calculul diferenței între cele două imagini obținute, urmată de operația de binarizare, va rezulta o imagine care conține doar punctele aflate pe curba de interes (Fig. 6).

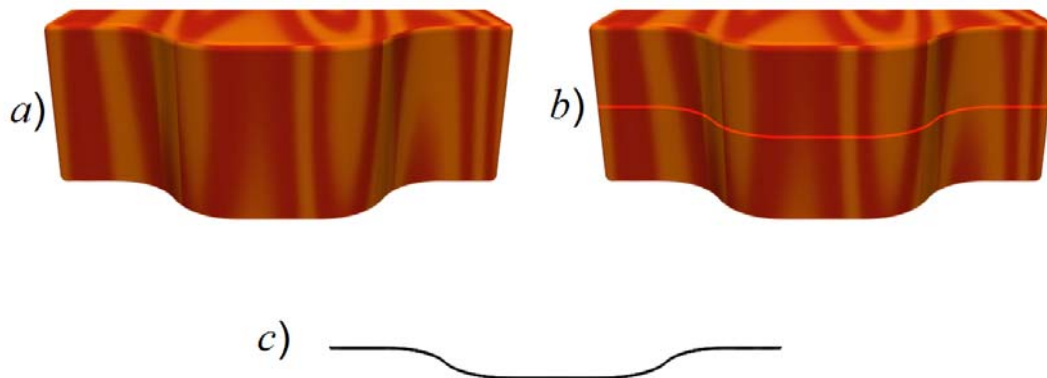


Fig. 6 - Procesarea imaginii în vederea triangulației

a) imaginea cu laserul oprit; b) imaginea cu laserul pornit; c) imaginea diferență binarizată.

Fie  $xyz$  sistemul atașat sensorului CCD al camerei, având originea în centrul matricii (Fig. 7). Dacă matricea CCD conține  $W \times H$  pixeli, coordonatele unui pixel ( $l, c$ ) având indicele liniei  $l$  de la 1 la  $W$  și indicele coloanei  $c$  de la 1 la  $H$  vor fi:

$$x = c - (W/2 + 0.5)$$

$$y = -l + (H/2 + 0.5)$$

De asemenea, fie  $XYZ$  sistemul de coordonate atașat dispozitivului de măsurare, având originea în focalul fascicului laser (Fig. 7). Dioda laser luminează în sensul negativ al axei  $Z$ , iar planul în care este focalizată lumina laser este  $YZ$ . Rezultă că orice punct măsurat de către

dispozitivul laser va avea coordonata  $X$  egală cu 0, iar coordonatele  $Y$  și  $Z$  vor fi determinate în funcție de poziția pixelului luminos de pe matricea CCD.

Vor mai fi folosite următoarele notații (Fig. 7 și Fig. 8):

- $f$  : distanța focală a camerei
- $a$  : distanța dintre planul luminii laser și focarul camerei
- $b$  : distanța dintre planul  $XY$  și focarul camerei
- $\phi$  : unghiul dintre axa camerei și axa diodei laser  $Z$
- $\beta$  : unghiul dintre planul luminii laser și planul dat de axa  $Y$  și raza reflectată care atinge elementul fotosensibil al camerei
- $\alpha$  : unghiul dintre raza reflectată și planul  $xz$ .
- $\gamma$  : valoarea maximă pe care o poate lua unghiul  $\alpha$
- $d_{min}$  : distanța minimă pe care o poate măsura dispozitivul
- $d_{max}$  : distanța maximă pe care o poate măsura dispozitivul
- $d_0$  : distanța indicată de dispozitiv atunci când raza reflectată atinge axa  $x$  a senzorului

Fie o rază laser care se reflectă pe suprafața obiectului și este detectată de senzorul CCD ca un punct luminos  $p$  având coordonatele  $(p_x ; p_y)$ . Se dorește determinarea coordonatelor  $(P_X ; P_Y ; P_Z)$  ale punctului  $P$  în care a avut loc reflexia.

Unghiul  $\alpha$  dintre raza reflectată și planul  $xz$  este (Fig. 6):

$$\alpha = \arctg \frac{p_y}{f}$$

Unghiul  $\beta$  va avea valoarea (Fig. 8):

$$\beta = \phi - \alpha$$

Tot din Fig. 5 se poate observa expresia distanței  $d$  între punctul de reflexie și planul  $XY$  :

$$d = -P_z = \frac{a}{\operatorname{tg} \beta} + b$$

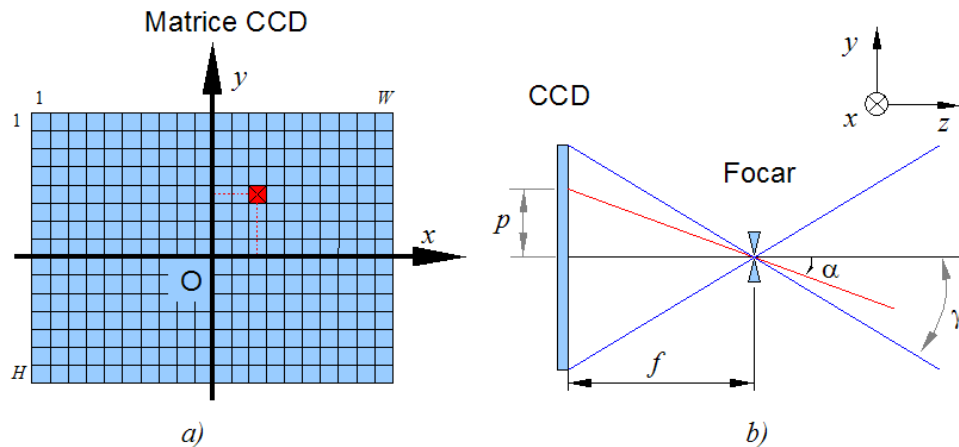


Fig. 7 - a) Sistemul de coordonate al matricii CCD; b) Parametrii camerei video.



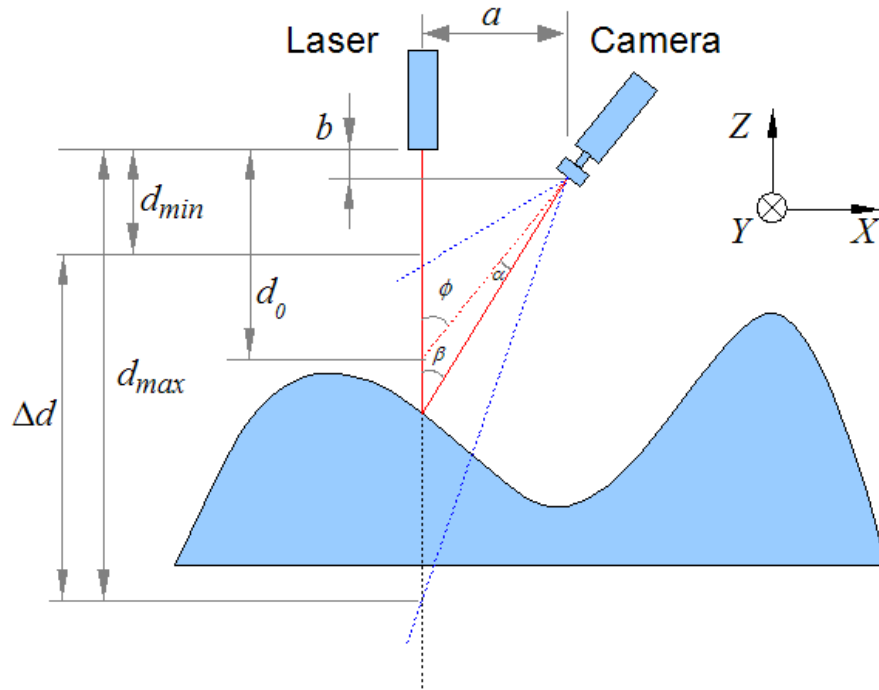


Fig. 8 - Procesul de triangulație.

Coordonata  $P_Z$  fiind determinată, rămâne de calculat coordonata  $P_Y$ . Distanța parcursă de raza incidentă, din punctul de reflexie  $P$  până în focarul camerei, este:

$$r = \frac{a}{\sin \beta}$$

Se calculează unghiul făcut de raza reflectată cu planul  $yz$  :

$$\alpha' = \arctg \frac{P_x}{f}$$

Coordonata pe  $Y$  a punctului  $P$  rezultă imediat:

$$P_Y = r \operatorname{tg} \alpha'$$

Înlocuind, rezultă expresiile finale pentru calculul coordonatelor punctului  $P$  în sistemul  $XYZ$ :

$$P_X = 0$$

$$P_Y = \frac{a}{f \sin \left( \phi - \arctg \frac{P_y}{f} \right)} P_x$$

$$P_Z = \frac{-a}{\operatorname{tg} \left( \phi - \arctg \frac{P_y}{f} \right)} - b$$

Considerând  $a$ ,  $b$ ,  $f$  și  $\phi$  constante ale dispozitivului de măsurare, se poate observa că  $P_Z$  depinde numai de  $p_y$ ; pe de altă parte,  $P_Y$  depinde atât de  $p_y$  cât și de  $p_x$ .

Pentru exemplificare, va fi trasată dependența dintre coordonatele 3D ale punctului de reflexie și coordonatele 2D ale pixelului de pe imaginea luată de cameră. În exemplele ce urmează vor fi folosite următoarele valori:  $a = 50$  mm,  $b = 20$  mm,  $\gamma = 15^\circ$ ,  $d_0 = 170$  mm. Se va considera o matrice CCD având  $W \times H = 800 \times 600$  pixeli. Se vor calcula distanța focală  $f$  (unitatea de măsură fiind distanța fizică dintre 2 pixeli pe senzorul CCD), precum și unghiul  $\phi$ :

$$f = \frac{H}{2 \operatorname{tg} \gamma}$$

$$\phi = \operatorname{arctg} \frac{a}{d_0 - b}$$

Dependența între distanța  $d = -P_Z$  de la punctul de reflexie la planul  $XY$  și coordonata pe  $y$  a pixelului,  $p_y$ , este dată în Fig. 9 a). Dependența între  $P_Y$  și coordonata pe  $x$  a pixelului,  $p_x$ , considerând  $p_y$  constant, este o dreaptă care trece prin origine. Panta acestei drepte este o funcție neliniară de  $p_y$ , ilustrată în Fig. 9 b).

Se observă că rezoluția măsurătorii depinde de distanța  $d$  dintre punctul de reflexie și planul  $XY$  al sistemului de coordonate atașat dispozitivului de măsurare. Cu cât această distanță este mai mică, cu atât rezoluția măsurătorii este mai bună, și implicit precizia acesteia. Pe măsură ce distanța crește apropiindu-se de limita superioară, precizia scade exponențial. Această remarcă va fi importantă la proiectarea strategiei de scanare, în sensul că se va încerca apropierea scannerului de obiect cât mai mult posibil, fără a exista însă pericolul coliziunii cu acesta.

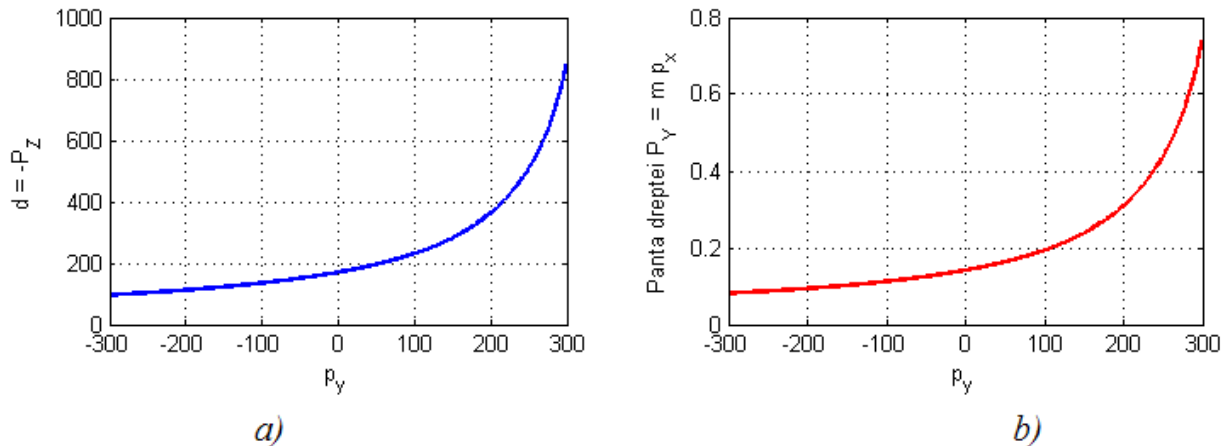


Fig. 9 - a) Dependența între  $d = -P_Z$  și  $p_y$ ; b) Dependența între panta dreptei  $P_Y = m p_X$  și  $p_y$ .

### 1.1.3 Strategii de scanare proiectate pe clase de obiecte. Scanare adaptivă

Sistemul de scanare va fi proiectat pentru următoarele clase de obiecte:

- Matrițe
- Obiecte de artă de dimensiuni reduse
- Modele la scară redusă

Principalele trăsături ale obiectelor scanate:

a) în cazul *matrițelor*:

- se dorește scanarea cu precizie ridicată a interiorului matriței;
- interiorul matriței poate fi descris de o suprafață 2.5D;
- suprafața este mată;
- pot exista găuri sau șanțuri adânci, unde vizibilitatea este redusă.

b) în cazul *obiectelor de arta*:

- suprafețele sunt complexe, putând avea atât porțiuni netede cât și porțiuni ascuțite;
- pot exista regiuni concave care sunt vizibile doar din anumite unghiuri;
- suprafețele pot fi mate sau lucioase;
- prezintă interes scanarea părții superioare, fără a include stativul sau suprafața de dedesubt.

c) în cazul *modelelor la scară redusă*:

- suprafețele sunt complexe, pot exista concavități greu accesibile;
- prezintă interes scanarea obiectului din toate unghiurile posibile, inclusiv de dedesubt.

Rezultă necesitatea proiectării de strategii de scanare distincte pentru fiecare clasă de obiecte.

O trăsătură comună a strategiilor pentru cele 3 clase de obiecte este scanarea în două etape.

ETAPA 1: În prima etapă, sistemul nu cunoaște nimic despre dimensiunile sau forma obiectului. Scanarea se va face folosind treceri succesive, apropiindu-se din ce în ce mai mult de obiect, și va construi un model aproximativ, grosier, care va putea fi folosit la detectarea posibilităților de coliziune a robotului cu obiectul, și pentru a stabili dimensiunile traiectoriilor din strategiile predefinite care vor fi descrise în cele ce urmează.

#### □ Evitarea coliziunilor

Un aspect foarte important este evitarea coliziunii dintre brațul robot și masa rotativă sau obiectul analizat. Pe de o parte, la proiectarea strategiei de scanare s-a avut în vedere păstrarea unei distanțe minime între părțile în mișcare ale robotului (incluzând dispozitivul laser) și ansamblul masă – obiect analizat, la fiecare moment de timp. O strategie proiectată corect nu va prezenta pericolul unei coliziuni. Pe de altă parte, este foarte importantă existența unei protecții la coliziuni în timpul dezvoltării software-ului de scanare, astfel încât o eventuală eroare de programare să nu conducă la ciocnirea robotului cu obstacolele înconjurătoare.

Pentru a evita obstacolele, am ales mediul de programare robot  $V^+$ , care pune la dispoziție un mecanism accesibil prin meniul de configurare al utilitarului SPEC. Utilitarul SPEC permite definirea a maxim 4 obstacole, putând avea una din formele: cilindru, sferă sau paralelipiped dreptunghic, și având dimensiunile și orientarea în spațiu definite de utilizator. Mediul  $V^+$  testează traiectoria punctului condus atât în modurile de control manual World și Tool, cât și înaintea planificării destinației pentru următoarea mișcare, și pe durata executării unei mișcări rectilinii.

Principalul dezavantaj al acestui sistem este acela că dimensiunile obstacolelor trebuie cunoscute înaintea rulării programului; ele pot fi specificate doar prin meniul de configurare, nu și prin instrucțiuni  $V^+$  dintr-un program scris de utilizator. Deoarece sistemul de scanare nu cunoaște nici forma, nici dimensiunile obiectului înainte de examinare, și capătă aceste informații pe măsură ce scanarea se desfășoară, este necesar un sistem de protecție care să actualizeze modelul obstacolului pe măsură ce acesta este descoperit.

Modulul de protecție oferit de  $V^+$  poate fi utilizat cu succes pentru evitarea coliziunilor cu masa rotativă, deoarece aceasta este un obstacol fix. De asemenea, cunoscând distanța minimă de scanare a dispozitivului folosit, această informație poate fi folosită pentru a împiedica apropierea robotului de centrul mesei rotative la o distanță mai mică decât distanța minimă de scanare.

Pentru a oferi protecție totală la coliziuni, sistemul oferit de  $V^+$  va fi suplimentat cu o rutină de verificare a mișcărilor, înainte ca acestea să fie executate de robot. Rutina de verificare va rula pe terminalul de tip IBM PC și va folosi un model 3D al obiectului aproximat prin adaos, obținut din datele de scanare achiziționate până în momentul curent. Se mai utilizează un model aproximativ al fiecărui element al robotului, de ex. o cutie de încadrare paralelipipedică sau un cilindru, pentru ca efortul de calcul să fie cât mai redus. Se preferă să se utilizeze numai modele approximate prin adaos ale elementelor componente ale robotului, deoarece astfel se va asigura evitarea coliziunilor, chiar dacă sistemul de protecție va restricționa și anumite mișcări sigure.

#### □ Strategii de scanare

În cazul matrițelor, interiorul acestora poate fi examinat prin parcurgeri în planul  $XY$ , folosind fie un model de explorare predefinit precum grila sau spirala (Fig. 10), fie un model de explorare adaptiv, pe măsură ce zonele cu vizibilitate redusă sunt detectate.

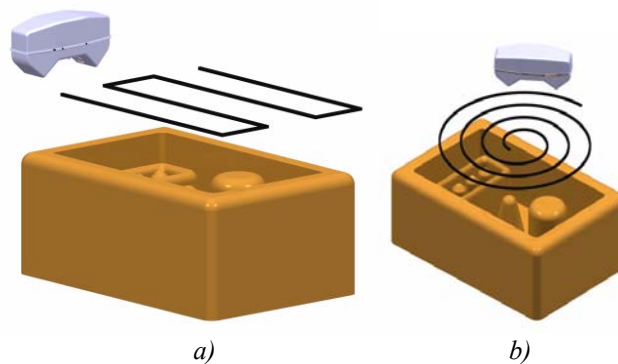


Fig. 10 - a) Explorare de tip grilă; b) Explorare în spirală.

În strategiile de mai sus, dispozitivul de scanare este orientat vertical în jos, ceea ce permite scanarea cu precizie a bazei matriței. Pereții verticali nu vor fi detectați cu precizie, deoarece unghiul de incidență al razei laser va fi foarte mic. Există o limită minimă a unghiului de incidență al razei laser cu suprafața selectată, care în cazul dispozitivelor din seriile SLP și RPS produse de Laser Design Inc. este de  $20^\circ$ .

Pentru a analiza cu precizie și pereții verticali, scanarea va fi completată cu cicluri de explorare având dispozitivul de scanare înclinat la  $45^\circ$ , ca în Fig. 11.

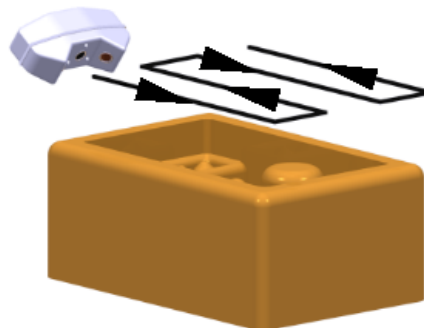


Fig. 11 - Explorare pe grilă la unghi de  $45^\circ$ .

După terminarea scanării folosind strategia predefinită, sistemul va analiza gradul de acoperire al scanării și, dacă va fi necesar, va genera traiectorii de scanare care vor putea acoperi și eventualele suprafețe care nu au putut fi analizate folosind strategia predefinită. Identificarea

regiunilor care nu au putut fi scanate va fi făcută prin analiza discontinuităților din setul de măsurători obținut de la scanner-ul laser.

În cazul obiectelor de artă, unde este necesară scanarea pe întreaga suprafață aflată deasupra mesei, se va folosi una din strategiile predefinite din Fig. 12, și anume, scanarea pe traiectorii aflate pe o emisferă care înconjoară obiectul analizat, sau, în cazul obiectelor având înălțimea mult mai mare decât lățimea și lungimea, scanarea pe traiectorii aflate pe un cilindru rotunjit în partea superioară. Dimensiunile traiectoriilor vor fi stabilite după ce se vor cunoaște dimensiunile aproximative ale obiectului analizat.

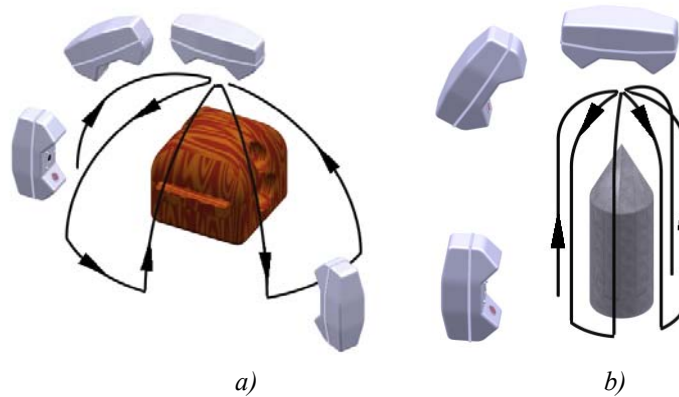


Fig. 12 - a) Scanare pe emisferă; b) Scanare pe cilindru.

După scanarea folosind traiectorii predefinite, sistemul va decide dacă este necesară folosirea unei strategii adaptive pentru analizarea regiunilor concave care nu au putut fi analizate în etapa anterioară, și va genera traiectorii care să scaneze și aceste regiuni, în situațiile în care problema are soluție.

Pentru modelele la scară redusă, strategia de scanare va fi efectuată în doi pași. Primul pas este identic cu scanarea unui obiect de artă, în sensul că se va genera un nor de puncte care descrie suprafața obiectului vizibilă de deasupra mesei. Pentru al doilea pas, care presupune scanarea părții inferioare, au fost considerate două opțiuni posibile:

- operatorul întoarce obiectul cu cca 180°, urmând ca sistemul să efectueze o nouă scanare folosind strategia de la pasul precedent. După a doua scanare, este necesară unirea celor doi nori de puncte și exprimarea lor într-un sistem de coordonate unic.
- obiectul rămâne pe masă nemișcat; în acest caz se va studia posibilitatea folosirii unei mese din material transparent, cu proprietăți optice cunoscute, și se va analiza influența refracției asupra măsurătorilor, și posibilitatea efectuării unei corecții. Influența refracției va putea fi analizată în condiții ideale folosind simulatorul dezvoltat în cadrul acestui proiect în mediile POV-Ray și MATLAB.

#### □ Simulatorul

În cadrul etapei de dezvoltare a strategiilor de scanare este importantă testarea acestora pe un *simulator* înainte de implementarea efectivă pe controller-ul robotului. Utilizarea unui simulator oferă o serie de avantaje, printre care:

- oferă posibilitatea de a efectua încercări fără a exista pericolul coliziunii accidentale dintre dispozitivul de scanare și piesa analizată;
- permite înțelegerea în detaliu a procesului de triangulație și a transformărilor necesare pentru a exprima măsurătorile într-un sistem de coordonate unic atașat piesei;
- permite testarea strategiilor de scanare într-un mediu ideal, lipsit de perturbații;

- permite analiza influenței tipului suprafeței (mată, lucioasă) asupra rezultatului scanării
- permite proiectarea unei mese rotative care să permită accesul brațului robotic în vederea scanării complete a obiectului dorit

În aceasta etapa a proiectului a fost dezvoltat un simulator ce utilizează mediul de programare MATLAB împreună cu mediul de randare tridimensională prin metoda *raytracing* POV-Ray. Software-ul de simulare este alcătuit din două module:

- Simularea dispozitivului de scanare cu laser și a unei strategii de scanare
- Simularea sistemului format din brațul robot, masa rotativă și obiectul analizat

Modulul pentru simularea dispozitivului de scanare cu laser este realizat în POV-Ray și oferă posibilitatea obținerii imaginii înregistrate de captatorul CCD al camerei folosite de dispozitivul de scanare. Utilizarea programului începe prin definirea obiectului ce se dorește a fi scanat, fie folosind instrucțiuni POV-Ray, fie utilizând o aplicație de modelare precum Moray, sau un program CAD tridimensional. Se poziționează emițătorul laser și camera senzorului, apoi se specifică dacă se dorește randarea folosind o cameră externă (pentru a vedea așezarea în spațiu a elementelor de scanare și a obiectului scanat) sau folosind camera senzorului, care va capta imaginea care va fi folosită ulterior în vederea triangulației.

Triangulația este realizată de o rutină scrisă în MATLAB, care, cunoscând așezarea în spațiu a emițătorului laser, a camerei, precum și caracteristicile camerei: distanța focală, dimensiunea captatorului și rezoluția acestuia, calculează coordonatele 3D ale fiecărui pixel care aparține razei laser văzută de captor (Fig. 13).

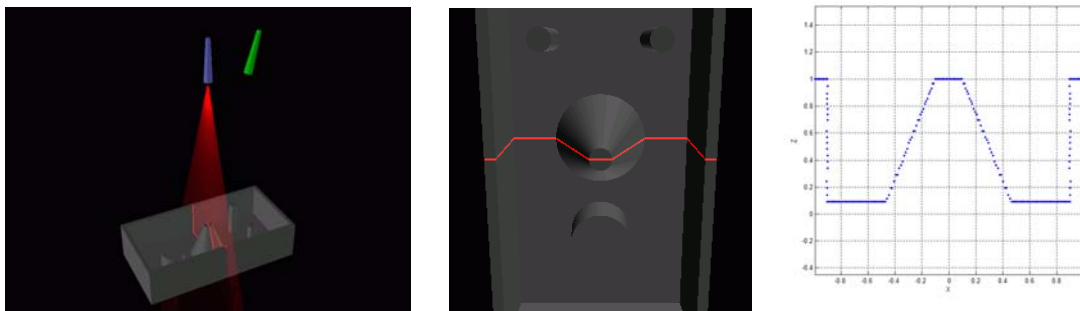


Fig. 13 - a) Simularea unui scanner laser (albastru: emițător laser, verde: camera, gri: obiect analizat); b) Imaginea văzută de camera dispozitivului de scanare; c) Nor de puncte obținut prin triangulația imaginii b).

În urma apelării repetate a modulului de simulare POV-Ray, prin modificarea coordonatelor dispozitivului de scanare, rutina MATLAB poate simula o strategie de scanare, pe care utilizatorul o introduce sub forma unui vector de poziții și orientări consecutive ale dispozitivului de scanare. În Fig. 14 este ilustrat un nor de puncte obținut în urma simulării unei treceri rectilinii a scannerului laser.

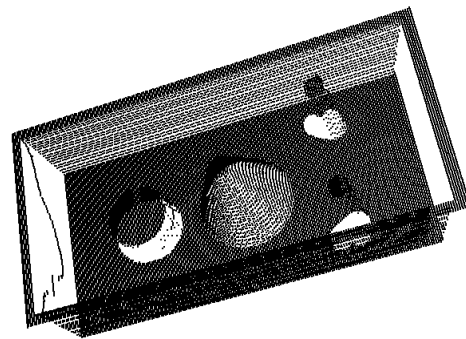


Fig. 14 - Nor de puncte obținut în urma scanării printr-o singură trecere.

Modulul dezvoltat pentru simularea sistemului compus din brațul robot, masa rotativă și dispozitivul de scanare este prezentat în Fig. 15. Interfața cu utilizatorul permite specificarea coordonatelor dorite ale robotului Adept Viper s650, fie în sistem Cartezian World, caz în care se calculează cinematica inversă, fie prin introducerea unghiurilor din articulații, caz în care se calculează cinematica directă. Este posibilă de asemenea specificarea transformării TOOL aplicate robotului și poziția unghiulară a mesei rotative. Este posibilă utilizarea a 3 unghiuri de vedere predefinite (din lateral, de deasupra și din perspectivă).

Acest modul permite obținerea unei imagini de ansamblu asupra sistemului, înainte ca acesta să fie implementat fizic, și permite dimensionarea și poziționarea mesei rotative astfel încât robotul să nu fie restricționat în timpul operațiilor de scanare. De asemenea, modulul va fi util pentru testarea și depanarea rutinelor de evitare a coliziunilor.

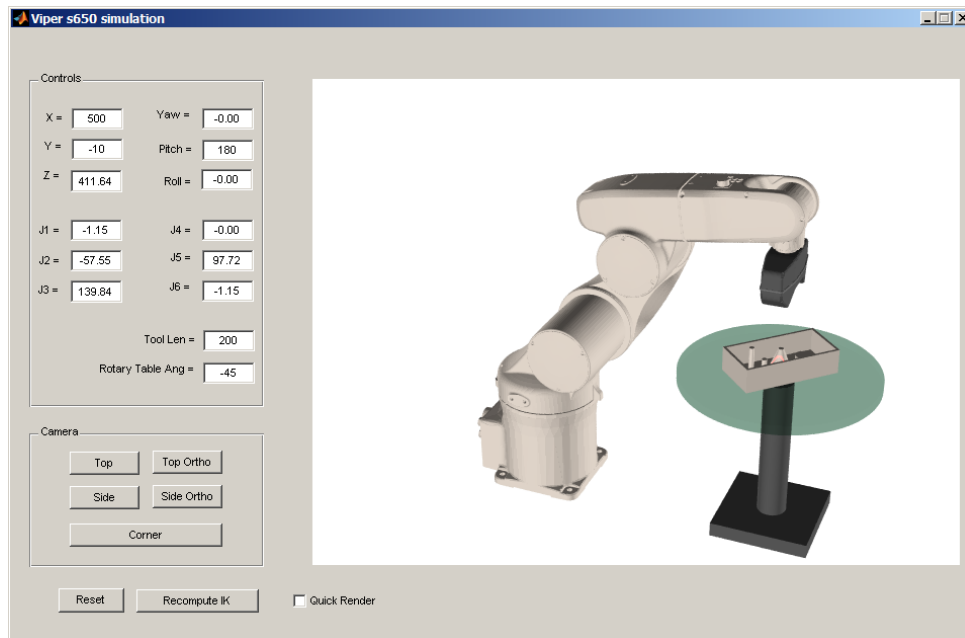


Fig. 15 - Simularea sistemului robot – masă rotativă – piesă analizată

#### 1.1.4 Soluții privind sincronizarea achiziției datelor de la scannerul laser cu mișcarea robotului

Sincronizarea celor trei componente ale sistemului de scanare – brațul robot, masa rotativă și dispozitivul de scanare cu laser – este esențială pentru funcționarea la viteză ridicată fără a afecta precizia de scanare.

Cazul cel mai simplu este scanarea în regim staționar, unde procesul de scanare se desfășoară astfel:

- Sistemul mecanic (de ex. brațul robot) deplasează piesa și dispozitivul de scanare
- Se așteaptă oprirea sistemului mecanic și anularea erorii de poziționare
- Se citesc datele de la dispozitivul de scanare laser
- Se repetă ciclul

Utilizând această succesiune de operații, scanarea va funcționa cu precizie maximă, deoarece în momentul achiziției datelor, poziția dispozitivului de scanare în raport cu piesa este cunoscută cu precizie pentru că sistemul mecanic nu este în mișcare. Dezavantajul este că viteza de lucru este foarte mică, fiind limitată de capacitățile subsistemului mecanic.

Alternativa este reprezentată de scanarea în regim dinamic, în care sistemul mecanic (bratul robot) execută mișcări continue prin care este scanată suprafața ce trebuie reprodusă, achiziția de date de profunzime de la scannerul laser (montat pe efectorul terminal al robotului) fiind realizată în mod sincron cu citirea coordonatelor sistemului de referință atașat dispozitivului de scanare (aceste coordonate sunt calculate automat de la sistemele de măsură a deplasărilor în articulațiile robotului, apelând la modelul geometric direct al ansamblului brat robot + efector terminal).

#### □ Instrumente de sincronizare oferite de V<sup>+</sup>

Pentru a dezvolta un program a cărui evoluție în timp este riguros determinată, este necesară atât cunoașterea instrumentelor oferite de mediul de programare V<sup>+</sup>, cât și înțelegerea modului de lucru al planificatorului de task-uri al sistemului de operare de timp real V<sup>+</sup>, instalat în controlerul robotului articulat vertical.

Poziția instantanee a brațului robot poate fi citită cu funcția `HERE`. Această poziție este ultima poziție citită de la encodere, și este actualizată la fiecare milisecundă.

Un ciclu sistem V<sup>+</sup> este format din 16 intervale de timp (*time slices*), fiecare având durata de 1 milisecundă. Pe durata unui singur interval (*time slice*) pot rula unul sau mai multe task-uri, în funcție de prioritatea atribuită task-ului în intervalul respectiv, și de timpul necesar terminării acestor task-uri. Este posibil ca un program utilizator să anunțe planificatorul de task-uri că se dorește suspendarea sa și așteptarea până la următorul ciclu sistem de 16 milisecunde, folosind instrucțiunea `WAIT`. Dacă se dorește execuția unei iterații la fiecare milisecundă, se poate folosi instrucțiunea `RELEASE`, care suspendă execuția programului până când planificatorul de task-uri alege din nou programul utilizator. Experimental s-a constatat că o buclă terminată cu instrucțiunea `RELEASE` se poate executa de mai multe ori într-o milisecundă. Rezultă că o posibilă structură care asigură execuția unei iterații la fiecare milisecundă este:

```
AUTO ms ; contor milisecunde
TIMER 1 = 0
ms = 0
WHILE condiție_execuție_buclă DO
    ; se execută o iterație
    ...
    ; se așteaptă până la următorul tact de 1 milisecundă
    WAIT TIMER(1) > ms / 1000
    ms = ms + 1
END
```

Datorită existenței taskurilor sistem cu prioritate ridicată, nu se garantează că iterația din programul utilizator se va executa exact la începutul intervalului de 1 milisecundă, ci timpul de începere al execuției poate varia.

Pentru a comunica cu dispozitivele exterioare controller-ului, mediul V<sup>+</sup> oferă posibilitatea utilizării semnalelor digitale de intrare/ieșire. Un semnal de intrare este citit o singură dată la fiecare ciclu sistem, o dată la 16 milisecunde. Dacă se folosește instrucțiunea `REACTI`, sistemul V<sup>+</sup> va reacționa instantaneu la semnalul de intrare respectiv. Un semnal de ieșire este activat sau dezactivat imediat, timpul de răspuns fiind limitat doar de caracteristicile electrice ale modului de ieșire digitale.

#### □ Soluția pentru sincronizare

Soluția propusă pentru sistemul de achiziție a datelor de profunzime (distanța pînă la punctele suprafeței scanate) este achiziționarea datelor în timp ce brațul robotic și masa rotativă sunt în mișcare.

Se va considera o mișcare liniară în sistemul de coordonate Cartezian. Este necesară îndeplinirea următoarelor condiții:



- Deplasarea dispozitivului de măsură în raport cu piesa (pe durata egală cu timpul de expunere a captorului optic), să poată fi neglijată în raport cu precizia de scanare dorită.
- Poziția instantanee a dispozitivului de măsură în raport cu piesa să fie cunoscută la momentul de timp la care are loc expunerea captorului optic.

Prima condiție limitează viteza maximă cu care se poate deplasa sistemul mecanic (robotul + masa rotativă) în timpul scanării. Dacă viteza este prea mare, captorul optic va înregistra o imagine neclară și vor apărea erori în calculul coordonatelor punctelor prin care trece raza laser.

A doua condiție presupune ca robotul să poată memora poziția instantanee a sistemului de coordonate de interes (atasat dispozitivului de scanare), în momentul (la intervalul) de timp la care are loc expunerea captorului optic. Comunicația între controller-ul robotului și dispozitivul de achiziție de date se poate realiza prin semnale digitale.

Dacă dispozitivul de măsurare poate începe achiziția de date la primirea unui semnal digital exterior, acest semnal poate proveni de la controller-ul robotului care va impune rata de achiziție (mai mică sau egală decât rata maximă de achiziție suportată de dispozitiv) și va putea memora poziția instantanee pentru fiecare măsurătoare în parte.

Dacă dispozitivul de măsurare poate emite un semnal digital în momentul în care se efectuează achiziția, acest semnal va fi transmis controller-ului robotului, acesta putând memora poziția instantanee a punctului condus – poziția originii sistemului de coordonate atasat dispozitivului de scanare (prin funcția HERE) într-un vector local. În acest caz, dispozitivul laser este cel care impune rata de scanare, ceea ce conduce la două soluții posibile:

1. Prima constă în folosirea instrucțiunii REACTI, care, la activarea semnalului digital emis de dispozitivul de scanare, va executa o procedură care va memora poziția instantanee a robotului din momentul în care are loc achiziția de date. Aceasta soluție este adoptată în proiectarea sistemului (software) de achiziție, sincronizare și aliniere a datelor.
2. A doua soluție posibilă constă în utilizarea unui microcontroller ca intermediar între controller-ul robotului și dispozitivul de măsurare. Microcontroller-ul poate măsura cu precizie momentele de timp la care dispozitivul de scanare emite semnalul digital, și le poate transmite controller-ului robotului. Sincronizarea între ceasul microcontroller-ului și ceasul robotului se poate face prin impulsuri de sincronizare, un impuls la 1 milisecundă.

Indiferent de soluția adoptată, după execuția mișcării liniare, măsurătorile citite de la dispozitivul de scanare se vor corela cu pozițiile instantanee ale brațului robotic și ale mesei rotative, și coordonatele vor fi transformate în sistemul de coordonate asociat piesei analizate.

#### □ Sincronizare robot – masa rotativa

Masa rotativă ce va fi folosită va fi acționată de un motor pas cu pas sau de un servomotor de c.c., care va fi comandat de un microcontroller. Acest microcontroller va comunica cu controller-ul robotului prin semnale digitale de intrare-ieșire și printr-o legătură de comunicație serială, și va genera formele de undă necesare pentru comanda motorului.

Dacă ansamblul robot – masă rotativă are de efectuat o mișcare liniară a dispozitivului de scanare compusă cu o rotație cu viteză constantă a mesei, comunicația dintre controllerul robot și microcontroller va putea fi realizată în două etape:

- inițializare: controller-ul robotului comunică microcontroller-ului mesei rotative prin interfața serială parametrii mișcării (viteză, destinație)
- execuție: robotul și masa rotativă execută mișcarea, iar controller-ele acestora se sincronizează prin impulsuri digitale, unde controller-ul robotului impune ritmul mișcării (master), iar microcontroller-ul mesei rotative (slave) confirmă execuția acesteia.

În cazul în care traiectoria de scanare presupune mișcarea unui singur dispozitiv (fie a robotului, fie a mesei rotative) la un moment dat, operația de sincronizare nu mai este necesară.

## 1.2 Definierea si proiectarea algoritmilor pentru eliminarea punctelor in exces, alinierea si validarea datelor obtinute de la scannerul laser

### 1.2.1 Metode de eliminare a punctelor in exces

Ca un prim instrument de procesare, un viewer pentru prezentarea norului de puncte trebuie sa fie disponibil, permitand rotire spatiala si panning, precum si zoom in si out. De vreme ce vor trebui manevrate un numar mare de puncte, performanta instrumentului ar trebui optimizata folosind tehnica "*point thinning*". Codari de culoare dependente de atribute pot consta intr-o prima interpretare a datelor.

Pot exista erori in colectarea punctelor, adica se pot colecta puncte ce nu apartin suprafetei efective a obiectelor:

- reflectii ale obiectelor din fundal (background);
- reflectii din spatiul dintre scanner si obiect;
- reflectii parțiale ale spotului laser pe muchii;
- multiple reflectii ale razei;
- erori sistematice cauzate de reflectivitatea diferita a elementelor de suprafata;
- luminozitate prea mare.

Multe dintre aceste puncte eronate ar trebui sa fie eliminate inainte de inregistrarea norului de puncte. Procesul de eliminare ar trebui sa fie interactiv, deoarece nu exista vreo metoda automata sa prevada toate aceste posibilitati. Eventual, unele programe pot asista la proces, pentru a-l face mai rapid.

In ceea ce priveste filtrarea datelor, trebuie sa precizam ca in urma scanarii poate rezulta un anumit zgomot datorat limitarii acuratetei dispozitivelor de masurare. Daca se stie ca un obiect este neted, se poate aplica un filtru median sau trece-jos care sa imbunatateasca considerabil situatia. Si tehnica "*point thinning*" poate avea un efect similar. Acele puncte care au mari deviatii fata de o suprafata intermediara vor fi probabil sterse.

Decizia de filtrare (software) a datelor este greu de automatizat; ea trebuie luata ca urmare a experimentarilor facute, intr-un proces de tipul "try-and-do".

### 1.2.2 Metode de inregistrare a masuratorilor intr-un sistem de coordonate unic

Referentierea reprezinta procesul prin care se aduc la un sistem de coordonate unic multiple scanari din diverse unghiuri ale obiectului ce urmeaza a fi modelat.

Referentierea este o conditie deosebit de importanta, pentru a putea permite ajustarea multiplelor scanari dintr-un singur pas prin utilizarea punctelor identice, utilizarea ariilor care se intersecteaza etc. Ea este necesara din doua motive: combinarea mai multor nori de puncte luati din mai multe puncte de observatie si referentierea obiectului intr-un sistem global de coordonate.

Aceste puncte de inregistrare pot fi trasaturi ale obiectului (de exemplu colturi) sau tinte speciale (cu mare reflectivitate) plasate in pozitii alese cu grija. Exista erori si in privinta detectarii punctelor inregistrate.

In cazul scanarii obiectelor de dimensiuni mici, majoritatea software-urilor de prelucrare a norului de puncte realizeaza referentierea prin considerarea unei scanari ca fiind sistemul de coordonate global si referentierea tuturor celorlalte scanari la aceasta.

In cazul folosirii bratului robot articulata vertical, referentierea consta in inregistrarea tuturor datelor obtinute in urma achizitiei la sistemul de coordonate global al robotului pe care este atasat dispozitivul de scanare.

O alta posibilitate consta in folosirea unui software pentru detectarea trasaturilor sau a punctelor similare pe suprafetele scanate. Dupa ce au fost selectate punctele de detectie, este folosit algoritmul ICP ( *Iterative Closest Point*) pentru calcularea distantelor dintre aceste trasaturi ancora. In Fig. 16 este prezentat un exemplu de suprapunere a doua scanari pe baza punctelor identificate. In general sunt suficiente 3 puncte dar se pot folosi si mai multe, acest proces se numeste detectarea sau extragerea trasaturilor.

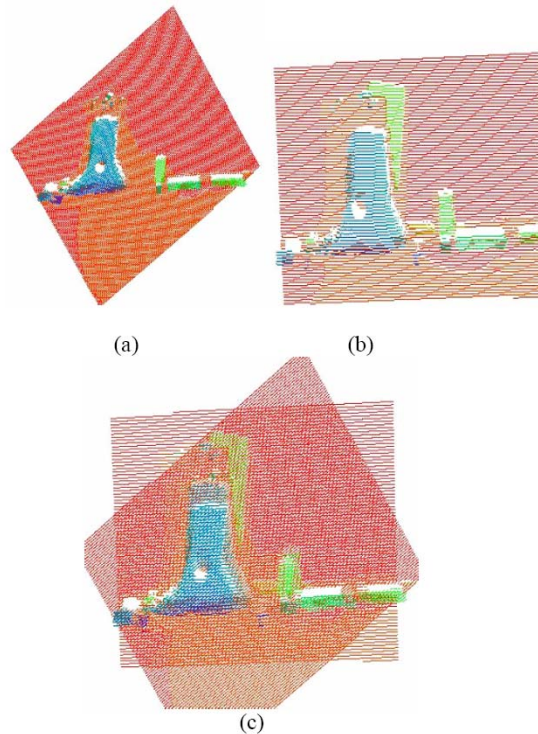


Fig. 16 – Inregistrarea a doua vederi ale unei pompe de apa: a) si b) - cele doua vederi; c) inregistrarea in sistem unic de coordonate (referentierea) celor doua vederi.

### 1.2.3 Teste pentru validarea datelor

Rezultatele inspectiei trebuie sa intruneasca anumite specificatii pentru a oferi precizia necesara pentru o anumita aplicatie. Pe de alta parte, daca instrumentele si metodele folosite ofera o precizie mult mai mare decat ceea ce este necesar, va rezulta un cost ce nu este justificat.

De aceea, orice sarcina de inspectie geometrica contine nu doar obtinerea pozitiiilor relative ale punctelor si obiectelor, dar si estimarea preciziei rezultatelor. In inspectia traditionala si fotogrametrie, unde sunt observate tinte definite, ajustarea prin cele mai mici patrute bazata pe supradeterminare ofera de obicei informatii corecte in ceea ce priveste precizia rezultatelor. Daca numarul de observatii nu este suficient pentru ajustare, se poate estima precizia rezultatelor din propagarea erorilor instrumentelor folosite. In acest caz, precizia dispozitivului de masurare trebuie sa fie stiuta.

Rezultatele pot fi imbunatatite prin aplicarea valorilor de calibrare pentru corectarea erorilor sistematice.

In cazul scannerelor laser, un numar foarte mare de coordonate 3D ale suprafetei unui obiect este masurat intr-un timp foarte scurt. Trasaturi importante ale obiectului, cum ar fi punctele din colturi sau margini, nu sunt inregistrate direct; ele trebuie modelate din norul de puncte intr-un proces separat. Cat timp este posibila inregistrarea unui obiect de mai multe ori din mai multe perspective, este posibila inregistrarea acelorasi puncte in cazul acestor inspectii repetate. De

aceea, deviatiile pot fi observate numai dupa ce obiectele au fost extrase din norul de puncte si modelate. Daca proprietatile geometrice ale obiectelor sunt cunoscute, deviatia punctelor singulare ale suprafetei obiectelor poate da o indicatie a preciziei. Folosirea unei suprafete plane ar fi cel mai simplu caz, dar pot fi considerate si cilindri sau sfere.

Specificatiile legate de precizie, date de producatorii de sisteme de scanare laser, nu sunt comparabile. Experientele au aratat ca adesea precizia acestor instrumente produse in serie limitata variaza de la un instrument la altul si depinde de calibrarea individuala si de atentia cu care a fost manipulat instrumentul. Fiecare nor de puncte produs de un scanner laser contine un numar considerabil de puncte ce contin erori grosiere.

### 1.3 Metode de prelucrare a datelor achiziționate in vederea obținerii de imagini tip harta de profunzime

#### 1.3.1 Obținerea unei imagini tip harta de profunzime prin prelucrarea norilor de puncte

Pentru a putea prelucra o anumită față a obiectului scanat pe o mașina CNC cu 3 axe, trebuie obtinuta imaginea de tip hartă de profunzime din norul de puncte. Această operație presupune cunoașterea următoarelor date de intrare:

- *planul feței*: planul descris de coordonatele  $x$  și  $y$  ale hărții de profunzime;
- *normala la planul feței*: sensul pozitiv al axei  $z$  a hărții de profunzime (orientat spre exteriorul obiectului);
- *raportul pixel-milimetru* în planul  $xy$  al imaginii.

Pentru a simplifica problema, se va considera că fața obiectului care va fi prelucrată va fi în planul  $XY$ . Astfel, prima operație asupra norului de puncte va fi rotația tuturor punctelor, astfel încât fața de interes să devină paralelă cu planul  $XY$ , iar normala la această față să fie orientată în sensul pozitiv al axei  $Z$ . Astfel, mașina CNC va putea prelucra obiectul lucrând de deasupra (Fig. 17).

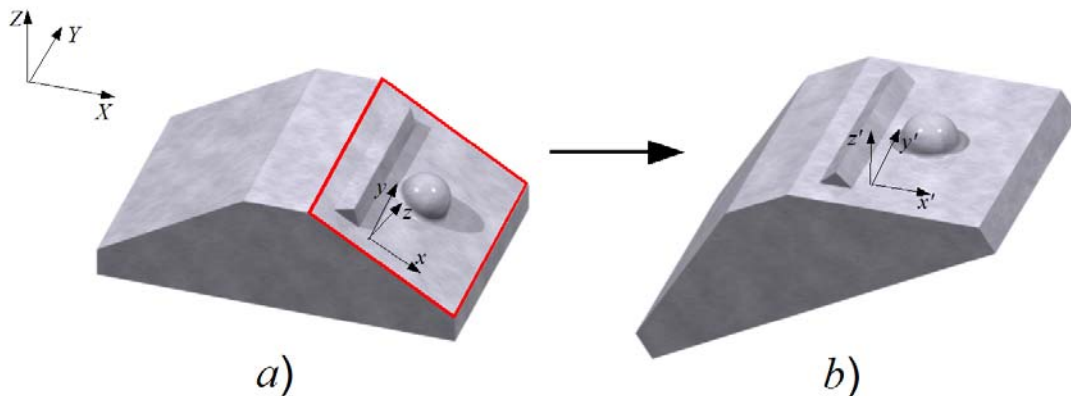


Fig. 17 - Rotația în vederea prelucrării unei fețe pe mașina de frezat CNC cu 3 axe.

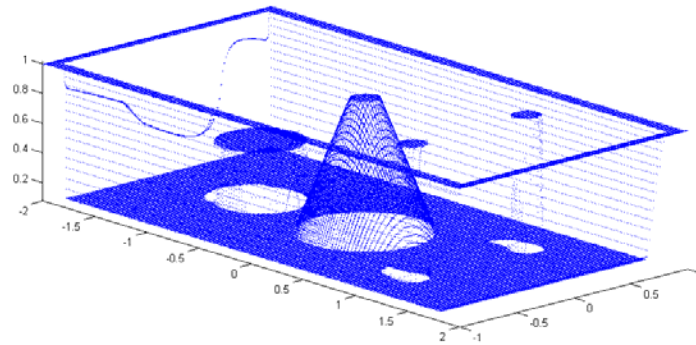
După operația de rotație, coordonatele punctelor care descriu obiectul vor fi într-un sistem de referință având axele paralele cu sistemul de referință al planului imaginii tip harta de profunzime. Urmează maparea coordonatelor exprimate în unități de măsură fizice (de exemplu în milimetri) la coordonate și niveluri de gri ale pixelilor din imagine. Se alege o arie de interes  $[x_{min} \dots x_{max} ; y_{min} \dots y_{max}]$  și o adâncime maximă de tăiere  $z_{min}$ . Înălțimea maximă a pixelilor din

aria de interes se notează cu  $z_{max}$ . Se alege de asemenea dimensiunea unui pixel exprimată în milimetri,  $p$ , sau raportul pixel-milimetru, egal cu  $1/p$ .

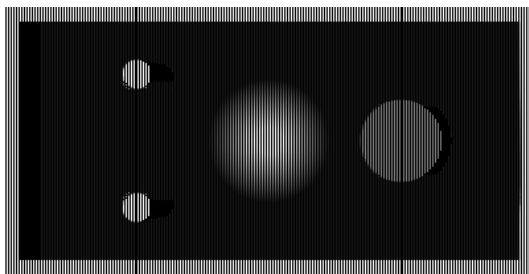
Coordonata  $Z'$  egală cu  $z_{min}$  sau inferioară va fi codată cu culoarea neagră, iar coordonata  $Z'$  egală cu  $z_{max}$  va fi codată cu culoarea albă, în timp ce coordonatele intermediare vor fi codate cu niveluri de gri. Funcția de trecere de la coordonata  $Z'$  la nivelul de gri este liniară.

Aria de interes se împarte în regiuni pătrate având latura  $p$ , unde fiecare regiune corespunde unui pixel. În cadrul acestei regiuni se pot găsi zero, unul sau mai multe puncte din norul de puncte. În cazul pixelilor pentru care există puncte din norul de puncte în regiunile asociate, se poate alege nivelul de gri corespunzător înălțimii maxime a punctelor dintr-o regiune. Pentru pixelii în ale căror zone nu există nici un punct din norul de puncte (situație care poate apărea atunci când rezoluția imaginii este mai ridicată decât rezoluția de scanare sau atunci când nu au putut fi scanate complet toate concavitățile obiectului), este necesară interpolarea, folosind coordonatele  $Z'$  ale punctelor din vecinătate, de exemplu cel mai înalt punct dintr-o vecinătate prestabilită, sau media ponderată a înălțimilor punctelor din apropiere.

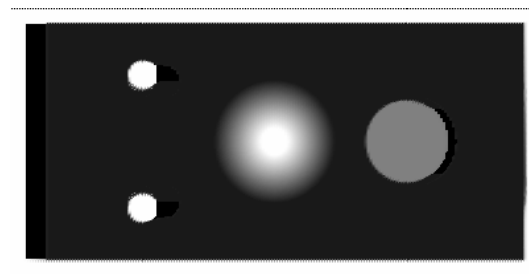
În Fig. 118 este ilustrată trecerea de la un nor de puncte reprezentând interiorul unei matrițe, la imaginea de tip hartă de profunzime. Norul de puncte a fost obținut prin simularea unei operații de scanare folosind 3 treceri pe deasupra matriței.



a)



b)



c)

Fig. 18 - a) Norul de puncte obținut în urma scanării simulate a unei matrițe, folosind 3 treceri;  
b) Harta de profunzime obținută fără interpolare; c) Harta de profunzime după interpolare.

### 1.3.2 Obținerea unei imagini tip harta de profunzime la rezoluție scăzută, pentru procesul de degrosare, folosind aproximare prin adaos

În cazul prelucrărilor de tip degrosare, este important ca niciodată să nu fie eliminat prea mult material din obiectul prelucrat; este de preferat eliminarea unei cantități mai mici de material,

urmând ca surplusul să fie eliminat în etapa de finisare. Cu alte cuvinte, modelul 3D care va fi folosit în vederea planificării traiectoriilor pentru degroșare va trebui să aproximeze obiectul prin adaos.

Deoarece modelul 2.5D sau 3D al unei suprafețe complexe are dimensiuni foarte mari, iar timpul necesar pentru procesarea lor este de asemenea foarte mare, este de preferat ca operațiile care nu necesită precizie ridicată, precum degroșarea, să fie planificate folosind un model aproximativ, de complexitate redusă. Acest model va trebui să aproximeze modelul exact prin adaos.

Modelul folosit în vederea planificării traiectoriilor pentru degroșare va fi o imagine de tip hartă de profunzime la rezoluție redusă. În continuare au fost analizate diverse modalități de obținere a unei aproximații prin adaos pornind de la un model având rezoluție înaltă.

Pentru a face expunerea mai clară se va folosi mai întâi un model 2D, urmând a face generalizarea la modelul 2.5D.

În Fig. 19 este ilustrată o metodă posibilă pentru aproximarea prin adaos a unui semnal discret având 20 eșantioane, cu un alt semnal discret având 4 eșantioane. Fiecare eșantion din semnalul aproximat corespunde la un grup de 5 eșantioane din semnalul inițial. Valoarea unui eșantion din semnalul *b)* este egală cu maximul dintre valorile eșantioanelor din grupul corespunzător de la *a)*. Astfel, semnalul continuu din Fig18 ilustrat cu linie albastră aproximează prin adaos semnalul discret de la *a)*, însă prezintă un dezavantaj: este discontinuu și ca urmare nu poate fi urmărit de către freza mașinii CNC printr-o mișcare continuă. Semnalul continuu ilustrat prin linie roșie poate fi urmărit mult mai ușor de către mașina CNC, însă este o aproximație mai slabă a semnalului original. Este posibilă de asemenea construirea unui semnal neted (derivabil), de ordin superior, care ar putea fi urmărit mai ușor în timpul unei operații de tăiere la viteză ridicată, și care ar reduce șocurile mecanice datorate vârfulor de accelerație care apar la schimbarea bruscă a direcției de deplasare a punctului condus al mașinii numerice.

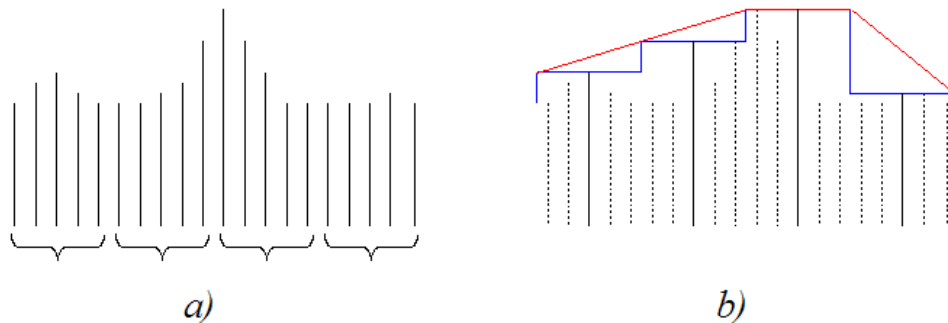


Fig. 19 - Aproximarea prin adaos.

## 2 Proiectarea sistemului software de prelucrare a imaginilor tip harta de înalțimi în vederea generării traiectoriilor de prelucrare. Diseminare rezultate științifice

### 2.1 Metode și algoritmi de îmbunătățirea și prelucrare a imaginilor tip harta de profunzime

#### 2.1.1 Operații de îmbunătățire a imaginilor de tip harta de profunzime

O imagine de tip hartă de înălțimi (*height map*, *depth map*) este o imagine pe niveluri de gri, unde înălțimea (coordonata *Z*) este codificată prin luminizitatea pixelilor. Cu ajutorul acestui tip de

imagini pot fi memorate și procesate suprafețe discrete de forma  $z = f(x, y)$ , vezi Fig. 20. Aceste imagini pot fi generate din programele de grafică tridimensională.

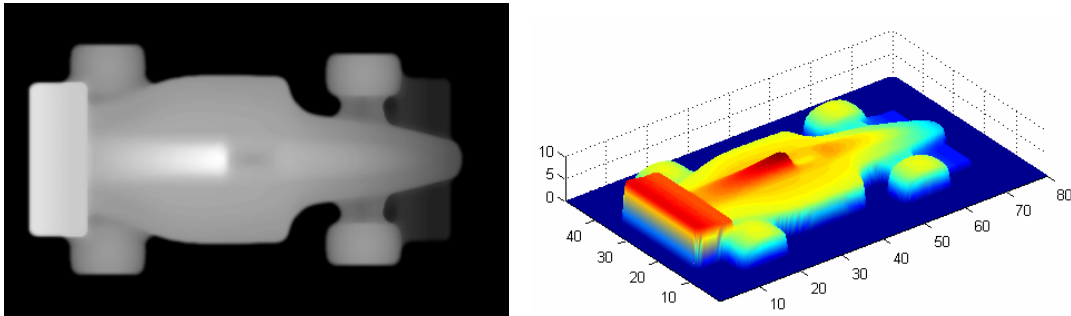


Fig. 20 - a) Imagine de tip "hartă de înălțimi" b) Reprezentare 3D a imaginii de la a).

Principala operație de îmbunătățire a imaginii de tip hartă de înălțimi constă în ajustarea histogrammei pentru maximizarea conținutului informațional. Se consideră că nu va fi necesară efectuarea altor operații de îmbunătățire a imaginilor întrucât numărul de puncte este deja supus operațiilor de filtrare, reducere, îmbunătățire, etc.

### 2.1.2 Algoritmi de extragere și prelucrare a conturilor din imagini tip hartă de înălțime

Se vor folosi algoritmi pentru extragerea conturilor și optimizarea poliliniilor. Pentru extragerea conturului se va folosi pentru început o implementare a algoritmului Moore-Neighbour. Trajectoriile generate vor fi linii drepte sau arce de cerc. Inițial sunt generate foarte multe segmente mici, care apoi sunt simplificate cu algoritmul Douglas – Peucker, rezultând segmente de dreaptă de lungime variabilă, în funcție de curbura trajectoriei. Se poate seta toleranța – adică distanța maximă dintre traectoria complexă și cea simplificată.

După generarea segmentelor de lungime variabilă se încearcă identificarea segmentelor consecutive care aproximează un arc. Arcele sunt generate doar pentru trajectoriile din planul XY. Se poate simula efectul fiecărui tip de finisare. De exemplu, dacă se alege o finisare folosind trajectorii în planul XZ și YZ, având distanța de 3 milimetri între trajectorii, se poate observa granulația piesei după prelucrare.

## 2.2 Metode de generare a trajectoriilor optime de prelucrare brută din imagini tip hartă de profunzime

### 2.2.1 Strategii de prelucrare prin aschiere în vederea degrosării

În etapa de prelucrare brută (sau de degrosare) se vor folosi doar trajectorii la nivel Z constant și freze plate. La început se obține o imagine binară prin binarizarea imaginii cu nivele de gri originală cu pragul de binarizare aferent nivelului Z dorit.

Se folosește un algoritm de detecție a conturului pentru fiecare imagine binară astfel obținută din imaginea originală cu nivele de gri.

Un exemplu de imagine binarizată în sensul de mai sus este redat în Fig. 21.

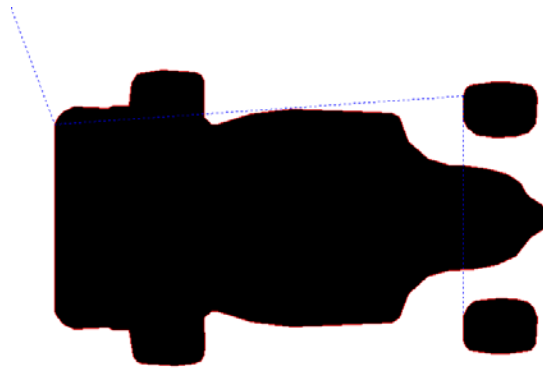


Fig. 21 – Imaginea binarizata pentru  $Z = -5$ . Detectarea conturului si traiectoria sculei.

### 2.2.2 *Generarea traiectoriilor de degrosare din imagini de tip harta de profunzime*

Tăierea brută sau degrosarea se realizează folosind traiectorii paralele fie cu axa OX, fie cu axa OY. Se introduce adâncimea  $Z$  la care va intra scula aschietoare, și se înlătură excesul de material.

Aceste doua tipuri de strategii de generare a traiectoriilor la degrosare sunt redade in Fig. 22.

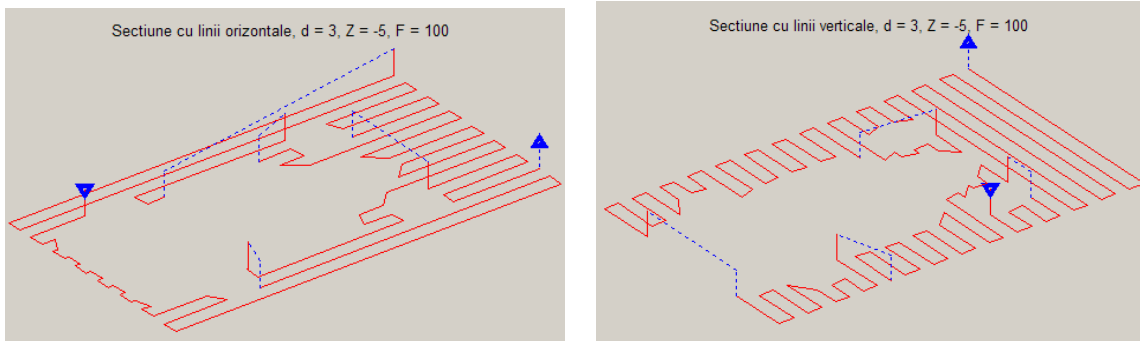


Fig. 22 – Generarea traiectoriilor de degrosare

## 2.3 Metode de generare a traiectoriilor optime de prelucrare în vederea finisării din imagini tip harta de profunzime

### 2.3.1 *Strategii de prelucrare prin aschiere în vederea finisarii*

Tăierea fină (sau prelucrarea de finisare) se poate realiza prin 3 metode de generare a traiectoriilor:

- traiectorii foarte apropiate, în planul XZ;
- traiectorii foarte apropiate, în planul YZ;
- curbe de izonivel.

Aceste moduri de generare a traiectoriilor, pentru care au fost elaborati trei algoritmi specifici, sunt reprezentate in Fig. 23.



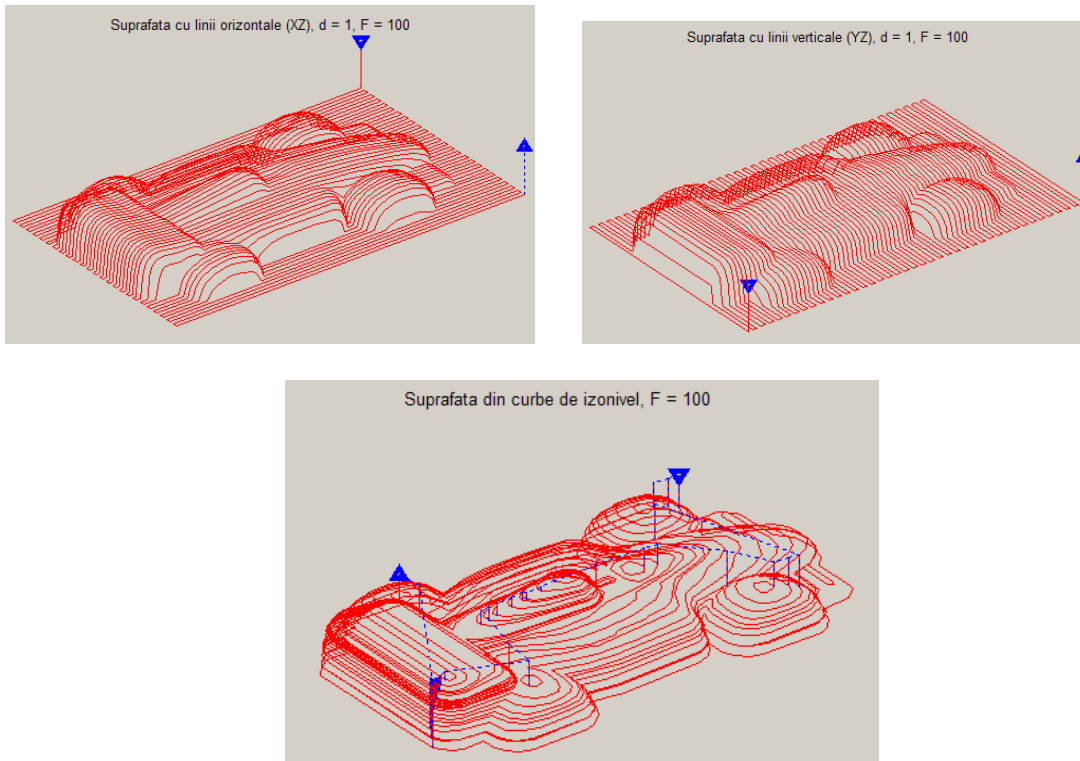


Fig. 23 – Strategii de prelucrare prin aschiere in vederea finisarii.

### 2.3.2 Optimizarea traiectoriilor de finisare din imagini de tip harta de profunzime

Optimizarea traiectoriilor corespunzatoare regimului de prelucrare de finisare este foarte importanta, intrucat duce la minimizarea timpului de executie si de asemenea tine cont de fortele de aschiere ce actioneaza asupra sculei de prelucrare, cat si de alte restrictii tehnologice.

- *Alegerea intre aschiera conventionala sau aschiera „in urcare”*

Cele doua tipuri de aschiere se refera la directia de avans a piesei supuse aschierii relativ la directia sculei aschietoare. Folosind tehnica de aschiere conventionala, piesa prelucrata inainteaza in sensul de rotatie al sculei de prelucrare, astfel incat viteza periferica a sculei aschietoare este opusa directiei de avans. Folosind aschiera "in urcare", piesa prelucrata avanseaza in aceeaasi directie ca si rotatia uneltei de prelucrare.

Aschiera "in urcare" are mai multe avantaje, de la o finisare mai buna la prelungirea duratei de viata a uneltei, dar poate fi folosita doar daca masina de frezat are compensare pentru cursa moarta si rigiditate.

Astfel se propune ca in modulul software al sistemului ce va fi implementat utilizatorul sa poate alege tipul de aschiere dorit, iar algoritmi de generare si optimizare a traiectoriilor sa tina cont de acest fapt.

- *Minimizarea numarului de intrari in material*

Realizarea unei intrari in material utilizand o scula de prelucrare induce o tensiune asupra acestuia si ii reduce semnificativ timpul de viata. Evitarea intrarilor prea frecvente in material este foarte importanta mai ales la operatia de degrosare; in unele cazuri poate fi evitata de la inceput prin inceperea procesului de degrosare din exterior spre interior.

In alte cazuri, acest lucru este imposibil (de exemplu gaura interioara); in astfel de cazuri se va folosi o traiectorie de prelucrare de tip spirala pentru minimizarea uzurii sculei, si de asemenea o viteza de avans adecvata.

- *Minimizarea tensiunii in unealta de prelucrare si a fortei de aschiere*

Tensiunea in scula aschietoare poate fi estimata in functie de tipul materialului, viteza de avans, viteza de rotatie, unghiul de prelucrare, tipul de aschiere si alti parametrii de prelucrare.

Prelungirea duratei de viata a unelei de prelucrare poate fi realizata prin considerarea tuturor parametrilor enumerati in etapa de generare a traiectoriilor de prelucrare. Alegerea unei viteze de avans prea mare poate duce la cresterea fortei de taiere, cu riscul de rupere al sculei aschietoare. Alegerea unei viteze de avans scazute duce la un timp de prelucrare foarte mare si supraincalzirea frezei de aschiere.

Vor fi dezvoltati algoritmi de adaptare a regimurilor de aschiere, in vederea generarii traiectoriilor de prelucrare optime din punct de vedere tehnico-economic pentru a creste durate de viata a sculei si a reduce timpul de executie (sau a mari masa de material indepartat in timp).

- *Calculul vitezei de avans optime bazat pe rata de inlaturare a materialului*

Modelul imagine de tip harta de profunzime permite calcularea la fiecare pas a cantitatii de material inlaturat. Avand aceste date, este posibila determinarea unei viteze de avans variabile pentru a minimiza timpul de executie si forta de aschiere exercitata.

### 2.3.3 *Adoptarea unei strategii de finisare adaptiva pentru suprafete complexe*

Dupa etapa de prelucrare bruta, trebuie genare noi traiectorii pentru etapa de finisare. Un ciclu de finisare este optim daca se foloseste o combinatie a tuturor celor trei tipuri de traiectorii izoparametrice.

Curbele de izonivel sunt obtinute prin binarizarea succesiva a imaginii tip harta de profunzime folosind pragul de binarizare corespunzator adancimii dorite de taiere. O traiectorie de prelucrare avand parametrul  $X$  constant poate fi obtinuta prin extragerea unei coloane din imagine. In acelasi mod o traiectorie avand parametrul  $Y$  constant este obtinuta prin extragerea unei linii din imaginea de tip harta de profunzime a obiectului. Distanta dintre traiectoriile de finisare este determinata folosind un algoritm adaptiv de extragere a curbelor de izonivel.

Optimizarea traiectoriilor urmarite de catre freza este deasemenea foarte importanta in determinarea timpului total de prelucrare. Acesta problema de optimizare, va fi implementata in cadrul sistemului prin tehnici speciale de interpolare (Fig. 24).

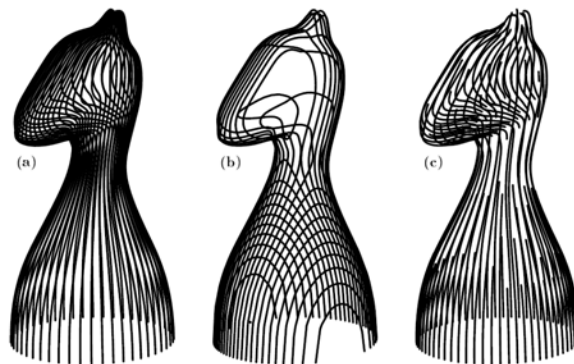


Fig. 24 - (a) Traiectoriile izoparametrice nu sunt optime in cazul aceste suprafete 3D complexe. (b) Traiectoriile generate de plane egal distantate sunt prea rare. (c) Solutie optima: *izocurbele adaptive*.

## Solutia hardware si software propusa

In urma studiului realizat si a programelor de test executate, se propune urmatoarea structura hardware si software a sistemului de scanare laser adaptiv si de inalta precizie (Fig. 25).

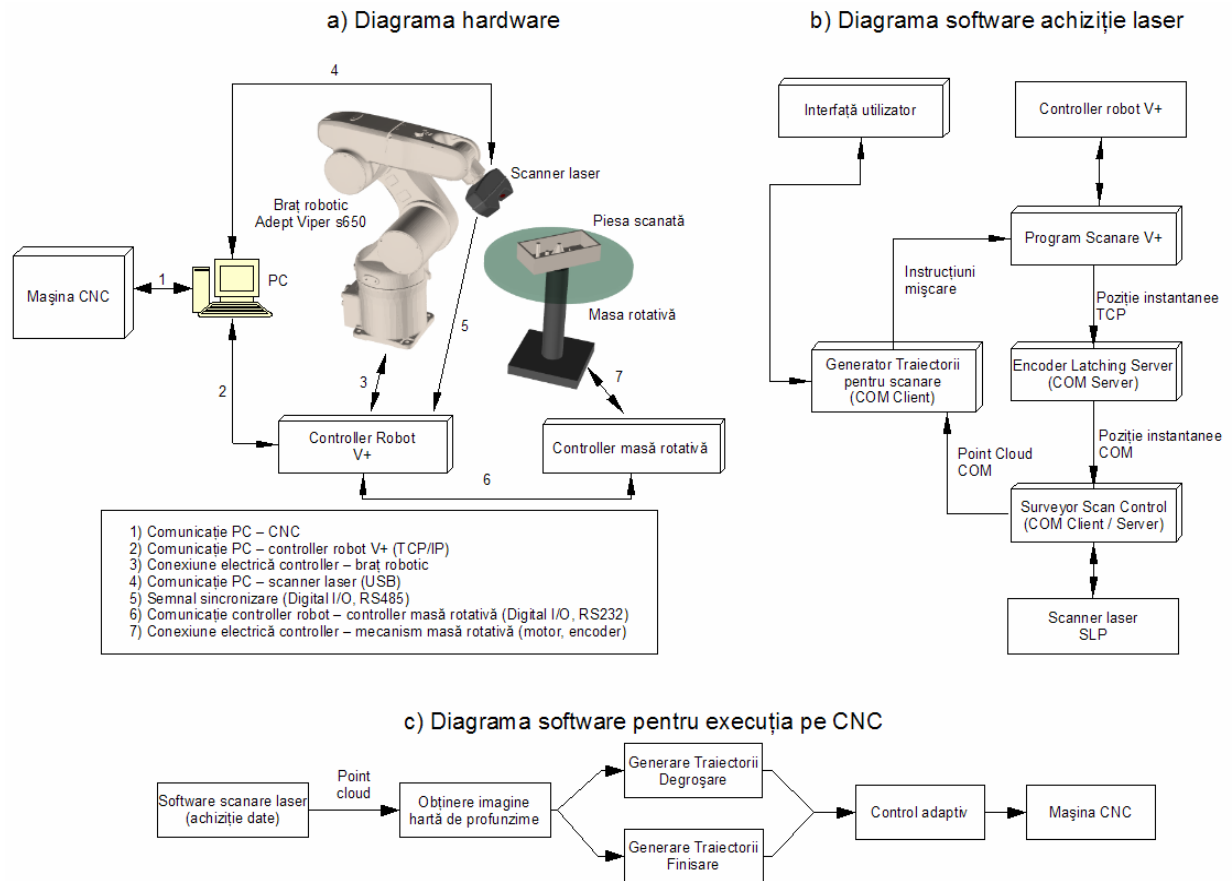


Fig. 25 – Structura hardware si software a sistemului de scanare laser si procesare a imaginilor de tip harta de inaltime in vederea obtinerii traiectoriilor de prelucrare in vederea reproducerii obiectelor.

Dispozitivul de scanare laser ales este tip laser Clasa II de distanta scurta, cu triangulatie, avand doi senzori de achizitie CMOS. In general dispozitivele de scanare prezinta doar un senzor, solutia propusa fiind ideala pentru scanarea suprafetelor complexe. Distanțele optime de scanare sunt cuprinse intre 71 mm si 242 mm. Latimea liniei de scanare variaza intre 31 si 83 mm. Precizia medie de masura la nivel de punct este de 31  $\mu\text{m}$ . Rata de achizitie este cuprinsa intre 50 si 150 cadre pe secunda, iar numarul de puncte citite pe o linie de scanare este egal cu 480. Acest sistem de achizitie laser se interfațeaza cu PC-ul folosind un port USB standard, si 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 articulata vertical cu 6 grade de libertate. Repetabilitatea miscarii bratului robot este de 0.02 mm. Domeniile de deplasare (6 axe, 6 articulatii de rotatie) ale sistemului robot sunt: Axa (articulatia) 1:  $\pm 170^\circ$ , Axa (articulatia) 2:  $-170^\circ, +45^\circ$ , Axa (articulatia) 3):  $-29^\circ, +256^\circ$ , Axa (articulatia) 4):  $\pm 190^\circ$ , Axa (articulatia) 5):  $\pm 120^\circ$ , Axa (articulatia) 6):  $\pm 360^\circ$ . Viteza compusa la varf este 8200 mm.

Pentru integrarea dispozitivului de scanare cu bratul robot trebuie dezvoltate urmatoarele module software:

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

### *Performante estimate*

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

*Precizia masuratorii* este de ordinul zecilor de micrometri, intrucat atat dispozitivul de scanare cat si bratul articulata sunt dispozitive de inalta precizie.

*Timpul de scanare* estimat pentru o suprafata simpla:

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

Timpul 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 si inaltimea maxima specificate dupa cum urmeaza:

- pentru scanare completa de deasupra, inaltimea maxima a piesei este de 200 mm, si este impusa atat de distanta maxima de scanare a dispozitivului laser, cat si de constrangeri datorate miscarii robotului. Diametrul maxim al piesei este de 450 mm.
- pentru scanare din lateral, diametrul maxim este de 200 mm, iar inaltimea maxima este de 500 mm. Restrictia de 200 mm este din cauza necesitatii unei distante minime intre dispozitivul de scanare si piesa.
- pentru scanare combinata, din lateral si de deasupra, diametrul maxim este de 200 mm, iar inaltimea maxima de 200 mm.

**Director de proiect,**

**Prof. Dr. Ing THEODOR BORANGIU**