

Universitatea Politehnica din Bucuresti
Facultatea de Automatica si Calculatoare

**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 III (2009 - intermediara)

**Proiectarea si implementarea algoritmilor de compensare a razei
uneltei de prelucrare. Managementul proiectului. Proiectarea si
implementarea metodelor de optimizare a traiectoriilor de
prelucrare. Diseminare rezultate științifice**

1.1. Definirea si generarea elementelor structurale aferente modelelor de unelte prelucrătoare

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 $z = f(x, y)$.

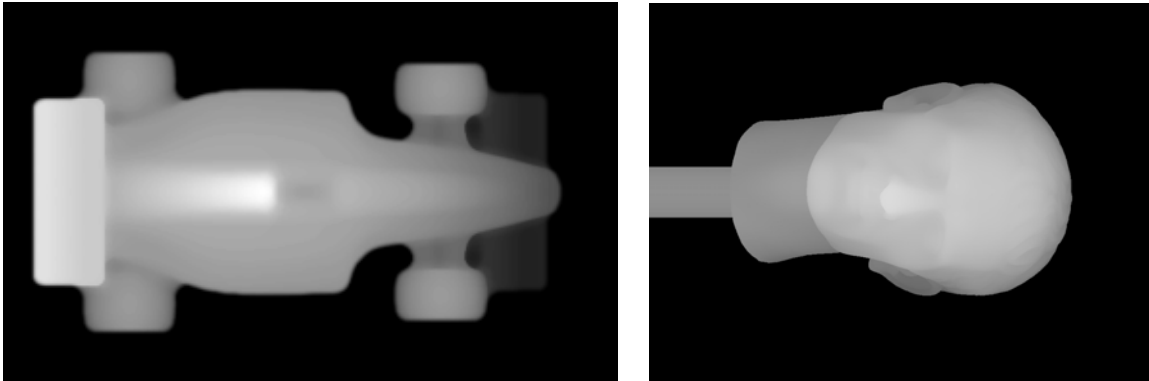


Fig. 1. Imagini de tip ”hartă de profunzime”

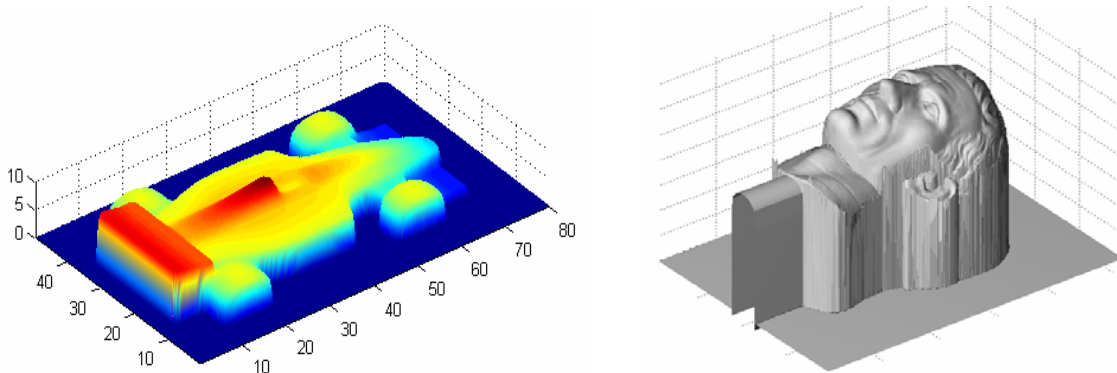


Fig. 2 Reprezentarea 3D a imaginilor de la Fig.2

Dimensiunile piesei sunt date de raportul pixel-milimetru și de coordonatele Z corespunzătoare pixelilor albi și pixelilor negri. În acest exemplu, imaginea are 320 x 200 pixeli, un raport pixel-milimetru de 4:1, rezultând dimensiunea piesei de 80 x 50 mm. Culoarea neagră corespunde nivelului $Z = 0$ mm, culoarea albă corespunde nivelului $Z = 10$ mm.

A fost dezvoltat un program de generare a traiectoriilor pentru realizarea acestor suprafețe. Traiectoriile pot fi salvate într-un fișier cu instrucțiuni G-Code, în format ISO.

Fereastra principală a programului este:

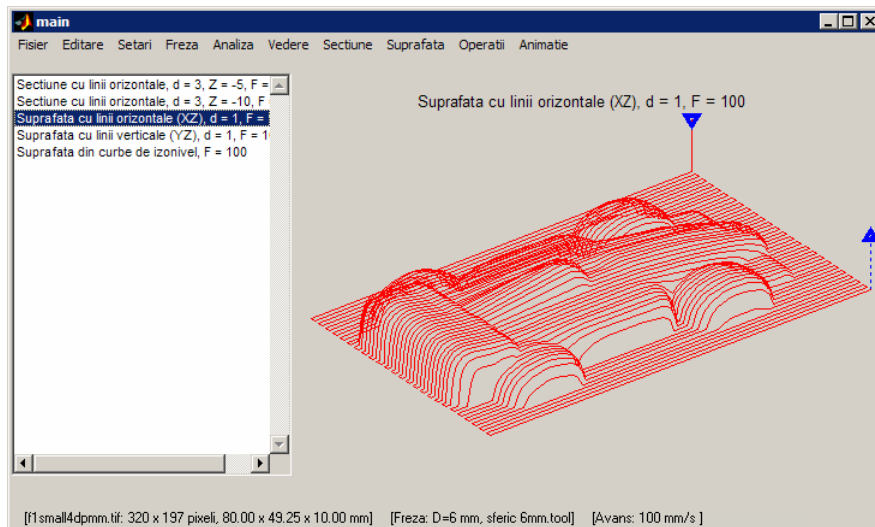


Fig. 3 Programul realizat permite vizualizarea traiectoriilor de prelucrare generate

Programul permite definirea profilului frezei, și calculează suprafața pe care se poate deplasa punctul condus al frezei, astfel încât aceasta să fie tot timpul tangentă la model.

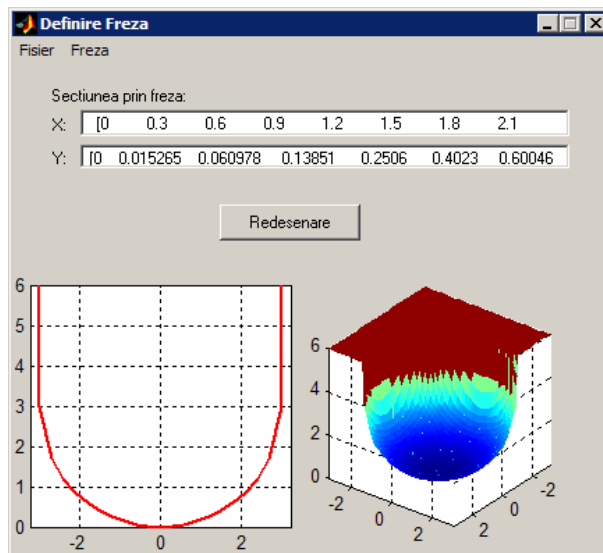


Fig. 4. Ecranul de definire a modelului sculei de frezare

Frezele pot avea una din cele 3 forme predefinite (sferică, conică și cilindrică), sau orice formă definită de utilizator prin doi vectori X și Y care reprezintă secțiunea prin freză. Modelul unei freze poate fi salvat într-un fișier cu extensia `.tool`.

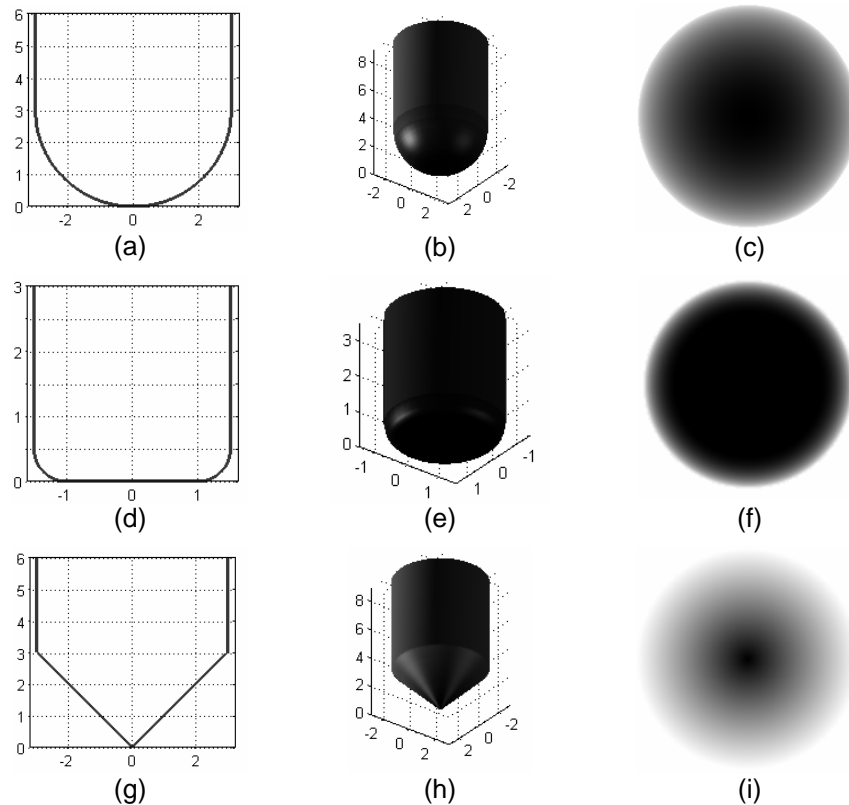


Fig. 5. Modele de scule de frezare

- a,b,c: freză cu cap sferic;
- d,e,f: freză cu cap rotunjit la colțuri;
- g,h,i: freză de tip V;
- a,d,g: vedere în secțiune;
- b,e,h: vedere 3D;
- c,f,i: reprezentate de tip "hartă de profunzime".

Calculul suprafeței pe care se deplasează punctul condus astfel încât freza să fie tangentă la model se calculează folosind operația de dilatare morfologică pentru imagini cu niveluri de gri (funcția Matlab `imdilate`).

Exemplu (freza folosită este sferică, având diametrul de 6 mm):

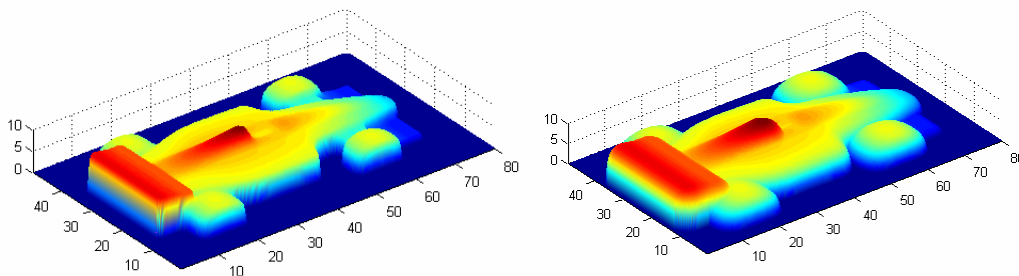
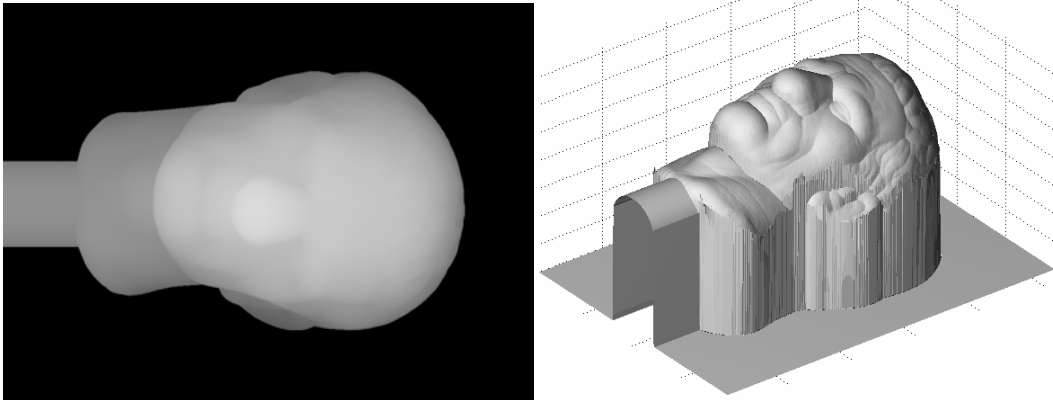


Fig. 6 Modelul piesei și suprafața dilatată de prelucrare a piesei
a) modelul piesei; b) suprafața pe care merge punctul condus

Al doilea exemplu, folosind de asemenea o freză sferică:

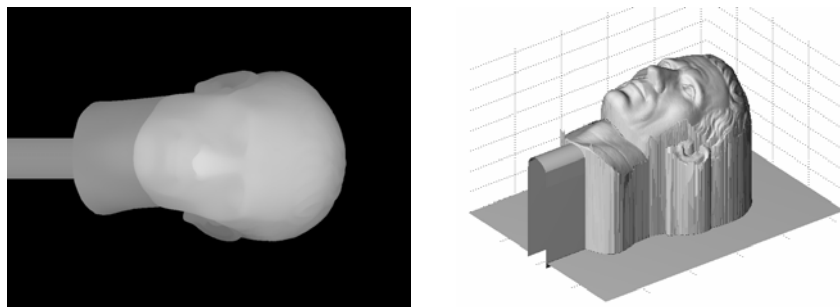


1.2. Implementare algoritmi de prelucrare morfologica a imaginilor tip harta de inaltimi

Pentru a putea prelucra o anumită față a obiectului scanat pe o mașină CNC cu 3 axe, trebuie obținută 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 numai de deasupra (Fig. 7).



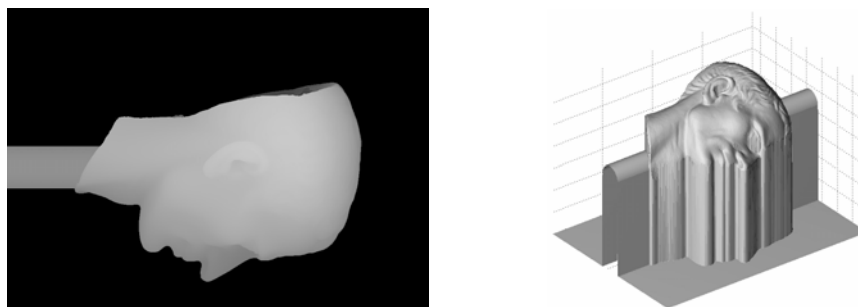


Fig. 7. Rotația în vederea prelucrării unei fețe pe mașina de frezat CNC cu 3 axe. Piesa este prelucrată din față și din profil.

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 hartă 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. 8 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.

Pornind de la acest nor de puncte a fost generat un model al suprafeței 2.5D, văzut de deasupra, de tip hartă de profunzime, care poate fi folosit pentru calculul traiectoriilor mașinii numerice. Fig. 8 (b) prezintă primul pas al generării hărții de profunzime, care prezintă discontinuități acolo unde densitatea punctelor din norul de puncte nu este suficient de ridicată, iar Fig. 8 (c) prezintă harta de profunzime după al doilea pas, în care punctele nedefinite au fost interpolate pe baza valorilor pixelilor vecini.

Imaginea astfel obținută permite și analizarea zonelor care nu au fost acoperite de scanare, și poate fi folosită pentru determinarea unor strategii adaptive de scanare, care vor încerca să acopere suprafața piesei în totalitate.

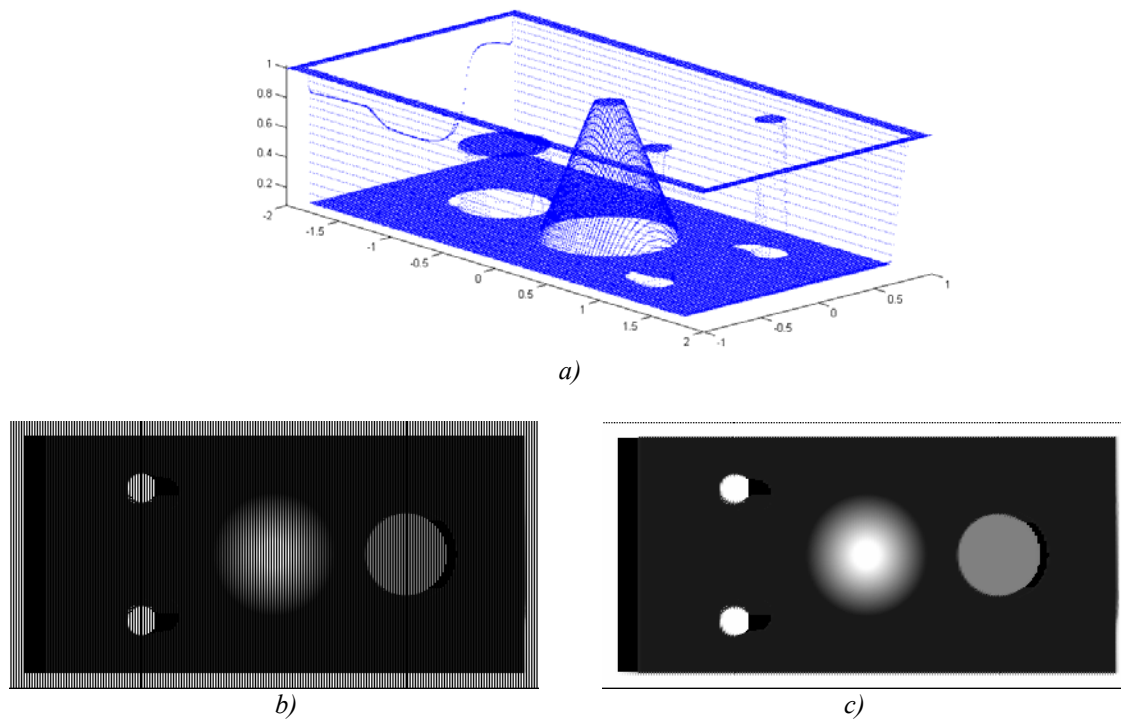


Fig. 8. a) Norul de puncte obținut în urma scanării simulate a unei matrițe, folosind 3 treceri;
 b) Harta de profunzime obținută fără interpolare; c) Harta de profunzime după interpolare.

1.2.1 Obținerea unei imagini tip harta de profunzime la rezoluție scăzută, pentru procesul de degroșare, folosind aproximare prin adaos

În cazul prelucrărilor de tip degroșare, 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. 9 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 eşantioanelor 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 şi ca urmare nu poate fi urmărit de către freza maşinii CNC printr-o mişcare continuă. Semnalul continuu ilustrat prin linie roşie poate fi urmărit mult mai uşor de către maşina CNC, însă este o aproximaţie mai slabă a semnalului original. Este posibilă de asemenea construirea unui semnal neted (derivabil), de ordin superior, care ar putea fi urmărit mai uşor în timpul unei operaţii de tăiere la viteză ridicată, şi care ar reduce şocurile mecanice datorate vârfurilor de acceleraţie care apar la schimbarea bruscă a direcţiei de deplasare a punctului condus al maşinii numerice.

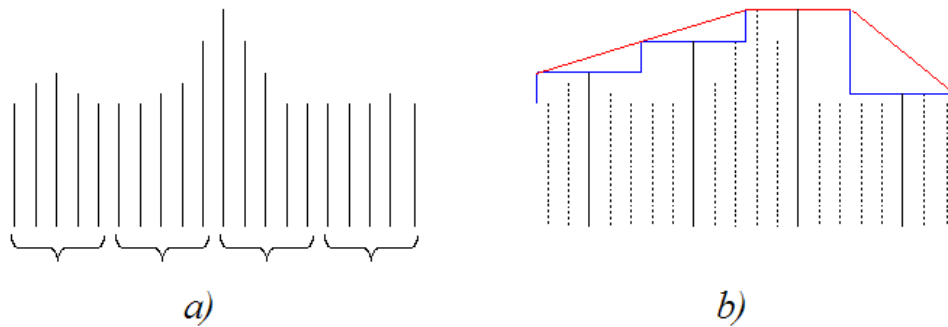
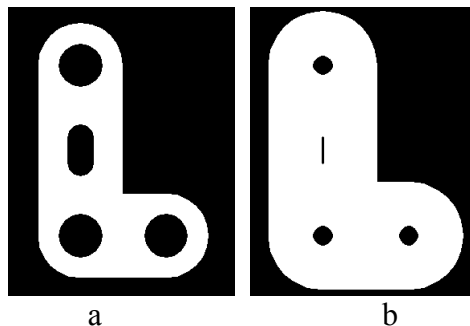


Fig. 9. Aproximarea prin adaos.

1.3. Estimarea erorilor de prelucrare si a eventualelor coliziuni pe baza modelului uneltei de prelucrare

Un profil 2D poate fi stocat ca o imagine binara, unde pixeli albi reprezinta material ce nu trebuie prelucrat, iar pixeli negri reprezinta materialul ce trebuie eliminat. Folosind acest model, este posibila generarea de traiectorii pentru operatiunea de frezare 2D folosind dilatarea morfologica cu un element structural rotund.

Dupa dilatare, se foloseste implementarea algoritmului de extragere a conturului (Moore-Neighbour) si traiectoria de prelucrare este generate Prin erodarea imaginii dilatate cu acelasi element structural, se obtine obiectul prelucrat. (Fig. 10)



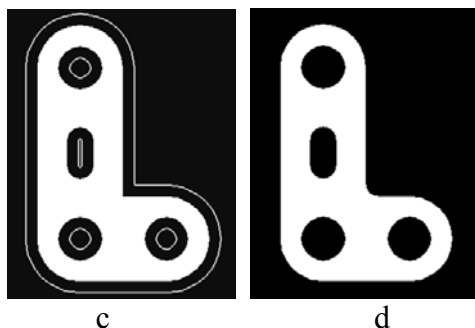


Fig. 10. Generarea traiectoriilor 2D folosind eroziune morfologica: a) modelul de executat; b) imaginea dilatata c) traiectoria generata d) piesa cu colturile rotunjite

Cresterea vitezei de executie a operatiei de dilatare morfologica se face prin prelucrarea doar pixelilor de contur ai modelului de executat. Avantajul aceste abordari este ca poate fi folosita in cazul oricarui model (de forma libera) 2D, fara a fi necesara calculul intersecțiilor între primitive geometrice. Aceasta metoda poate calcula daca o raza data a uneltei de prelucrare este potrivita pentru prelucrarea modelului 3D prin compararea cu modelul erodat. O limitare a metodei alese, consta in faptul ca precizia este conditionata de rezolutia imaginii.

Aceasta metoda poate fi extinsa pentru prelucrarea suprafetelor 2.5D stocate ca imagini cu nivele de gri, permitand calculul compensarii razei uneltei de prelucrare pentru diverse tipuri de freze.

Algoritmul implementat considera ca in fiecare locatie din planul XY (oricare pixel din imagine) trebuie calculata adancimea ce trebuie atinsa de catre scula (freza), astfel incat aceasta sa fie tangenta la suprafata. Forma sculei de frezare este modelata ca o imagine cu nivele de gri folosind aceeasi factori de scalare ca si suprafata ce va fi prelucrata. Principiul ce sta la baza compensarii discrete a uneltei bazata pe calculul gradientului in imaginea 2D a sculei este evidentiat in imaginea alaturata.

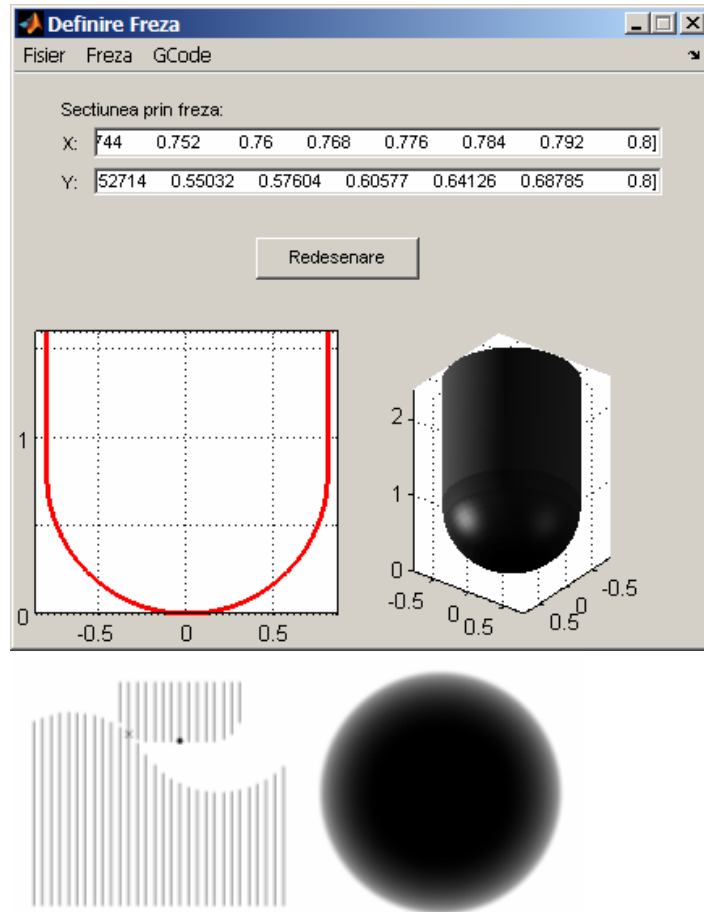


Fig.11. Compensarea discreta a sculei de frezare. Definirea si reprezentarea sculei de frezare ca o imagine cu nivele de gri.

Se considera ca imaginea cu nivele de gri a piesei de prelucrat este stocata ca o matrice de $M \times N$ pixeli, A si imaginea sculei de prelucrat este o matrice de $n \times m$ pixeli B . Se va folosi si o masca booleana de dimensiuni $m \times n$ care are valoarea adevarata unde imaginea sculei are valori valide (i.e. in interiorul cercului). Suprafata pe care varful sculei de frezare se poate misca tangent la piesa prelucrta este calculata in matricea C , care are de asemenea $M \times N$ pixeli. Algoritmul este

```
for ia = 1 to M
  for ja = 1 to N
    h = +inf
    for ib = 1 to m
      for jb = 1 to n
        if mask[ib,jb] = true
          hc = A[ia+ib-int(m/2),
                ja+jb-int(n/2)] - B[ib,jb];
          h = min(h, hc)
        end
      end
    end
    C[ia,ja] = h;
  end
end
```

În implementarea reală, se iau în considerare și zona limitrofă a imaginii, fiind adăugate teste suplimentare.

Algoritmul are complexitatea $O(M \cdot N \cdot m \cdot n)$ sau $O(N^4)$. Acest fapt crescând semnificativ timpul de calcul, pentru anumite traiectorii de prelucrare izoparametrice nu este necesar calculul compensării pentru toată suprafața. Calculul este echivalent dilatării morfologice a unei imagini cu nivele de gri, folosind un element structural ce reprezintă negativul imaginii cu nivele de gri a sculei de prelucrare.

După calcularea suprafeței de offset, sunt generate traiectoriile izoparametrice folosind operații de prelucrare a imaginii. O traiectorie având parametrul X constant poate fi obținută extragând o coloană din imagine. În același mod, o traiectorie de prelucrare cu Y constant este obținută extragând o linie din imagine.

Traietoriile având parametru Z constant (curbe de izonivel) pot fi calculate prin binarizarea imaginii la valoarea corespunzătoare nivelului Z , urmată de aplicarea algoritmului de detectarea conturului pe imaginea binară rezultată. Traietoriile care urmăresc o direcție constantă în planul XY sunt obținute prin calcularea punctelor liniei 2D corespunzătoare acelei direcții folosind implementarea algoritmului Bresenham, și citirea valorilor nivelelor de gri din aceste puncte.

Traietoriile generate în acest mod sunt folosite în etapa de finisare a piesei, numai după etapa de degrosare a fost executată. Pentru generarea traiectoriilor de degrosare, s-au considerat următoarele:

- scula de prelucrare nu atinge suprafața modelului, păstrând o distanță constantă față de model (definită de utilizator).
- scula de prelucrare nu va intra în material mai mult decât adâncimea maximă admisă.

Pentru etapa de degrosare, se folosesc traiectorii la nivel constant și o sculă plată. Aceasta permitând folosirea algoritmului de compensare pentru imagini 2D care este mult mai rapid. Se obține în primul rând o imagine binară prin binarizarea imaginii cu nivele de gri originale la nivelul Z dorit. Pentru a obține o distanță de siguranță între sculă și modelul ideal, se generează un model al sculei cu o rază ce conține și distanța de siguranță.

Etapă de degrosare este prezentată în pseudocod mai jos:

```
for Z = -dz to -MZ step -dz
    B = threshold(model, Z)
    se = round_structural_element
        (tool_radius + offset)
    Boff = dilate(B, se)
    make_roughing_cut(Boff, Z + offset)
end
```

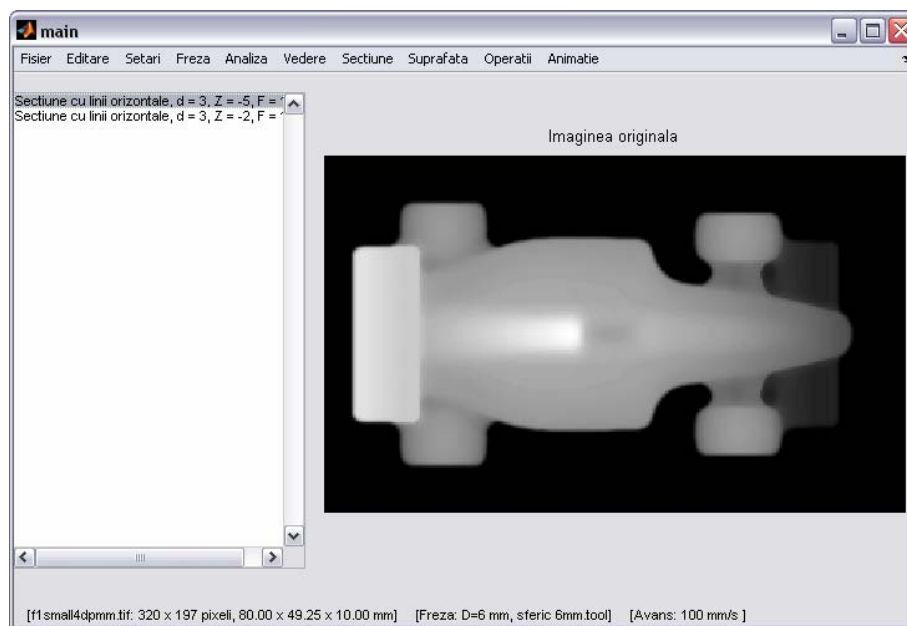


Fig. 12. Fereastra principală a programului software dezvoltat.

Exemplu: realizarea unei suprafețe complexe pe mașina numerică.

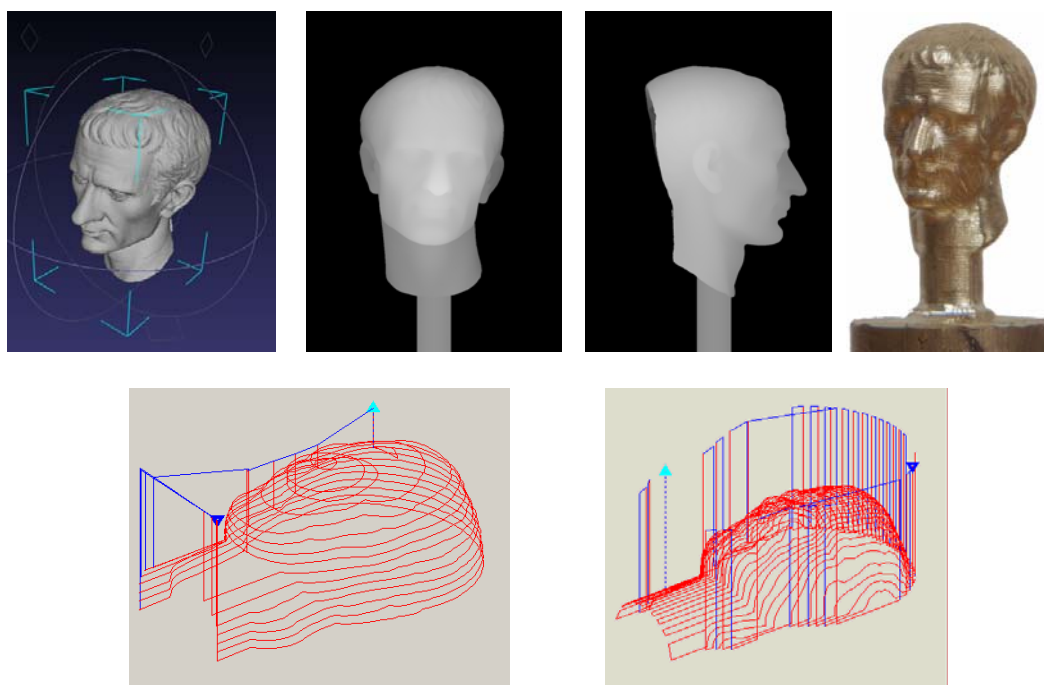


Fig. 13. a) Modelul 3D original (MeshLab); b) și c) - vederi de tip hartă de profunzime din față și din profil; d) modelul realizat pe mașina CNC din alamă (diametru 14 mm, înălțime 20 mm); e) și f) – traiectorii de prelucrare izoparametrice, în planurile XY și XZ