



P. Bojanić<sup>1</sup>, G. Mladenović<sup>2</sup>

## ANALIZA PROBLEMA PRI GENERISANJU PUTANJE ALATA PRI OBRADI SKULPTORSKIH POVRŠINA

### Rezime

*Kod obrade radnih predmeta sa skulptorskim površinama na CNC mašinama alatkama, putanja alata je ključni element za kvalitet obrađene površine i za efikasnost obrade. U radu se daje opšta analiza problema i pravaca rešavanja u generisanju putanje alata pri obradi skulptorskih površina. Definisani su kriterijumi za optimizaciju pri generisanju putanje alata.*

*Ključne reči: putanja alata, skulptorska površina, CNC obrada*

### 1. UVOD

Mnogi proizvodi imaju, u svojoj strukturi, delove sa vrlo složenom konfiguracijom površina koje se ne mogu analitički opisati već se njihov opis svodi na aproksimaciju polinomima višeg reda. Složen oblik površina nastaje iz funkcionalnih ili estetskih razloga. Poznato je da se takvi delovi ne mogu u potpunosti predstaviti tehničkim crtežom, pa je proizvodnja istih isključivo orijentisana na primenu CNC tehnologije. Primena 3-osnih i 5-osnih CNC mašina alatki se podrazumeva u izradi delova sa pomenutim, složenim ili skulptorskim površinama. Peto-osne mašine imaju simultano upravljanje po 5 osa, tri translacije, u pravcu osa x, y i z, i dve rotacije koje izvodi nosač alata ili sto mašine, ili kombinovano. U poređenju sa 3-osnim mašinama alatkama, 5-osne mašine su efikasnije u obradi skulptorskih površina a dobija se i veći kvalitet obrađenih površina. U praksi je moguće sresti i upotrebu  $3\frac{1}{2}\frac{1}{2}$  CNC mašine, koje se odlikuju nižom cenom, manjom popustljivošću u odnosu na 5-osne mašine ali i nemogućnošću upravljanja osama rotacije za vreme procesa rezanja. Ovo pak podrazumeva da je neophodan gubitak vremena u postavljanju definisane orijentacije, što se odražava na efikasnost izrade radnog predmeta.

Postoje dve klasifikacije faza obrade skulptorskih površina. Jedna podrazumeva da se do konačnog oblika skulptorske površine dolazi kroz grubu, polufinu, finu obradu i obradu čišćenja nakon čega sledi poliranje površina. Grubom obradom se skida velika količina materijala i kao rezultat se dobija gruba aproksimacija konačnog oblika površine. U toku polufine obrade uklanja se višak materijala dobijen aproksimativnom grubom obradom i dobija se ofsetovana površina sa dodatkom za finu obradu. U toku fine obrade dobija se konačan oblik površine. U toku operacije čišćenja uklanja se zaostali materijal koji nije mogao biti uklonjen zbog velikog prečnika alata. Druga klasifikacija je grublja i ona prepoznaje samo grubu, finu obradu i obradu čišćenja.

Mera kvaliteta obrade skulptorske površine u suštini treba da bude ostvareno tolerancijsko polje. Definisanjem dozvoljene gornje i donje granice odstupanja dizajner je precizirao geometrijski prostor u kome se može naci obrađena površina a da odgovara funkcionalnim ili estetskim

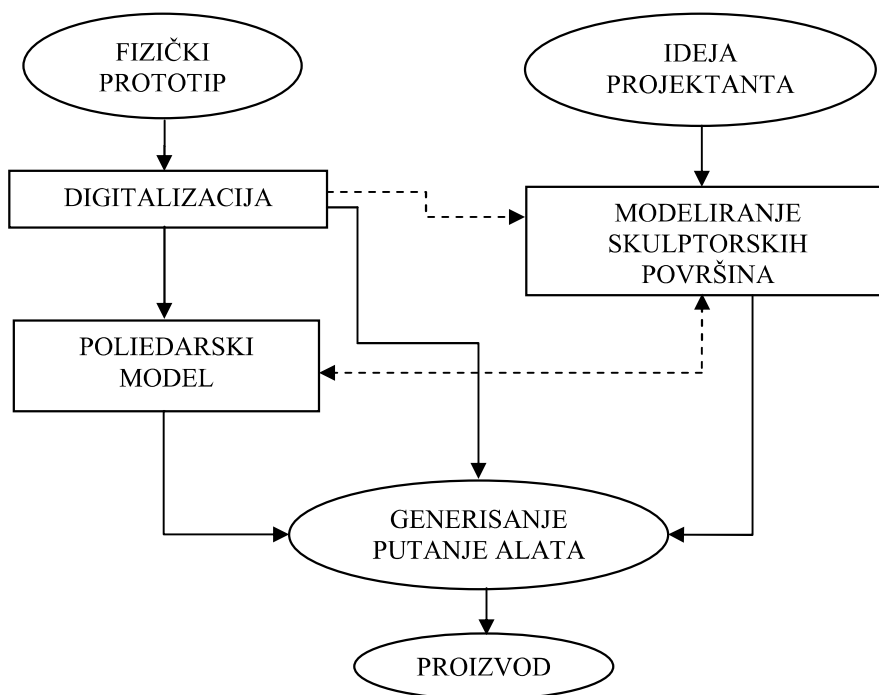
<sup>1</sup> Prof. dr Pavao Bojanić, Katedra za proizvodno mašinstvo, Mašinski fakultet Beograd, pbojanic@mas.bg.ac.rs

<sup>2</sup> Asist. Goran Mladenović, dipl.inž.maš., Katedra za proizvodno mašinstvo, Mašinski fakultet Beograd, gmladenovic@mas.bg.ac.rs

zahtevima. Ovo pak podrazumeva da maksimalna hrapavost ne treba da dostigne maksimalno dozvoljenu toleranciju kao i da površina bude bez nedozvoljenog kontakta sa alatom. Problem kolizije alata i skulptorske površine je vrlo kompleksan i zbog ograničenosti obima rada neće se ovom prilikom razmatrati.

## 2. MOGUĆI ULAZI ZA PROCES GENERISANJA PUTANJE ALATA

Izgradnja internog, kompjuterskog, modela radnog predmeta može, u principu, da se odvija kroz generativni proces koji je ugrađen u algoritam CAD sistema ili kroz metodologiju reverznog inženjerstva, sl. 1.



Slika 1. – Mogući ulazi za generisanje putanje alata

Poliedarski modeli su našli veliku primenu u CAD/CAM sistemima zbog svoje jednostavnosti u primeni u algoritmima za geometrijsku analizu i za razmenu podataka. Ovi modeli se kreiraju ili iz datog oblaka tačaka [1,2] ili iz parametarski definisanih površina [3]. Poliedarski modeli olakšavaju generisanje putanje alata jer svode problem na generisanje putanje alata na nekom površinskom segmentu. Za razliku od ovog načina, ponekad se ne može izbeći ni izrada neparametarske ili neimplicitne površine, npr. kada je objekat modeliran u nekom materijalu od strane umetnika a zatim digitalizovan kontaktnom ili bezkontaktnom metodom i preveden u CAD model.

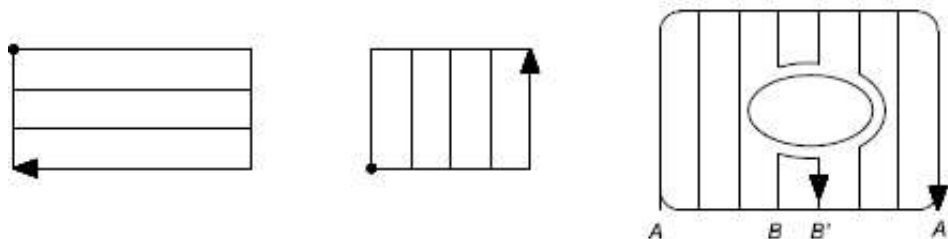
Tačnost u generisanju poliedarskog modela može značajno uticati na kvalitet rezultujuće putanje alata. Gustina mreže za semplovanje i triangulacija treba da se odredi prema željenoj tačnosti i vremenskoj efikasnosti. Utvrđivanje različitih geometrijskih karakteristika, kao što je vektor normale i radius krivine može biti dodatni izvor grešaka koje otežavaju iznalaženje putanje alata prema tehnološkim zahtevima obrađene površine. Zbog toga se razvijaju dva pristupa:

- izrada triangularne poliedarske površine generisane ili iz parametarskog opisa površine ili iz oblaka tačaka, i
- direktna izrada na osnovu oblaka tačaka u aplikacijama reverznog inženjerstva izbegavajući gubitak vremena i greške pri triangulaciji.

### 3. GENERISANJE PUTANJE ALATA

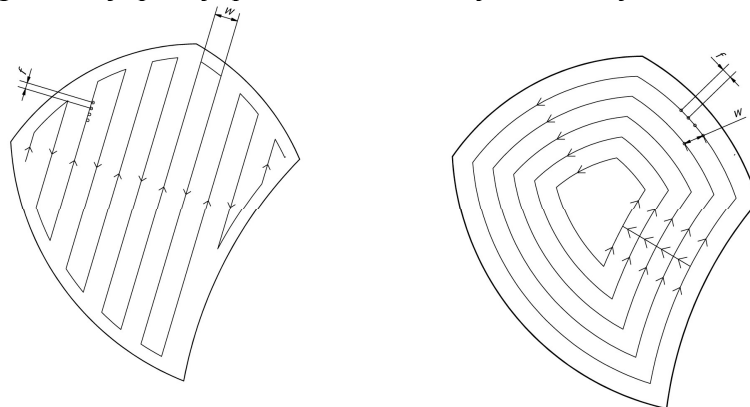
Problem generisanja putanje alata kod izrade skulptorskih površina podrazumeva vrlo kompleksnu analizu interakcija geometrije zadate površine, geometrije alata i definisanih ograničenja. Ako su funkcije cilja kvalitet obrađene površine i optimalno vreme obrade tada imamo u različitim fazama projektovanja obrade kontradiktorne zahteve. Tako npr. pri završnoj obradi potrebno je minimizirati vreme obrade, a sa druge strane hrapavost mora ostati ispod definisanog nivoa. Idealna putanja alata bi trebala da generise uniformnu distribuciju hrapavosti po celoj površini. Manja hrapavost ne znači istovremeno bolju putanju alata jer to možda podrazumeva duže vreme obrade. U suštini, generisanje putanje alata može se svesti na dve oblasti: topologiju putanje i parametre putanje. Topologija je određena geometrijskim skupom tačaka po kome se alat kreće a parametri putanje se odnose na definisanje koraka u longitudinalnom i transferzalnom pravcu kretanja alata.

Putanja alata je određena skupom tačaka kontakta alata i obrađene površine. Topologija pojedinačnih putanja i metod njihovog sukcesivnog povezivanja ima direktan uticaj na vreme obrade. Odgovarajuća topologija može rezultirati u minimalnoj dužini putanje alata ili minimalnom broju promena smera kretanja, sl 2.



Slika 2. – Izbor putanje alata i segmentacija

Za glodanje skulptorskih oblasti koriste se uglavnom dva pristupa: generisanje putanje alata u unapred definisanom pravcu i generisanje putanja paralelnih konturi koja se obrađuje, slika 3.



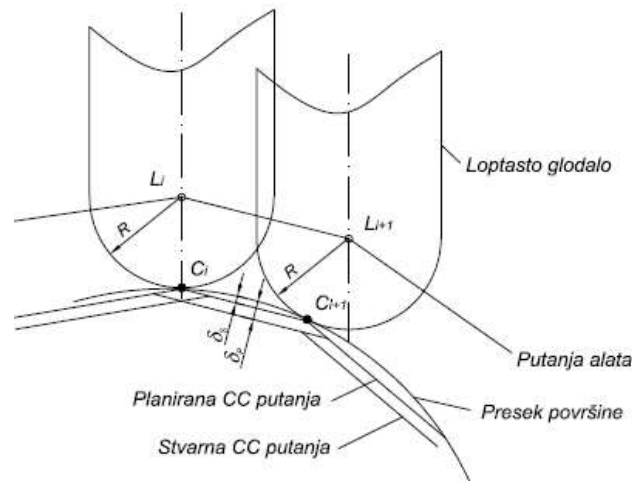
Slika 3. – Različite topologije putanje alata

U prvom pristupu, segmenti putanje alata su paralelni datom pravcu koji može biti upravan na konturnu ivicu ili paralelan sa osom koordinatnog sistema. Izbor referentne linije direktno utiče na dužinu putanje alata. Izbor optimalnog pravca će rezultirati u dužim segmentima putanje alata i minimalnim segmentima kretanja alata bez rezanja. U komercijalnim CAM sistemima koristi se specifična zig-zag putanja kretanja alata pri gruboj obradi, koja spada u ovu vrstu putanja.

Putanje paralelne konturi skulptorske oblasti su definisane samom konturom. Svaki segment je ofset granice konture. Paralelne ofsetne putanje mogu međusobno da budu spiralno spojene ili da predstavljaju nezavisne putanje. Uporedna istraživanja [4,5] vremena obrade kod oba koncepta generisanja putanje alata imajući u vidu ubrzanja i usporenja kod pomoćnog kretanja. Istraživanja su vršena korišćenjem linearnog modela promene ubrzanja i usporenja kod pomoćnog kretanja. Opšti zaključci su da izbor optimalne topologije putanje zavisi od složenosti konture i uslova rezanja a da ipak putanje paralelne konturi daju manje vreme obrade pod uslovima relativno konstantnih parametara rezanja. Bazirano na rezultatima ovih istraživanja razvijen je pristup [6] obrade sloja po sloja primenjiv naročito kod izrade kalupskih šupljina.

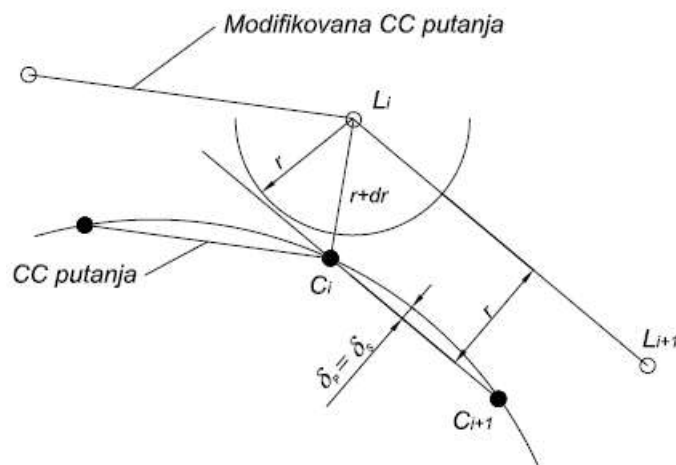
Pored izbora koncepta putanje, postoji i problem određivanja koraka pri longitudinalnom i transferzalnom kretanju alata. Oni direktno utiču na tačnost obrade skulptorske površine. Rastojanje između dve susedne

tačke kontakta alata i površine duž longitudinalnog kretanja određuje korak pri pomoćnom kretanju. Ako su dve susedne tačke kontakta alata  $C_i$  i  $C_{i+1}$ , na osnovu normala na površinu u tim tačkama lako možemo izračunati odgovarajuće položaje centra alata  $L_i$  i  $L_{i+1}$ , sl.4.



Slika 4. – Dodatna greška pri ofsetovanju alata

Pri tome nastaje greska  $\delta_s$ . Pri pravolinijskom kretanju alata od tačke  $L_i$  do  $L_{i+1}$ , alat će zadirati dublje u materijal pa ćemo imati još jednu komponentu greške  $\delta_p$ . Ova greška je određena tangentom na vrh alata koja je paralelna pravoj  $L_i, L_{i+1}$ . Da bi se izbegla pomenuta greška potrebno je modifikovati položaj alata za vrednost  $dr$ , tako da se tangenta prava na vrh alata poklopi sa pravom određenom sa tačkama  $C_i$  i  $C_{i+1}$ , sl.5.



Slika 5. – Modifikovana putanja alata

Uglavnom se koriste linijski segmenti za aproksimaciju putanje alata u pravcu kretanja, mada su razmatrani i koncepti kružne interpolacije [7] i plonomske interpolacije [8]. Broj tačaka kontakta alata i površine direktno utiče na veličinu koraka pomoćnog kretanja u pravcu kretanja alata i u pravcu bočnog kretanja a time i na hrapavost obrađene površine i tačnost oblika. Sa druge strane, veliki broj pomenutih tačaka povećava vreme obrade, intenzitet korišćenja procesora i memorije CNC kontrolera.

Imajući u vidu kao ciljne funkcije pri generisanju putanje alata koje se odnose na efikasnost obrade, kvalitet obrađene površine i odsustvo podsecanja (kolizije) zahtevi koje moraju biti ugrađeni u algoritam su:

- Minimizirati broj segmenata za rezanje „vazduha”
- Minimizirati broj segmenata putanje alata,
- Maksimirati duzine segmenata putanje alata,
- Kretanje duž graničnih krivih,
- Tehnološki zahtevi,
- Robusnost

Tradicionalne metode za generisanje putanje alata su: izoparametarske, izoravanske i izohrapavosne. Skulptorske površine se u geometrijskom modeliranju obično predstavljaju kao B-splaj površine. Njihov oblik se kontroliše preko kontrolnih tačaka a opisane su u funkciju dva parametra u i v. Osobina ovih površina je da zadržavaju kontinuitet drugog reda  $C^2$ . Zadajući vrednost jednog parametra možemo odrediti krivu u funkciju drugog parametra čime se može generisati mreža površine. Te iste krive se mogu iskoristiti za generisanje putanje alata da se po njima vodi alat pri izradi površina. Takvo generisane putanje alata zovemo izo-parametarske.

Medjutim izoparametarski metod nije bas najpovoljniji za generisanje putanje alata u Dekartovim koordinatama. Zbog toga se češće koriste ravni kretanja paralelne ravnima koordinatog sistema. Tako definisane putanje alata su izo-ravanske. Putanja alata se nalazi u vodećoj ravni, i u slučaju 3-osne obrade i loptastog vrha glodala, je određena položajem centra lopte. Tačka kontakta glodala i površine koja se obrađuje je promenljiva i zavisi od normale na površinu u tački dodira (CC).

Da bi se primenio ovaj metod, potrebno je generisati tačke iz parametarskog domena u domen dekartovih koordinata. Izračunavajući normalu u svakoj tački i pomerajući centar glodala u pravcu normale za radijus, dobija se novi skup tačaka koji predstavlja položaj alata. Da bi se obradila cela površina alat se kreće po nizu putanja koje su na nekom međusobnom rastojanju. Rastojanje između dva prolaza, L može se odrediti na osnovu više kriterijuma. Jedan od kriterijuma može da bude maksimalno dozvoljena hrapavost obrađene površine koja je određena visinom neskinutog sloja materijala između dva prolaza alata. Rastojanje između dve putanje alata može se izraziti u funkciji maksimalne hrapavosti h, radijusa loptastog glodala R i radiusa krivine  $\rho$  [9].

$$L = \frac{|\rho| \left\{ 4R^2 (\rho + h)^2 - \left[ (\rho + R)^2 - (\rho + h)^2 - R^2 \right] \right\}^{1/2}}{(\rho + R)(\rho + h)}$$

Odstupanje putanje alata od definisane površine odnosno krive preseka površine i ravni kretanja alata definiše grešku u longitudinalnom pravcu kretanja alata. Maksimalno odstupanje mora biti manje od dozvoljene tolerancije t. Dužina pravolinijskog segmenta putanje može se odrediti iz izraza [16]

$$L_{cl} = 2 [ 2t (R+t) - t^2 ]^{1/2}$$

Treći koncept se odnosi na princip izo-hrapavosti koji će obezbediti jednaku visinu neravnina između dve uzastopne, transferalne, putanje alata. Da bi se odredila putanja alata koja ce respektovati uslov jednake hrapavosti naredna putanja alata se mora određivati na osnovu poznate prethodne putanje i uslova da kriva koja predstavlja vrhove neravnina između dva prolaza alata bude zajednička za oba prolaza. Ovaj princip podrazumeva da nam je poznata površina izo-hrapavosti, rubna kriva kao presek obvojnje površine alata i površine izo-hrapavosti [10]. Površina izo-hrapavosti se može odrediti iz jednačine:

$$\mathbf{P}_h(u, v) = \mathbf{P}(u, v) + \mathbf{n} h \quad - \text{ gde je } \mathbf{n} \text{ normala u datoj tački površine radnog predmeta a } h \text{ visina neravnine kojom definišemo željenu hrapavost.}$$

#### 4. ZAKLJUČAK

Kod obrade skulptorskih površina veoma je važno kako se generiše putanja alata jer to direktno utiče na kvalitet obrađene površine i na vreme obrade. Aproksimacija skulptorske površine, opisana u parametarskom prostoru, zahteva konverziju u diskretizovan model koji nam pruža mogućnost jednostavnog generisanja putanje alata ali zahteva intenzivne matematičke operacije što nameće zahteve za performansama računara odnosno upravljačke jedinice ukoliko se određivanje putanje alata određuje u realnom vremenu. Zavisno od metode obrade mora se uspostaviti analitička zavisnost između zahtevanih parametara obrađene površine, hrapavost, tolerancija, i putanje referentne tačke alata. Ovako definisane putanje nemaju redundantnost i višekratnu obradu istog dela površine što podrazumeva da se ovako dobija kraća putanja alata odnosno obrada radnog predmeta se vrši u kraćem vremenu

## 5. LITERATURA

- [1] Sun W, Bradley C, Zhang YF, Loh HT. Cloud data modelling employing a unified, non-redundant triangular mesh. *Computer-Aided Design* 2001; 33(2):183\_93.
- [2] Li Y, Gu P. Free-form surface inspection techniques state of the art review. *Computer-Aided Design* 2004;36(13):1395\_417.
- [3] Li CL. A geometric approach to boundary-conformed toolpath generation. *Computer-Aided Design* 2007;39(11):941\_52.
- [4] Kim BH, Choi BK: Machining efficiency comparison direction-parallel tool path with contour-parallel tool path. *Computer Aided Design*, 1994, 26(3) 89-95
- [5] El-Midany TT, Elkeran A, Tawfik H.: Toolpath pattern comparison: contour-parallel with direction-parallel. *Geometric modeling and imaging*. 2006, p77-82.
- [6] Li H., Dong Z., Vickers GW.: Optimal toolpath pattern identification for single island, sculptured part rough machining using fuzzy pattern analysis. *Computer Aided Design*, 1994, 26(11) 787 -95
- [7] Pi J., Jensen G: Grind-free tool path generation for five-axis surface machining. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 1998, 11(4) 337-50
- [8] Langeron Jm, Duc E., Lartigue C., Bourdet P.: A new format for 5-axis tool path computation, using B-spline curves. *Computer Aided Design*, 2004, 36(12) 1219-29
- [9] P. Bojanić: Generisanje putanje alata pri obradi skulptorskih površina na 3-osnim CNC mašinama loptastim glodalom. *Zbornik radova XXXIII Savetovanje proizvodnog mašinstva Srbije*, Beograd 2009.
- [10] P. Bojanić, G. Mladenović: Generisanje putanje alata po kriterijumu izohrapavosti pri obradi skulptorskih površina na 3-osnim CNC mašinama. *Zbornik radova 36. Jupiter konferencije*, Beograd, 2010.

### ANALYSIS OF THE PROBLEMS IN GENERATING THE TOOL PATH WHEN MACHINING SCULPTURAL SURFACES

#### *Summary*

When processing workpieces with sculptural surfaces on CNC machine tools, the tool path is a key element for the surface quality and efficiency of processing. The paper provides a general analysis of problems and solving in generating tool path processing sculptural surfaces. There are defined criteria for the optimization of tool path generation.

*Key words: tool path, sculptured surface, CNC machining*