



P. Bojanić¹, G. Mladenović²

GENERISANJE PUTANJE ALATA PO KRITERIJUMU IZO-HRAPAVOSTI PRI OBRADI SKULPTORSKIH POVRŠINA NA 3-OSNIM CNC MAŠINAMA

Rezime

Kod obrade radnih predmeta sa skulptorskim površinama na 3-osnim CNC mašinama alatkama, putanja alata je ključni element za kvalitet obrađene površine i za vreme obrade. U radu se daje postupak generisanja putanje alata pri obradi skulptorskih površina za glodalo sa loptastim završetkom za slučaj izo-hrapavosti. Generisanje putanje alata se vrši u funkciji zadate visine ruba koji ostaje između dve susedne putanje alata. Ti rubovi definišu hrapavost obrađene površine

Ključne reči: izo-hrapavost, skulptorska površina, CNC obrada

1. UVOD

Radni predmeti sa skulptorskim površinama se vrlo često pojavljuju u vazduhoplovnoj, automobilskoj i livačkoj industriji. Oni se najčešće obrađuju na 3-osnim CNC mašinama alatkama, koje si najzastupljenije u proizvodnim pogonima metaloprerađivačke industrije. Obrada glodanjem je najzastupljeniji metod obrade pomenutih radnih predmeta. Tačnost, kvalitet obrađene površine i efikasnost obrade zavise prvenstveno od projektovane putanje alata što predstavlja osnovni zadatak CNC obrade [1,2]

Problemi obrade skulptorskih površina postali su predmet mnogih istraživačkih centara još 80-tih godina a još uvek se ulažu istraživački naponi da se razviju novi pristupi i novi algoritmi u cilju povećanja tačnosti obrađene površine i povećanja produktivnosti obrade. Posebnu pažnju privlače postupci obrade sa glodalima sa sfernim završetkom na 3-osnim CNC mašinama [3,4]. Troosne CNC mašine alatke su najzastupljenije u proizvodnim pogonima sa NC opremom a njihovo programiranje ne predstavlja naročiti problem. Glodalo sa sfernim završetkom nije baš najbolji izbor jer su parametri obrade promenjivi a postoje slučajevi kada je brzina rezanja jednaka nuli što se odražava na proces rezanja i kvalitet obrađene površine. Sa druge strane, ovaj oblik glodala je vrlo jednostavan za određivanje putanje alata i kontrolu kolizije alata i površine radnog predmeta. U prethodnom periodu definisana su tri osnovna pristupa u obradi sfernih površina: izo-parametarski, izo-ravanski i izo-hrapavi [5,6]. Većina metoda se bazira na aproksimaciji skulptorskih površina sa poligonalnim površinama. Na tako formiranom skupu se definiše ili redefiniše putanja alata [7,8]

Uobičajeno je da se skulptorske površine predstavljaju u parametarskom obliku. Da bi se odredila putanja alata opis površine se mora konvertovati u diskretizovan model podataka. Putanja alata se izračunava tačka po tačka nad ovim modelom podataka. Kao rezultat se dobija poligonalna linija koja se sastoji od velikog broja pravolinijskih odsečaka. Putanja alata se zatim prevodi u NC program aproksimirajući glatku složenu površinu sa linijskim segmentima.

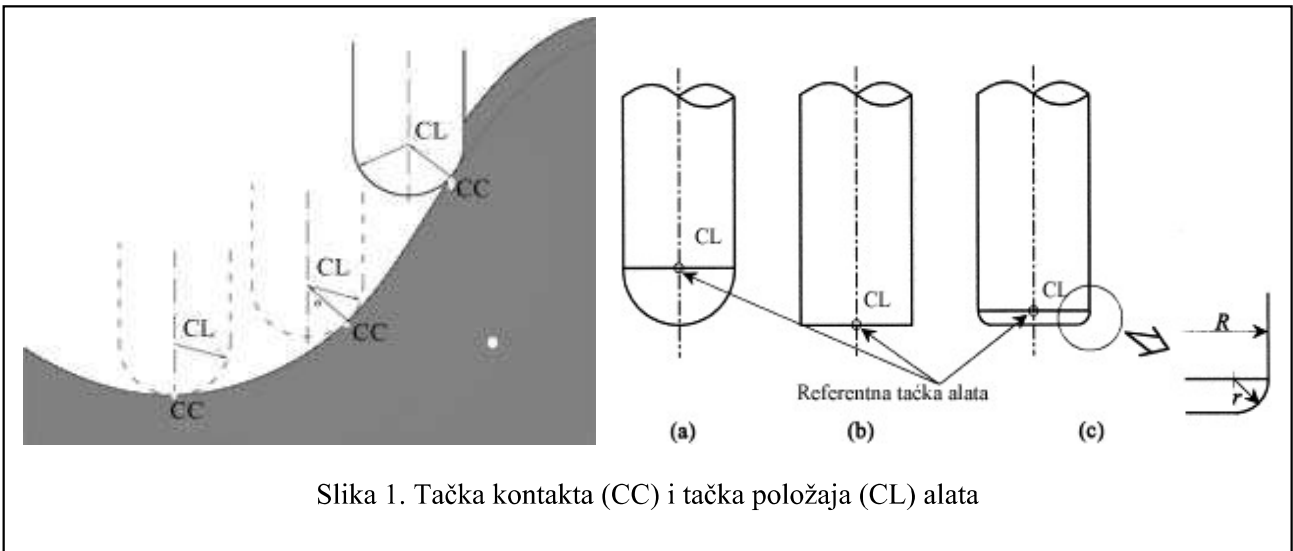
¹ Prof. dr Pavao Bojanić, Katedra za proizvodno mašinstvo, Mašinski fakultet Beograd, pbojanic@mas.bg.ac.rs

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

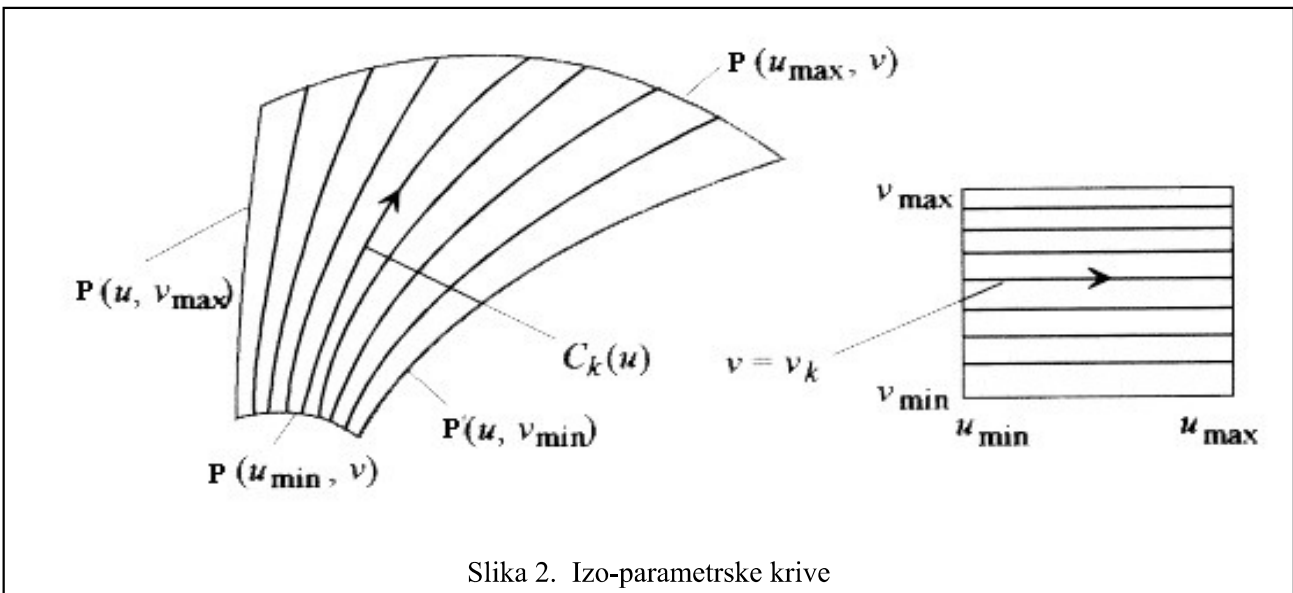
2. METODE GENERISANJA PUTANJE ALATA

Najjednostavniji metod definisanja putanje alata za obradu skulptorskih površina je da se putanja alata generiše u parametarskom prostoru i poznat je kao izo-parametrski. Medjutim, stvarna obrada se izvršava u koordinatnom sistemu mašine pa je vrlo teško odrediti interferenciju radnog predmeta i alata u parametarskom prostoru jer nije poznata uniformna funkcija preslikavanja iz jednog u drugi prostor. U svakoj tački kontakta alata i opisane površine (CC) izračunava se tačka položaja alata koristeći poznatu

geometriju alata, slika 1, i normalu na površinu u tački kontakta alata i površine radnog predmeta. Izo-parametranske putanje alata su često znatno gušće u jednom delu površine nego u drugom zbog pomenute



neuniformne transformacije između parametarskog i Euklidovog prostora, što ima za posledicu različitu distribuciju visina neravnina između susednih putanja alata na obrađenoj površini. Sa druge strane, neravnomerna raspodela putanje alata ima za posledicu neproduktivnu obradu jer se, u jednom delu površine, koja se obrađuje, sl.2 u delu površine $P(u_{\min}, v)$, putanje se nalaze neopravdano blisko dok u drugom



delu površine visina neravnina, koje ostaju između dva prolaza alata, se nalaze na granici dozvoljene hrapavosti, sl. 2, na delu $P(u_{\max}, v)$. U parametarskom domenu putanje se nalaze na jednakom rastojanju, slika 2 desno.

Drugi koncept generisanja putanje alata je tzv. Izo-ravanski kada se alat vodi u paralelnim ravnima Kartezijevog prostora. 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 promenjiva i zavisi od normale na površinu u tački dodira (CC). Ako je vektor položaja neke tačke r na površini $S(u,v)$, normala u toj tački je određena jednačinom [8]:

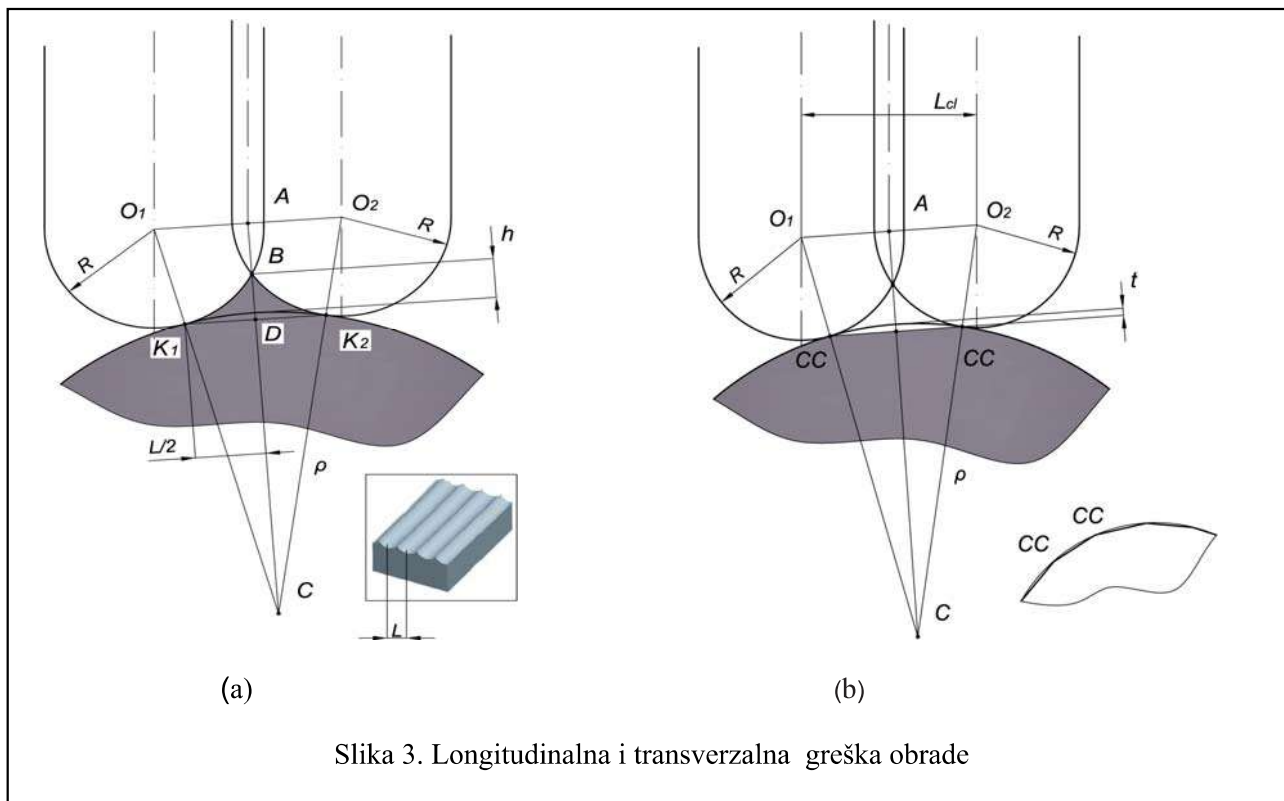
$$\mathbf{n} = \frac{(\mathbf{r}_u \times \mathbf{r}_v)}{|\mathbf{r}_u \times \mathbf{r}_v|}$$

gde je

$$\mathbf{r}_u = \lim_{du \rightarrow 0} \frac{S(u+du, v) - S(u, v)}{du}$$

$$\mathbf{r}_v = \lim_{dv \rightarrow 0} \frac{S(u, v+dv) - S(u, v)}{dv}$$

Rastojanje između dve putanje alata može se izraziti u funkciji maksimalne hrapavosti h , radijusa loptastog glodala R i radiusa krivine ρ , sl.3, [8]:



Slika 3. Longitudinalna i transverzalna greška obrade

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

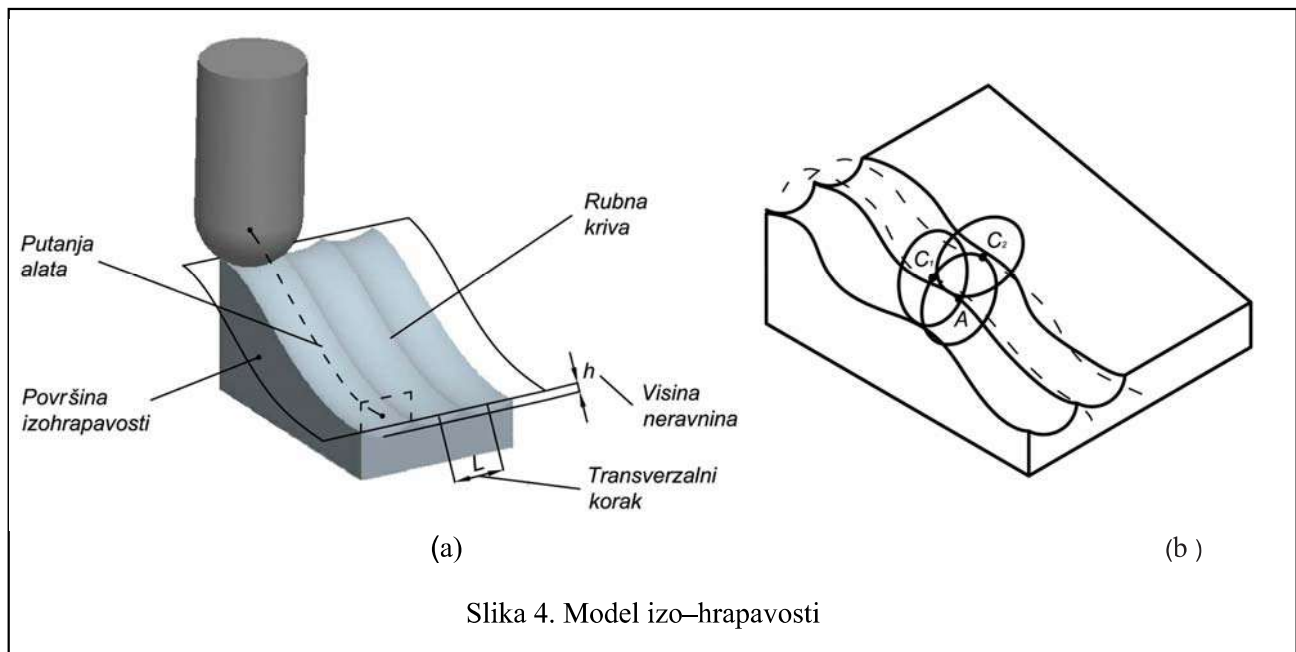
Treći koncept se odnosi na princip izo-hrapavosti koji će obezbediti jednaku visinu neravnina između dve uzastopne, trasferzalne putanje alata.

3. GENERISANJE PUTANJE ALATA PO PRINCIPU IZO-HRAPAVOSTI

Da bi se odredila putanja alata koja će 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 zajednička za oba prolaza. Ovaj princip podrazumeva da nam je poznata površina izohrapavosti, rubna kriva kao presek obvojne površine alata i površine izohrapavosti, sl.4 a.

Površina izohrapavosti se može odrediti iz jednačine:

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



Slika 4. Model izo-hrapavosti

Kod kretanja glodala sa loptastim vrhom referentna tačka CL opisuje ofsetnu krivu koja se nalazi na rastojanju poluprečnika alata R u pravcu normale na posmatranu tačku kontakta alata i opisane površine, CC:

$$\mathbf{P}_{CL} = \mathbf{P}_{cc} + \mathbf{n}R = \mathbf{P} [(u(t), v(t))] + R ((\mathbf{P}_u \times \mathbf{P}_v) / (|\mathbf{P}_u \times \mathbf{P}_v|)) = \begin{bmatrix} X_{CL}(t) \\ Y_{CL}(t) \\ Z_{CL}(t) \end{bmatrix}$$

Da bi se odredila putanja alata, a da bude zadovoljen zahtev da imamo jednaku visinu neravnina koja ostaje između dva susedna prolaza alata, potrebno je da na osnovu prethodno poznate putanje alata i zadate hrapavosti odredimo rubnu krivu koja je nastala presekom obvojne površine alata i površine izohrapavosti. U narednom koraku rubna kriva se koristi za određivanje naredne putanje alata. Radi uspostavljanja pomenute zavisnosti posmatrajmo dve susedne putanje alata, sl. 4 b. Ako u nekoj tački C_1 putanje alata u ravni koja je upravna na tangentu putanje posmatramo konturu obrađene površine, ona će zbog loptastog glodala izgledati kao krug. Ovaj krug će imati presečnu tačku A sa površinom izohrapavosti. Kroz istu ovu tačku prolazi i krug sa centrom u C_2 koji predstavlja konturu obrađene površine u drugom prolazu alata. Doduše, niti je tangenta u tački C_1 paralelna tangenti u tački A na rubnoj krivoj niti je C_2 u ravni upravnoj na tangentu rubne krive u tački A , što unosi izvesnu netačnost pristupa ovakvog određivanja putanje alata po kriterijumu izohrapavosti. Da bismo odredili obvojnu površinu duž putanje alata opišimo presek alata u lokalnom koordinatnom sistemu alata, slika 5a.

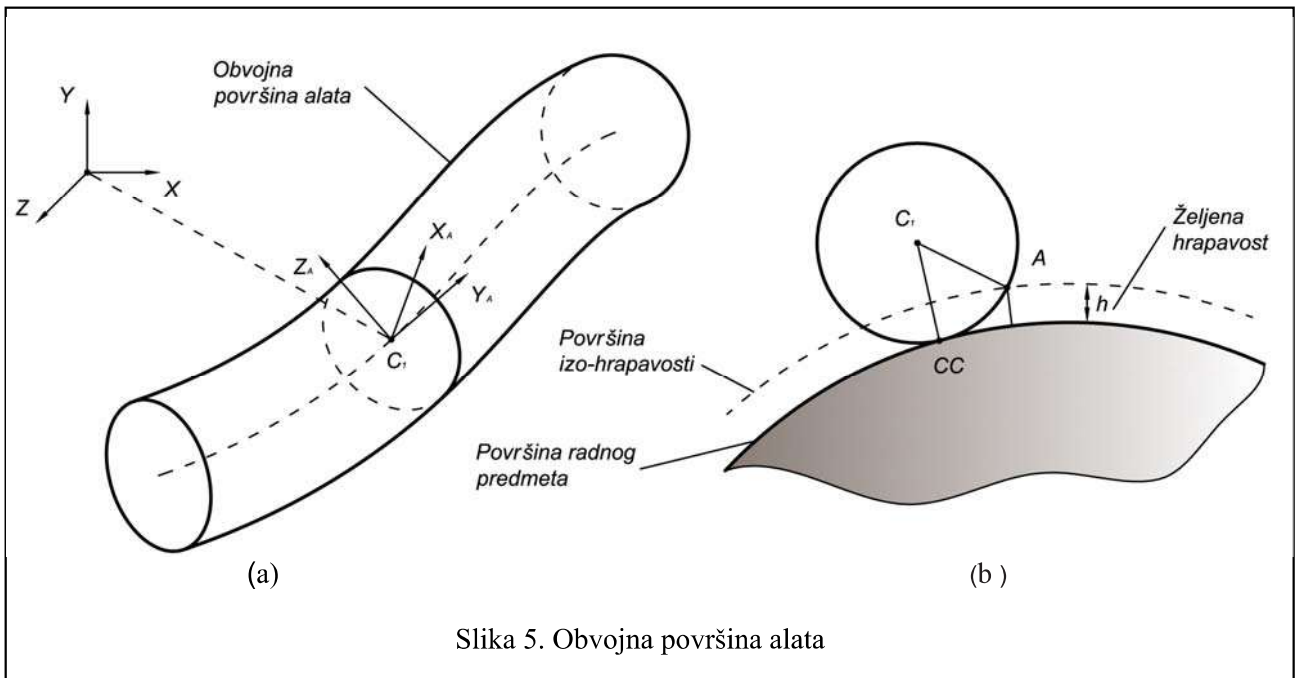
Osa Z_A se poklapa sa normalom površine u tački dodira a osa Y_A je tangenta na putanju alata.

Jednačina posmatranog preseka je :

$$\mathbf{K}_A(\theta) = \begin{bmatrix} R \cos \theta \\ 0 \\ R \sin \theta \end{bmatrix}$$

Transformišući gore datu jednačinu iz koordinatnog sistema alata u koordinatni sistem XYZ, parametrska jednačina obvojne površine alata \mathbf{P}_o će biti:

$$\mathbf{P}_o(t, \theta) = [T] \cdot \mathbf{K}(\theta) + \mathbf{C}_1$$



Slika 5. Obvojna površina alata

$$[T] = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} \end{bmatrix}, \text{ a } \mathbf{C}_1 = \begin{bmatrix} X_{CL}(t) \\ Y_{CL}(t) \\ Z_{CL}(t) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} t_{13} \\ t_{23} \\ t_{33} \end{bmatrix} = \mathbf{n} = \mathbf{k}_A, \quad \begin{bmatrix} t_{12} \\ t_{22} \\ t_{23} \end{bmatrix} = \frac{CL'}{|CL'(t)|} = \mathbf{j}_A, \text{ a } \begin{bmatrix} t_{11} \\ t_{12} \\ t_{13} \end{bmatrix} = \mathbf{j}_A \times \mathbf{k}_A = \mathbf{i}_A$$

U gore datim jednačinama \mathbf{i}_A , \mathbf{j}_A i \mathbf{k}_A su je jedinični vektori u lokalnom koordinatnom sistemu alata.

Znajući jednačinu obvojne površine alata duž jedne putanje i znajući jednačinu površine izo-hrapavosti rubna kriva se može odrediti iz jednačine:

$$\mathbf{P}_h - \mathbf{P}_o = 0$$

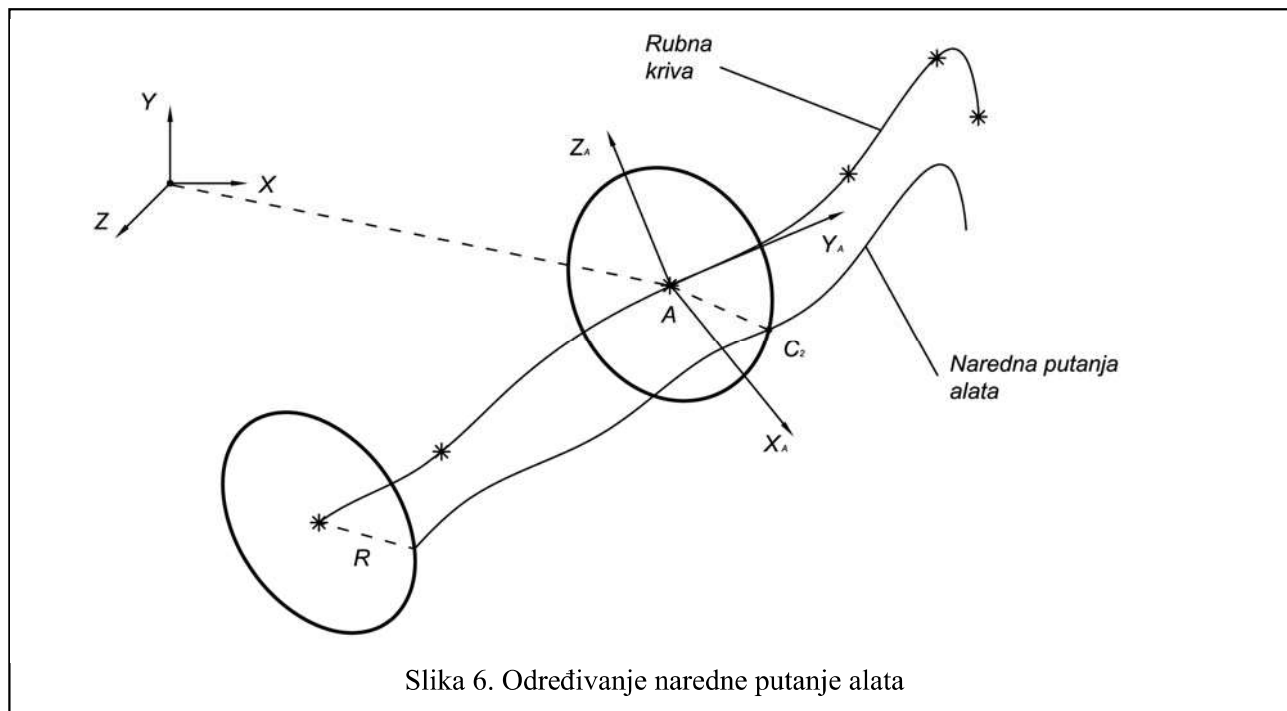
Za određenu tačku na putanji alata C_1 generišu se tačke po krugu u funkciji od udaljenosti od zadate površine, slika 5b.

Određivanjem tačaka na rubnoj krivoj odnosno određivanjem rubne krive, može se preći na drugu fazu u kojoj se određuje susedna putanja alata. Jedan od poznatih uslova je da je vektor od centra alata do tačke na

rubnoj krivoj upravan na tangentu na rubnoj krivoj u toj tački. Sa druge strane, vektor normale površine radnog predmeta je normalan na tangentnu ravan obvojne površine u posmatranoj tački. Samim tim što rubna kriva leži na obvojnoj površini alata to znači da je vektor normale na površinu upravan na svaku tangentu krive koja leži u toj ravni. Ovaj geometrijski uslov se može iskoristiti za određivanje referentne tačke na narednoj, sledećoj putanji alata koja će imati za posledicu jednaku hrapavost obrađene površine.

Procedura određivanja tačke na susednoj putanji alata mora da se odvija kroz sledeće korake, slika 6:

- Odrediti normalnu ravan na tangentu rubne krive u posmatranoj tački A ,
- Odredi krug u toj ravni poluporečnika alata R sa centrom u tački A (Centar kruga C_2 mora ležati na ovom krugu)
- Odrediti tačku preseka između kruga i površine referentne tačke alata



Slika 6. Određivanje naredne putanje alata

Pošto se referentna tačka alata mora naći, na površini koju formiraju putanje alata, sa jedne strane, i na krugu radijusa R u ravni upravnoj na tangentu rubne krive u datoj tački, sa druge strane, znači da se u preseku pomenute ravni i kruga nalazi centar alata odnosno referentna tačka alata pri sledećem prolazu. Na rubnu krivu se stavlja lokalni koordinatni sistem, normala na površinu koja prolazi kroz tačku na rubnoj krivoj je Z_A osa a tangenta na rubnu krivu u posmatranoj tački je Y_A osa. Procedura određivanja preseka kruga sa centrom na rubnoj krivoj i površine koja predstavlja površinu referentnih tačaka, odnosno centara alata je sličan postupku određivanja tačaka na rubnoj krivoj, samo sa tom razlikom što se ovde umesto visine vrhova neravnina h uzima površina koja je ofsetovana za poluprečnik alata R.

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. Polazeći od zahteva da se putanja alata odredi tako da na celoj obrađenoj površini bude ista hrapavost, data je analitička zavisnost između definisane hrapavosti 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 u odnosu na NC obradu sa izo-parametarskim i izo-ravanskim putanjama alata.

5. LITERATURA

- [1] Park S. C.: Sculptured surface machining using triangular mesh slicing. *Computer-Aided Design*, 36, 2004, 279-288.
- [2] Kim S.J., Yung M. Y.: A CL surface definition approach for constant scallop height tool path generation from triangular mesh. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28, 2006. 314-320.
- [3] Z. C. Chen, D. Song: A Practical Approach to Generating Accurate Iso-Cusped Tool Paths for Three-Ad`is CNC Milling of Sculptured Surface Parts. *Journal of Manufacturing Processes* Vol. 8/No. 1,2006, 30 – 38
- [4] T. Chen, Zhiliang, A tool path generation strategy for three-ad`is ball-end milling of free-form surfaces, *Journal of Manufacturing Processes*, 2008
- [5] Y. Rena, H. T. Yaub, Y.-S. Leea: Clean-up tool path generation by contraction tool method for machining complex` polyhedral models. *Computers in Industry* 54 (2004) 17–33
- [6] L. P. Zhang, J. Y. H. Fuh and A. Y. C. Nee: Tool path regeneration for mold design modification. *Computer Aided Design*, Volume 35, Issue 9, 2003
- [7] P Bojanic, R. Ivanović: Pristup izgradnji funkcionalnog deformabilnog geometrijskog modela ljudske glave. *Zbornik radova 32. Jupiter konferencije*, beograd, 2006.
- [8] Generisanje putanje alata pri obradi skulptorskih površina na 3-osnim CNC mašinama loptastim glodalom. XXXIII Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije, Beograd,2009.

A ISO-CUSPED TOOL PATH GENERATION FOR 3-AXES SCULPTURED SURFACE MACHINING

In three-axis computer numerically controlled (CNC) machining of sculptured surfaces parts, the tool path is crucial to surface quality and machining time. The paper gives the procedure of tool path generation for milling sculptured surfaces with the ball-end cutter in case of iso-scallop tool path. Generated tool path is function of quality of machined surfaces.. Generating paths tool is done in the function of the given amount of scallop height that remains between two adjacent tool paths. These scallop heights define the roughness of machined surface

Key words: *iso-scallop, sculptured surface, CNC machining*