



Slavković, N., Milutinović, D., Živanović, S. ¹⁾

METOD KOMPENZACIJE GREŠAKA IZAZVANIH SILAMA REZANJE PRI OBRADI ROBOTIMA ²⁾

Rezime

U ovom radu je prikazan deo rezultata istraživanja u oblasti razvoja rekonfigurabilnih obradnih sistema na bazi robota. U ovom radu je predstavljen razvijeni metod kompenzacije grešaka nastalih pod dejstvom sila rezanja pri obradi robotima usled statičke popustljivosti robota. Metod je verifikovan kroz nekoliko eksperimenata konturnih obrada, sa i bez kompenzacije grešaka, na test delovima od aluminijuma.

Ključne reči: višeosna obrada robotima, popustljivost robota, kompenzacija grešaka.

1. UVOD

U poslednjoj deceniji se intenzivno radi na istraživanju i razvoju robota za višeosnu obradu glodanjem prvenstveno složenijih delova, većih dimenzija od mekših materijala i niže klase tačnosti. Primena industrijskih robota, za ovu klasu zadataka, je danas uveliko prepoznata kao alternativa relativno skupim 5-osnim mašinama alatkama [1-4]. Intenzivna istraživanja, koja se danas sprovode u svetu, se odnose na rešavanje dve grupe problema koje predstavljaju glavne ograničavajuće faktore za širu primenu robota u obradi. To su kompleksnost programiranja [5,6] i nezadovoljavajuća krutost serijske strukture robota [1-4,7].

Istraživanja u oblasti razvoja rekonfigurabilnih obradnih sistema na bazi robota, na Katedri za proizvodno mašinstvo Mašinskog fakulteta u Beogradu, su obuhvatila dve grupe problema:

- razvoj sistema upravljanja i programiranja robota u G-kodu i
- povećanje tačnosti obrade kroz identifikaciju, modeliranje i kompenzaciju grešaka usled statičke popustljivosti robota.

Za razvoj rekonfigurabilnog obradnog sistema na bazi robota i metoda kompenzacije grešaka pri obradi robotima, u okviru ovih istraživanja, korišćen je raspoloživi 6-osni robot *LOLA50* vertikalne zglobove konfiguracije domaće proizvodnje nosivosti 50kg. Blokiranjem šeste ose emuliran je 5-osni specijalizovani robot za obradu koji je dalje posmatran kao 5-osna vertikalna glodalica konfiguracije (X, Y, Z, A, B). Robot je opremljen motornim vretenom sa maksimalnim brojem obrtaja od 18000 min⁻¹ [8,9].

Kako se zbog popustljivosti robota pri obradi velikim brzinama javljaju statičke greške i greške izazvane oscilacijama niskih i visokih frekvenci [10], to je njihova identifikacija i kompenzacija od odlučujuće važnosti za uspešnu primenu robota u obradi. Polazeći od činjenice da je pri obradi velikim brzinama statička sila, odnosno srednja vrednost otpora rezanja prema [11,12], u pravcu normale na obrađenu površinu pri glodanju višestruko veća od amplitude dinamičke komponente otpora rezanja, to se njome izazvani pomeraji, odnosno greške, direktno odražavaju na tačnost obrade.

U užem smislu, istraživanja u okviru razvoja metoda kompenzacije grešaka izazvanih silama rezanja pri obradi robotima su obuhvatala [13-16]:

- modeliranje popustljivosti robota u prostoru spoljašnjih koordinata (Dekartovom prostoru) na bazi rezultujućih popustljivosti zglobova sa mogućnošću analize njihovih pojedinačnih uticaja na popustljivost vrha alata u radnom prostoru,
- eksperimentalno analitičku identifikaciju rezultujuće popustljivosti zglobova kao neophodnog preduslova za modeliranje popustljivosti robota i

¹⁾ Doc. dr Nikola Slavković, (nslavkovic@mas.bg.ac.rs), prof. dr Dragan Milutinović, (dmilutinovic@mas.bg.ac.rs), prof. dr Saša Živanović, (szivanovic@mas.bg.ac.rs), Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet.

²⁾ U ovom radu se saopštavaju rezultati istraživanja koji su realizovani u okviru projekta TR35022 „Razvoj nove generacije domaćih obradnih sistema“, koji finansijski podržava Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Vlade Republike Srbije.

- razvoj metoda kompenzacije grešaka položaja vrha alata usled statičke popustljivosti robota pri obradi.

2. MODELIRANJE POPUSTLJIVOSTI ROBOTA U PROSTORU SPOLJAŠNJIH KOORDINATA

Ukupna krutost robota zavisi od krutosti segmenata, krutosti prenosnika, elemenata konstrukcije zgloba, aktuatora i upravljanja. S obzirom da je krutost segmenata današnjih industrijskih robota dovoljno velika, to se za glavne izvore popustljivosti smatraju prenosnici, elementi konstrukcije zgloba (vratila i ležajevi) i aktuatori sa svojim servo upravljanjem. Njihov zbirni uticaj se naziva krutošću zgloba koja se može modelirati kao krutost opruge k . Zavisno od toga da li je zglob obrtni ili translatorni krutost k može biti torziona (ugaona) $[Nm/rad]$ ili linearna $[N/m]$. Za dalja razmatranja se uvodi i pojam popustljivosti zgloba, $c = 1/k$, koja predstavlja recipročnu vrednost krutosti zgloba. S obzirom da na statičku popustljivost robota najveći uticaj imaju rezultujuće popustljivosti zglobova, razvijen je model statičke popustljivosti robota primenom principa virtuelnog rada i Jakobijan matrice [13,14] dat jednačinom

$$C_X(\theta) = J(\theta) \cdot C_\theta \cdot J^T(\theta) \quad (1)$$

gde $C_X(\theta)$ predstavlja matricu popustljivosti vrha robota u spoljašnjim (Dekartovim) koordinatama, $J(\theta)$ Jakobijan matricu robota i C_θ matricu statičke popustljivosti zglobova robota. Dijagonalni članovi matrice $C_X(\theta)$ predstavljaju direktne, dok nedijagonalni članovi ove matrice predstavljaju indirektnu popustljivost vrha robota. S obzirom da je C_θ dijagonalna matrica popustljivosti zglobova, matrica statičke popustljivosti robota u Dekartovim koordinatama $C_X(\theta)$, jednačina (1), se može posmatrati kao suma matrica popustljivosti koje potiču od svakog pojedinačnog zgloba, odnosno

$$C_X(\theta) = C_{X1}(C_{\theta1}) + \dots + C_{Xn}(C_{\theta n}) = \sum_{i=1}^n C_{Xi}(C_{\theta i}), n = 1, 2, \dots, 5 \quad (2)$$

gde $C_{Xi}(C_{\theta i})$ predstavlja matricni sabirak matrice statičke popustljivosti robota, $C_X(\theta)$, koji potiče od popustljivosti i -tog zgloba, $C_{\theta i}$. Jednačina (2) daje uvid u uticaj statičke popustljivosti svakog pojedinačnog zgloba na statičku popustljivost robota u Dekartovom prostoru. Ovaj pristup može biti koristan za proizvođače robota u fazi projektovanja odnosno ispitivanja prototipskih verzija robota kako bi se postigla željena krutost odnosno popustljivost zglobova robota. Takođe, ovaj pristup omogućava i analitičko eksperimentalnu identifikaciju popustljivosti zglobova.

3. EKSPERIMENTALNO ANALITIČKA IDENTIFIKACIJA REZULTUJUĆE POPUSTLJIVOSTI ZGLOBOVA

Eksperimentalno analitički pristup identifikacije rezultujuće popustljivosti zglobova, prema [15,16], obuhvata :

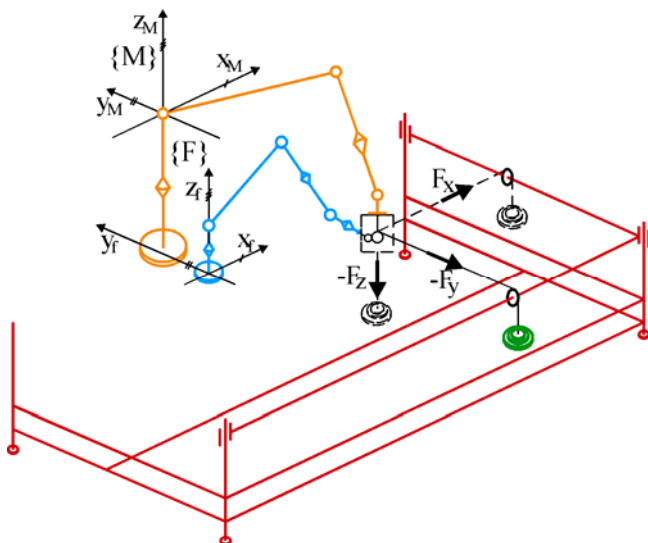
1. merenje pomeraja vrha robota $\delta \mathbf{x} = [\delta_x \quad \delta_y \quad \delta_z]^T$ izazvanih statičkom silom $\mathbf{F} = [F_x \quad F_y \quad F_z]^T$ u sva tri ortogonalna pravca,
2. izračunavanje direktnih i indirektnih popustljivosti robota u Dekartovom prostoru preko izmerenih pomeraja $\delta \mathbf{x}$ prema jednačini

$$\begin{array}{lll} C_{xx} = \delta x(F_x)/F_x & C_{xy} = \delta x(F_y)/F_y & C_{xz} = \delta x(F_z)/F_z \\ C_{yx} = \delta y(F_x)/F_x & C_{yy} = \delta y(F_y)/F_y & C_{yz} = \delta y(F_z)/F_z \\ C_{zx} = \delta z(F_x)/F_x & C_{zy} = \delta z(F_y)/F_y & C_{zz} = \delta z(F_z)/F_z \end{array} \quad (3)$$
3. formiranje sistema jednačina pomoću izračunatih direktnih i indirektnih popustljivosti iz prethodnog koraka i odgovarajućih elemenata matrice popustljivosti $C_X(\theta)$ iz jednačine (2) u kojima figurišu tražene popustljivosti zglobova, $C_{\theta i}$, $i = 1, 2, \dots, 5$,
4. identifikaciju popustljivosti zglobova $C_{\theta i}$, $i = 1, 2, \dots, 5$, rešavanjem formiranog sistema jednačina i
5. verifikaciju identifikovanih popustljivosti zglobova robota.

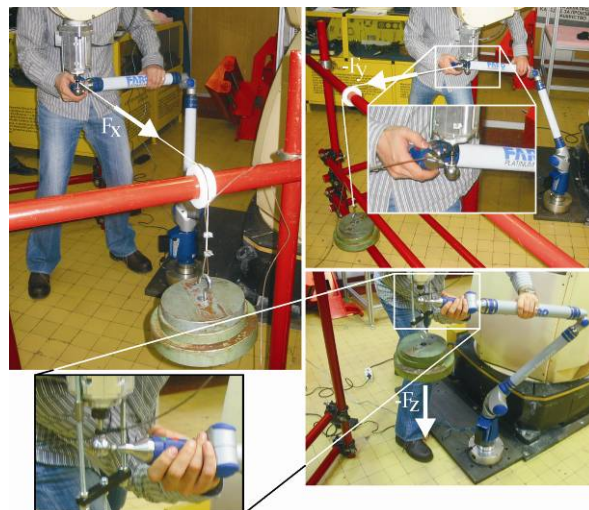
3.1 Merenje pomeraja vrha robota

Pomeraji vrha robota su mereni u šest ravni od ravni $z_M = -400mm$ do ravni $z_M = 100mm$. U svakoj

ravni je određeno 15 mernih tačaka. Ovo znači da je merenje vršeno u 90 tačaka u usvojenom radnom prostoru. Pri merenju pomeraja u svih 90 tačaka alat je bio upravan na ravan $x_M y_M$, odnosno $A = 0^\circ$ i $B = 0^\circ$. Zamisao izvođenja eksperimenta merenja pomeraja vrha robota je šematski pokazana na slici 1. Primeri merenja pomeraja vrha robota u sva tri Dekartova pravca izazvanih statičkom silom su pokazani na slici 2.



Slika 1. Šematski prikaz eksperimenta merenja pomeraja vrha robota



Slika 2. Merenje pomeraja vrha robota u sva tri Dekartova pravca

3.2 Izračunavanje direktnih i indirektnih popustljivosti robota u Dekartovom prostoru i formiranje sistema jednačina

Na osnovu izmerenih pomeraja i jednačine (3) su izračunate direktne i indirektne popustljivosti vrha robota u svih 90 tačaka raspoređenih u usvojenom delu radnog prostora, a potom je formiran sistem jednačina [15,16]. Na osnovu ovako eksperimentalno analitički određenih direktnih i indirektnih popustljivosti robota se, razvijanjem jednačina (2), formira sistem od 9 jednačina sa pet nepoznatih C_{θ_i} , $i = 1, 2, \dots, 5$ za svaku tačku merenja u radnom prostoru. Kompletan formirani sistem se sastoji od 810 jednačina iz kojih se identifikuju popustljivosti zglobova C_{θ_i} , $i = 1, 2, \dots, 5$. Ovako izveden sistem jednačina je preodređen. S obzirom da sistem jednačina pokriva celokupan usvojeni radni prostor, identifikacija popustljivosti zglobova na ovaj način omogućava adekvatno određivanje popustljivosti zglobova u Dekartovom prostoru.

3.3 Identifikacija popustljivosti zglobova

Iz ovako izvedenog sistema jednačina popustljivosti zglobova robota su identifikovane koristeći Matlab funkciju *lsqcurvefit*. Funkcija *lsqcurvefit* rešava problem nelinearnog fitovanja krivih (fitovanja podataka) metodom najmanjih kvadrata [13,15]. Izračunate popustljivosti zglobova su prikazane u tabeli 1.

Tabela 1. Identifikovane vrednosti popustljivosti zglobova robota

Zglob i	1	2	3	4	5
Popustljivost $C_{\theta_i} [\text{rad/Nm}] \cdot 10^{-7}$	9.03	11.17	14.74	27.65	97.58

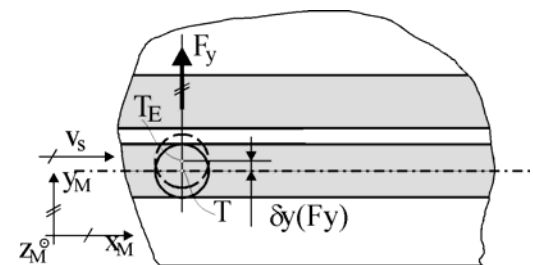
3.4 Verifikacija identifikovanih popustljivosti zglobova robota

Za verifikaciju identifikovanih popustljivosti zglobova, odnosno kompletno postavljenog modela popustljivosti robota, urađeni su eksperimenti izrade žljeba u aluminijumu [16]. Cilj eksperimenata je bio da se pri izradi žljeba izmeri statička sila koja deluje na alat i na osnovu izmerene sile i identifikovanih popustljivosti zglobova izračuna pomeraj vrha robota, odnosno alata, koji bi se kasnije uporedio sa izmerenom greškom izrade na žljebu. Kompletna instalacija za merenje sile i akviziciju podataka pokazana

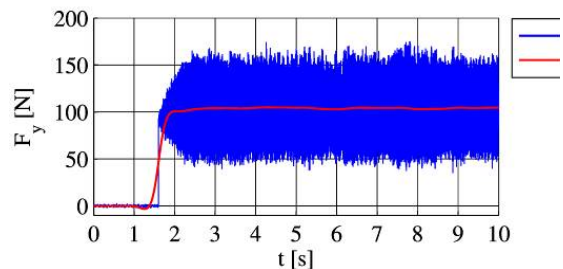
je na slici 3. Jedan od eksperimenata je bio takav da je programirana linearna putanja alata bila u ravni $z_M = 0mm$ dok se alat kretao u pozitivnom x_M pravcu pri konstantnoj y_M koordinati ($y_M = -1300mm$). Pri izvođenju eksperimenta merena je sila u pravcu upravnom na pravac kretanja, odnosno sila F_y , slika 4. Na slici 5 je prikazana izmerena sila u y_M pravcu, odnosno pravcu normalnom na pravac pomoćnog kretanja alata. Pri merenju je signal filtriran sa frekvencijom od $f_c = 50Hz$. Kao što se može videti sa slike 5 srednja vrednost merene sile, kao statičke sile, je oko $F_{ysr} = 100N$. Nakon merenja sile rezanja u pravcu upravnom na pravac kretanja, kao primer, je izračunat pomeraj vrha robota u tački $x_M = 0mm$, $y_M = -1300mm$ i $z_M = 0mm$, a na osnovu identifikovanih popustljivosti zglobova datih u tabeli 1. Izračunata vrednost ovog pomeraja je $0.257mm$. Žljeb dobijen obradom je pokazan na slici 6 sa koje se može videti da su greške obrade normalne na pravac pomoćnog kretanja duž putanje alata približno oko $0.3mm$. Ove greške su određene pomoću mikroskopske kamere *DigiMicro 2.0 Scale* rezolucije $2Mpix$ i uvećanja do 200 puta. Na osnovu ovog jednostavnog eksperimenta se može zaključiti da su izračunati pomeraji na osnovu izmerene sile rezanja i identifikovanih popustljivosti robota približno jednaki izmerenim greškama obrade na radnom predmetu.



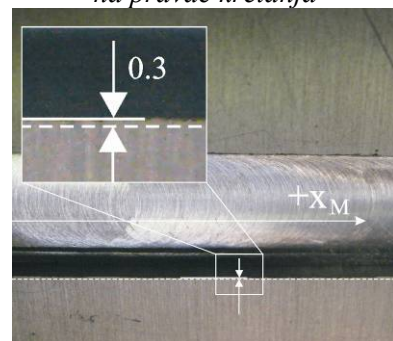
Slika 3. Eksperiment izrade žljeba glodanjem



Slika 4. Greška obrade u pravcu normalnom na pravac kretanja



Slika 5. Izmerena sila u pravcu normalnom na pravac kretanja

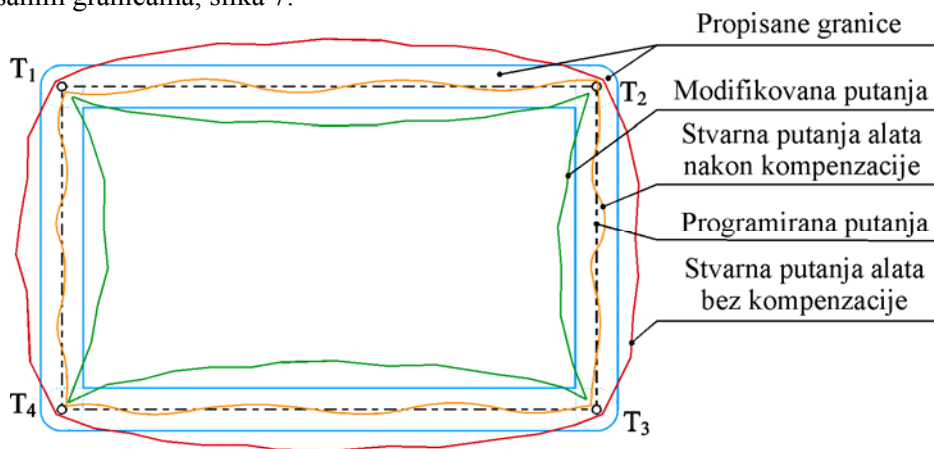


Slika 6. Izmerena greška obrade u pravcu normalnom na pravac pomoćnog kretanja pri izradi žljeba

4. METOD KOMPENZACIJE GREŠAKA POLOŽAJA VRHA ALATA NASTALIH PRI OBRADI ROBOTIMA

Polazeći od postavljenog pristupa kinematičkog modeliranja robota *LOLA50* i na osnovu njega razvijenog sistema upravljanja i programiranja u *G*-kodu, razmatrani su problemi modeliranja, analize i identifikacije statičke popustljivosti robota. Za ovako razvijen metod analize i identifikacije statičke popustljivosti robota kao i mogućnosti da se robot za obradu programira u *G*-kodu u okviru ovih istraživanja razvijen je metod kompenzacije grešaka izazvanih silama rezanja [15,16]. Razvijen metod je baziran na

mogućnosti izračunavanja sila rezanja, postojećim modelima razvijenim u literaturi [17,18], na osnovu kojih se izračunavaju statički pomeraji vrha alata koji izazivaju greške obrade. Kompenzacija ovih grešaka se vrši modifikacijom programirane putanje odnosno korekcijom G -koda. Korekcija G -koda se vrši primenom razvijenog algoritma za modifikaciju programiranog segmenta putanje uvođenjem pravila „polovljenja segmenta”. Ovo pravilo je izvedeno analizom mogućnosti modifikacije programiranog linearnog segmenta koristeći analogiju sa poznatim algoritmom koji se koristi kod nekih 5-osnih mašina alatki zbog korekcije grešaka koje se javljaju pri linearnoj interpolaciji osa orijentacije u unutrašnjim koordinatama. Koncept razvijenog metoda za *off-line* kompenzaciju grešaka izazvanih silama rezanja je pokazan na slici 7. Neka je programirana putanja alata za obradu pravougaonika opisana tačkama T_1 do T_4 u G -kodu. Unošenjem ovako napisanog programa u upravljački sistem robota vrh alat bi se, pod dejstvom sila rezanja, umesto da se kreće po programiranoj putanji kretao po stvarnoj putanji alata bez kompenzacije. Zamisao metoda kompenzacije grešaka je da se na osnovu programirane putanje alata i statičkih pomeraja vrha alata generiše modifikovana putanja odnosno korigovani program. Unošenjem ovako korigovanog programa u upravljački sistem robota vrh alata bi se, pod dejstvom vektora sila rezanja, umesto da se kreće po modifikovanoj putanji ustvari kretao po stvarnoj putanji alata nakon kompenzacije, odnosno dovoljno blizu programirane putanje alata tj. u unapred propisanim granicama, slika 7.



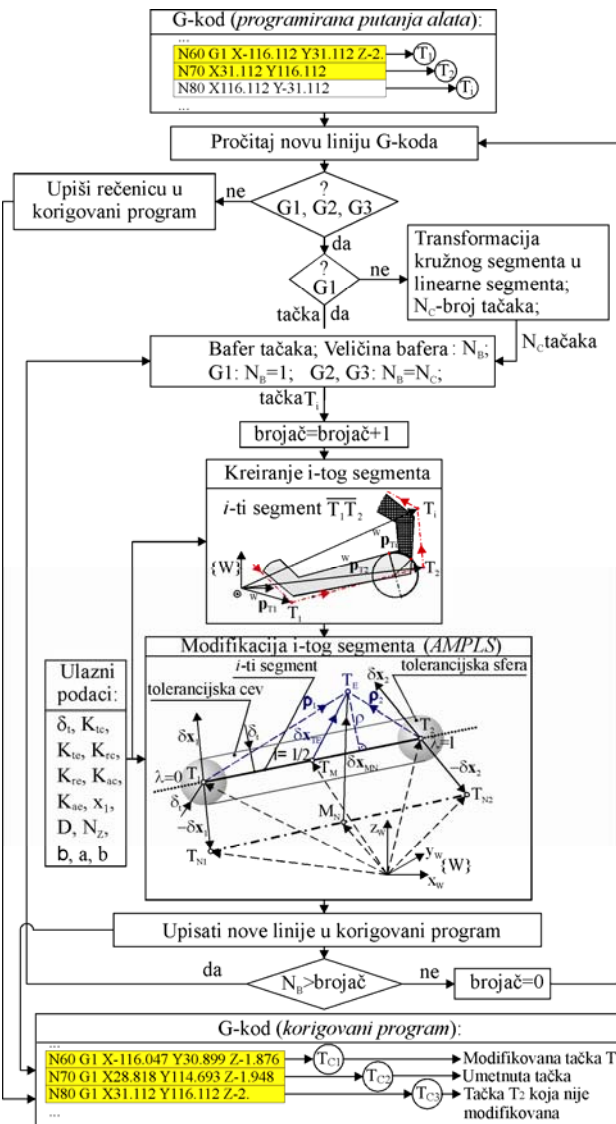
Slika 7. Koncept razvijenog *off-line* metoda kompenzacije

Algoritam za korekciju G -koda je dat na slici 8. Algoritam čita jednu po jednu liniju G -koda iz programirane putanje alata. Svaka linija se analizira da bi se proverilo da li u njoj postoji G funkcija ili ne. Ako postoji G funkcija onda se proverava da li se odnosi na linearnu ili kružnu interpolaciju. Ako je G adresa linearna interpolacija ($G1$) iz te linije se izdvaja jedna tačka i zapisuje u bafer (međumemoriju) tačaka. Ako je G adresa kružna interpolacija ($G2$ ili $G3$) onda se ona prevodi u niz linearnih segmenata na osnovu veličine koraka definisanog od strane korisnika. Nakon transformisanja kružne interpolacije, N_C tačaka se izdvaja iz linije programirane putanje i zapisuje u bafer tačaka. Dalje se čita po jedna tačka iz bafera i na osnovu prethodne dve pročitane tačke programirane putanje alata kompletiraju se podaci potrebni za kreiranje i -tog segmenta. Tako formirani i -ti segment se zatim modifikuje u nekoliko novih segmenata koji se pretvaraju u nove rečenice G -koda, koje se zatim zapisuju u korigovani program. Nakon što su novi segmenti, odnosno nove linije G -koda zapisane, proverava se da li je bafer tačaka prazan. Ako bafer nije prazan učitava se sledeća tačka iz bafera. Ukoliko je bafer prazan učitava se sledeća linija iz programirane putanje i čitava procedura se ponavlja.

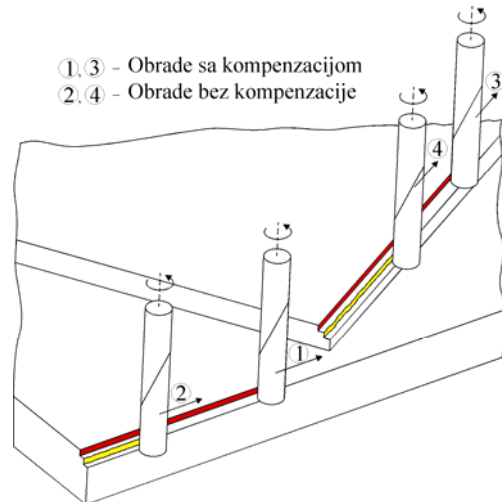
5. VERIFIKACIJA RAZVIJENOG METODA ZA KOMPENZACIJU GREŠAKA

U cilju verifikacije razvijenog *off-line* metoda za kompenzaciju grešaka izazvanih silama rezanja, kroz nekoliko eksperimenata obrada kontura na radnim predmetima od aluminijuma, prvo je napisan program za korekciju G -koda [16]. Program je napisan u *Matlab* softverskom paketu. Za verifikaciju razvijenog *off-line* metoda za kompenzaciju grešaka nastalih pod dejstvom sila rezanja pri obradi robotima vršeni su eksperimenti obrade na test radnim delovima od aluminijuma. Da bi se prikazali efekti primene metoda za kompenzaciju grešaka vršeni su eksperimenti obrade spoljašnje konture sa i bez kompenzacije. Kako se pri obradi spoljašnje konture bez kompenzacije alat neželjeno udaljava od programirane konture usled statičke popustljivosti robota, to su prvo vršene obrade sa kompenzacijom, a zatim bez kompenzacije, slika 9, da bi efekti primene razvijene metode za kompenzaciju grešaka bili uočljivi. Obrade sa i bez kompenzacije su

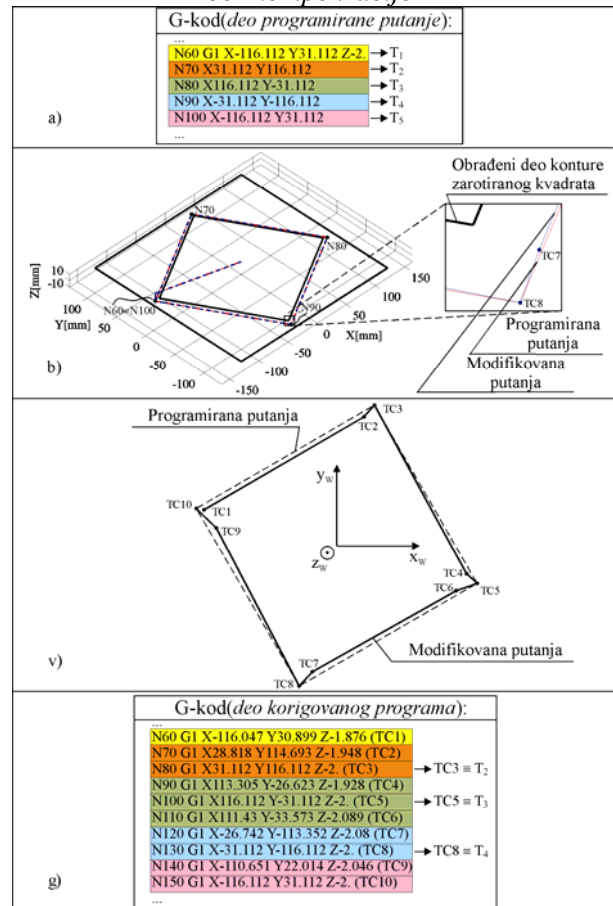
vršene istim režimom obrade i istim dubinama i širinama glodanja tako da se kompenzovani deo greške može lako uočiti i izmeriti. Konturne obrade bez kompenzacije su vršene kretanjem alata po programiranoj putanji u G-kodu, dok su konturne obrade sa kompenzacijom vršene kretanjem alata po modifikovanoj putanji generisanoj primenom razvijenog *off-line* kompenzacionog metoda, odnosno kretanjem vretenastog glodala putanjom definisanom korigovanim programom, slika 7. Na programirane putanje alata za obradu spoljašnjih kontura primenjen je razvijen metod za *off-line* kompenzaciju grešaka izazvanih silama rezanja. Programirane putanje alata su modifikovane primenom razvijenog programa za korekciju G-koda. Na osnovu ovako modifikovanih putanja softver generiše korigovane programe u G-kodu. Kretanjem alata po ovako korigovanim programima greške obrade bi trebale da budu u propisanim granicama, odnosno u okviru definisane tolerancijske cevi, slike 7,8 i 10.



Slika 8. Algoritam za korekciju G-koda



Slika 9. Plan eksperimenta obrade kontura sa i bez kompenzacije

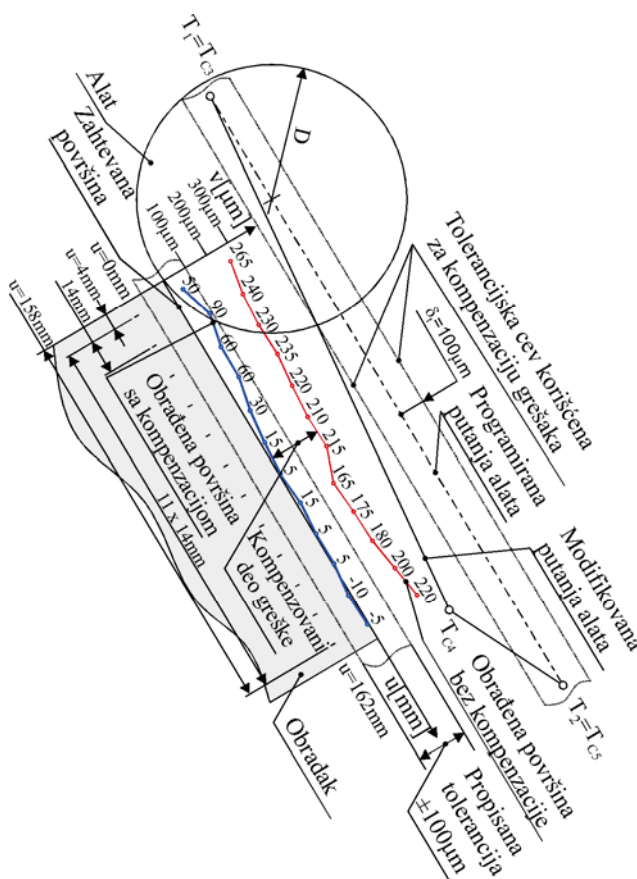


Slika 10. Korigovani i nekorigovani programi za obradu konture zarotiranog kvadrata na test radnom delu

Rezultati obrade konture zarotiranog kvadrata sa i bez kompenzacije, slika 11, koristeći korigovani program sa slike 10(g) i nekorigovani program sa slike 10(a) su dati na slici 12.



Slika 11. Obrada konture zarotiranog kvadrata



Slika 12. Greške pri obradi konture zarotiranog kvadrata

6. ZAKLJUČAK

Dobijeni eksperimentalni rezultati su pokazali da se primenom razvijenog metoda kompenzacije grešaka može ostvariti zadata tačnost obrade u očekivanim granicama za robote, s obzirom da na greške obrade takođe utiču i dinamika robota, krutost motornog vretena sa alatom, itd. Razvoj ovakvog metoda *off-line* kompenzacije grešaka obrade izazvanih silama rezanja kod robota koji se proramiraju u *G*-kodu stvara realne pretpostavke za njihovu praktičnu primenu. Razvijeni metod ne zahteva ulaganja u softver, adaptaciju upravljačkog sistema i nabavku senzora, a pri tom omogućava primenu postojećih *CAD/CAM* sistema za programiranje 5-osnih mašina alatki baziranih na *G*-kodu. Ovo znači da je direktno primenljiv od strane programera i operatera koji imaju iskustva u *CNC* tehnologiji i programiranju u *G*-kodu.

7. LITERATURA

- [1] E. Abele, M. Weigold, S. Rothenbuecher (2007) Modeling and identification of an industrial robot for machining applications, *CIRP Annals- Manufacturing Technology*, 56(1):387–390. doi: 10.1016/j.cirp.2007.05.090.
- [2] A. Klimchik, A. Pashkevich, D. Chablat, G. Hovland (2013) Compliance error compensation technique for parallel robots composed of nonperfect serial chains, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 29(2):385–393. doi: 10.1016/j.rcim.2012.09.008.
- [3] C. Lehmann, M. Pellicciari, M. Drust, J. W. Gunnink (2013) Machining with Industrial Robots: The COMET Project Approach, in: *Robotics in Smart Manufacturing*, editors: P. Neto, A.P. Moreira, 371:27–36, Springer Berlin Heidelberg, Berlin.
- [4] Z. Pan, H. Zhang (2008) Robotic machining from programming to process control: a complete solution by force control, *Industrial Robot: An International Journal*, 35(5):400–409. doi: 10.1108/01439910810893572.

- [5] J. DePree, C. Gesswein (2008) Robotic machining white paper project-Halcyon Development, URL: <http://www.halcyondevelop.com/>.
- [6] W. Li, E. Red, G. Jensen, M. Evans (2007) Reconfigurable mechanisms for application control (RMAC): applications, *Computer-Aided Design and Applications*, 4(1-4):549–556.
- [7] G. Alici, B. Shirinzadeh (2005) Enhanced stiffness modeling, identification and characterization for robot manipulators, *IEEE Transactions on Robotics*, 21(4):554–564. doi: 10.1109/TRO.2004.842347.
- [8] D. Milutinovic, M. Glavonjic, N. Slavkovic, Z. Dimic, S. Zivanovic, B. Kokotovic, L. Tanovic (2011) Reconfigurable robotic machining system controlled and programmed in a machine tool manner, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53(9-12):1217–1229. doi: 10.1007/s00170-010-2888-8.
- [9] D. Milutinović, M. Glavonjić, N. Slavković, Z. Dimić, B. Kokotović, S. Živanović (2010) Rekonfigurabilni obradni sistem na bazi robota za višeosnu obradu delova većih gabarita sa složenim estetskim i funkcionalnim površinama od mekših materijala srednje i niže klase tačnosti, Tehničko rešenje, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd.
- [10] M. Stelzer, O. Von Stryk, E. Abele, J. Bauer, M. Weigold (2008) High speed cutting with industrial robots: towards model based compensation of deviations, *Proceedings of Robotik*, 143–146, Munich, Germany.
- [11] C. Lehmann, M. Halbauer, D. Euhus, D. Overbeck (2012) Milling with industrial robots: Strategies to reduce and compensate process force induced accuracy influences, *Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)*, 17th Conference on IEEE, 1–4, IEEE.
- [12] C. K. Toh (2004) Static and dynamic cutting force analysis when high speed rough milling hardened steel, *Materials and design*, 25(1):41–50.
- [13] N. Slavkovic, D. Milutinovic, B. Kokotovic, M. Glavonjic, S. Zivanovic, K. Ehmann (2013) Cartesian Compliance Identification and Analysis of an Articulated Machining Robot, *FME Transactions*, 41(2):83–95.
- [14] N. Slavkovic, S. Zivanovic, D. Milutinovic, M. Glavonjic (2012) Compliance Analysis of an Articulated Machining Robot, *Strojarstvo: Journal for Theory and Application in Mechanical Engineering*, 54(3):229-235, ISSN 0562-1887.
- [15] N. Slavkovic, D. Milutinovic, M. Glavonjic (2014) A method for off-line compensation of cutting force-induced errors in robotic machining by tool path modification, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70(9-12):2083–2096. doi: 10.1007/s00170-013-5421-z.
- [16] Identifikacija, modeliranje i kompenzacija grešaka usled statičke popustljivosti robota za obradu (2015) Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd.
- [17] Y. Altintas (2000) *Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations and CNC design*, Cambridge University Press, Cambridge.
- [18] E. Budak (2006) Analytical models for high performance milling. PartI: cutting forces, structural deformations, and tolerance integrity, *International journal of machine tools and manufacture*, 46(12-13):1478–1488. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2005.09.009.

Slavkovic, N., Milutinovic, D., Zivanovic, S.

METHOD FOR COMPENSATION OF CUTTING FORCE-INDUCED ERRORS IN ROBOTIC MACHINING

Abstract: *This paper presents the part of the results in the field of development of robotic machining systems. This paper presents a developed method for compensation of cutting force-induced errors due to machining robot static compliance. The method has been verified through several experiments of contour machining, with and without error compensation, at the aluminum test parts.*

Key words: *multi-axis robotic machining, robot compliance, error compensation.*