

Rad po pozivu

Milutinović, D., Glavonjić, M., Živanović, S., Dimić, Z., Slavković, N.

RAZVOJ REKONFIGURABILNOG OBRADNOG SISTEMA NA BAZI ROBOTA

Rezime: Istraživanje i razvoj u oblasti višeosne obrade i rekonfigurabilnih multifunkcionalnih obradnih sistema su danas u svetu veoma aktuelni. U radu se pokazuje deo rezultata u razvoju multifunkcionalnog rekonfigurabilnog obradnog sistema na bazi robota za delove od mekih materijala sa složenim površinama, većih dimenzija i niže klase tačnosti.

Ključne reči: višeosna obrada, rekonfigurabilni obradni sistemi, roboti

DEVELOPMENT OF ROBOT BASED RECONFIGURABLE MACHINING SYSTEM

Abstract: Research and development in the fields of multi-axis machining and reconfigurable multifunctional machine tools are very intensive world wide. This paper presents the part of research results in the development of robot based reconfigurable multi-functioned machining system for large parts of soft materials with lower tolerances and sculptured surfaces.

Key words: multi-axis machining, reconfigurable machining systems, robots

1. UVOD

Kao što je poznato, savremene 5-oozne mašine alatke karakterišu visoka tačnost, visoka cena i relativno mali radni prostor. Ove činjenice su snažno motivisale proizvođače robota da pokriju prostor obrade velikih delova sa složenim površinama od mekših materijala i niže klase tačnosti. Industrijski roboti na današnjem nivou razvoja imaju izuzetne karakteristike u pogledu nosivosti, tačnosti i dinamike. Poredeći ih sa 5-osnim mašinama alatkama, za pomenutu klasu zadataka, odlikuje ih mnogo veći radni prostor i cena koja je niža skoro za red veličine. Međutim, jedan od najvećih nedostataka današnjih robota je njihovo programiranje. Naime, svaki proizvođač robota ima svoj jezik za programiranje. S obzirom da su roboti po definiciji multifunkcionalne mašine, robotski jezici pokrivaju vrlo različite oblasti primene kao što su manipulacija, zavarivanje, bojenje i tzv. pomoćne operacije obrade kao što su obaranje ivica, čišćenje, poliranje i slično. Programski jezici za robote su u kombinaciji sa obučavanjem pogodni za slučajeve gde se jednom napisan program koristi duže vremena. Međutim, za primenu robota u brzju izradi prototipova ili u višeosnoj obradi, programiranje robota programskim jezicima je veoma složeno i dugotrajno. Prema [1,2] razlog za ovo leži u nedovoljnoj kooperativnosti proizvođača robota u poređenju sa proizvođačima mašina alatki koji su bili spremni da koriste CAD/CAM sisteme na bazi standarda RS274, odnosno G kod. Razlozi za za ovo leže u relativno malom tržištu robota, ali i nespremnosti proizvođača robota da otkriju detalje svojih upravljačkih algoritama i softvera.

U cilju savladavanja ove ozbiljne barijere za primenu robota u višeosnoj obradi mekših delova velikih gabarita danas je pokrenuto nekoliko projekata kako od velikih i renomiranih proizvođača robota (KUKA, Motoman, Fanuc, Staubli), tako i od proizvođača softvera (Delcam). Primeri robota za obradu proizvođača robota KUKA i Staubli su pokazani na slici 1. Osnovni cilj ovih projekata je razvoj softvera za prevodenje G koda generisanih iz postojećih postprocesora za petoosne mašine alatke, na njihove robotske programske jezike.



Slika 1. Primeri robota za obradu proizvođača robota KUKA i STAUBLI

Polazeći od dugogodišnjeg iskustva u oblasti robota, mašina alatki, obrade i CAD/CAM-a na Katedri za proizvodno mašinstvo Mašinskog fakulteta u Beogradu, pokrenut je projekat razvoja pilot rekonfigurabilnog obradnog sistema na bazi robota za delove većih gabarita od mekših materijala, niže klase tačnosti i sa složenim estetskim i funkcionalnim površinama [3,4]. U ovom radu se daje postavka koncepta, opis i početni rezultati razvoja rekonfigurabilnog obradnog sistema na bazi robota domaće proizvodnje.

2. KONCEPT REKONFIGURABILNOG OBRADNOG SISTEMA NA BAZI ROBOTA

Potrebu za tehnologijom višeosne obrade glodanjem složenih estetskih i funkcionalnih površina kao i za rekonfigurabilnim multifunkcionalnim obradnim sistemima [3] imaju preduzeća u oblastima: izrade delova od lakih legura, obrade drveta, obrada drugih nemetala (kamen, plastika, staklo, kompozit), livenje metala (modeli, kalupi za jezgra i sl.), izrada alata za proizvode od kompozita (korita čamaca, kabine vozila, ljski lopatica, branika i sl.). Takođe značajan prostor za primenu ovakvih obradnih sistema predstavljaju i potrebe za restauracijom objekata kulturne baštine (crkve, manastiri, spomenici i sl.), kao i pozorišna i filmska scenografija.

Planirani rekonfigurabilni obradni sistem na bazi robota za izabranu klasu delova treba da obezbedi brzu izradu, na jednom mestu, složenih delova velikih gabarita od mekših materijala niže klase tačnosti sa složenim površinama generisanim raspoloživim CAD/CAM sistemima i metodama reverznog inženjerstva.

Ovakav sistem bi imao višestruko nižu cenu od postojećih petoosnih mašina alatki i zadovoljio zahteve u pogledu obrade niže klase tačnosti.

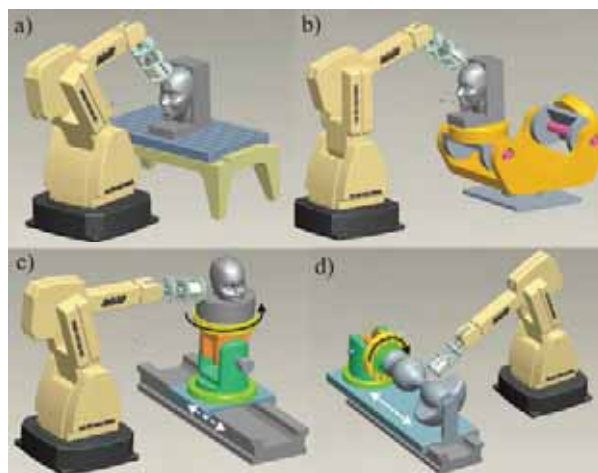
Postavka koncepta rekonfigurabilnog obradnog sistema na bazi robota koja se ovde ukratko daje se zasniva na:

- Raspoloživom 6-osnom robotu vertikalne zglobne konfiguracije domaće proizvodnje, slika 2, velikog radnog prostora, nosivosti i krutosti sa idejom upravljanja i programiranja kao 5-osne mašine,



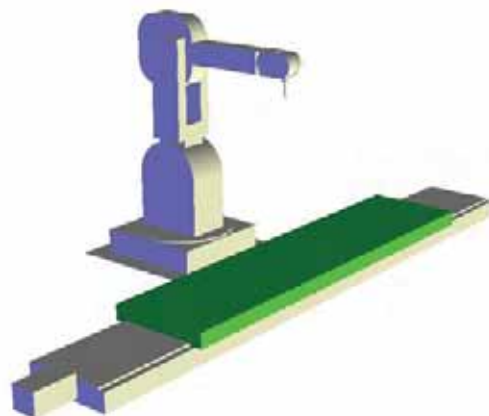
Slika 2. Raspoloživi industrijski robot LOLA 500

- Upravljačkom sistemu otvorene arhitekture baziranom na PC Linux platformi i upravljačkom sistemu ECM2 (Enhanced Machine Control) sa implementiranim upravljačkim algoritimima i softverom.
- Mogućnosti programiranja robota kao vertikalne petoosne glodalice pomoću G koda, čime se eliminiše potreba za translatorom G koda u robotski jezik.
- Mogućnost korišćenja svih CAD/CAM sistema sa implementiranom 5-osnom obradom za programiranje ovog obradnog sistema.
- Mogućnosti rekonfigurisanja osnovne verzije sa slike 3a u obradni sistem sa izmenljivim paletnim pozicionerom, slika 3b, sa dodatnim 2-osnim vertikalnim translatorno-obrtnim stolom, slika 3c i sa dodatnim 2-osnim horizontalnim translatorno-obrtnim stolom, slika 3d, i
- Virtuelnom obradnom sistemu na bazi robota za verifikaciju i simulaciju programa. Sistem je realizovan u Python virtuelnom grafičkom okruženju [7] i implementiran u upravljačkoj jedinici, slika 4.



a) robot sa radnim stolom b) robot sa izmenljivim paletnim pozicionerom c) translatorsna osa poziciona, obrtna kontinualna d) translatorsna i obrtna osa kontinualne

Slika 3. Konceptualni modeli rekonfigurabilnog obradnog sistema na bazi robota kao petoosne mašine

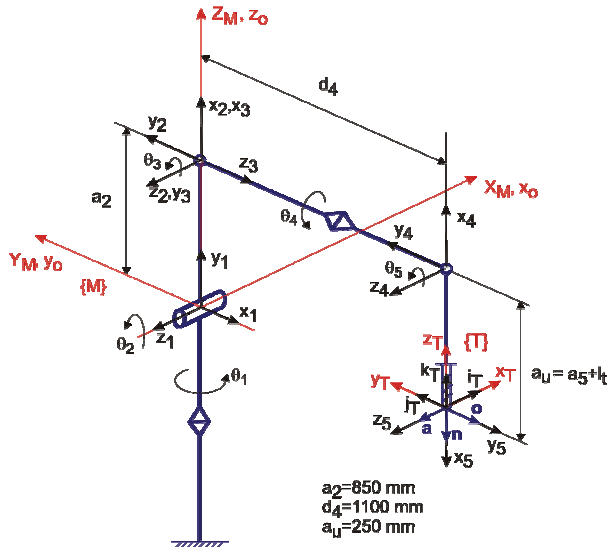


Slika 4. Virtuelni robot u Python grafičkom okruženju

3. UPRAVLJANJE I PROGRAMIRANJE

Upravljački sistem je baziran na PC Linux platformi i upravljačkom softveru otvorene arhitekture EMC2 (Enhanced Machine Control) [5], koji je namenjen za upravljanje mašinama alatkama i robotima serijske i paralelne kinematike. EMC2 je izrađen na osnovi NIST-ove (National Institute of Standards and Technology) [6] RCS (Real-time Control System) metodologije i programiran je korišćenjem RCS biblioteke.

Specifičan pristup kinematičkom modeliranju robota LOLA 50 (rešenje inverzne i direktne kinematike) je izvršeno po konvenciji za petoosne vertikalne mašine alatke slika 5.



Slika 5. Kinematički model robota LOLA50 kao vertikalne petoosne glodalice

Modeliranje robota LOLA 50 je izvršeno po Denavit-Hartenberg-ovoj konvenciji s tim što su uvedene dve dodatne transformacije koje se odnose na koordinatne sisteme alata i mašine po konvenciji za petoosne vertikalne mašine alatke. Pozicija i orijentacija alata, odnosno koordinatnog sistema vezanog za vrh alata {T}, u odnosu na koordinatni sistem robota kao mašine {M} je definisana jednačinom (1)

$${}^M_T T = {}^M_o T \cdot {}^o_5 T \cdot {}^5_T T = \begin{bmatrix} i_{Tx} & j_{Tx} & k_{Tx} & x_m \\ i_{Ty} & j_{Ty} & k_{Ty} & y_m \\ i_{Tz} & j_{Tz} & k_{Tz} & z_m \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Matrica

$${}^o_5 T = {}^o_1 A \cdot {}^1_2 A \cdot {}^2_3 A \cdot {}^3_4 A \cdot {}^4_5 A = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & x_o \\ n_y & o_y & a_y & y_o \\ n_z & o_z & a_z & z_o \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

određuje poziciju i orijentaciju koordinatnog sistema $Ox_5y_5z_5$ vezanog za vrh endefektora u odnosu na koordinatni sistem $Ox_0y_0z_0$, vezanog za bazu robota (po konvenciji za robote).

Pri ovome matrice ${}^{i-1}_i A$, $i=1,2,\dots,5$ predstavljaju matrice segmenata.

Matrica

$${}^5_T T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

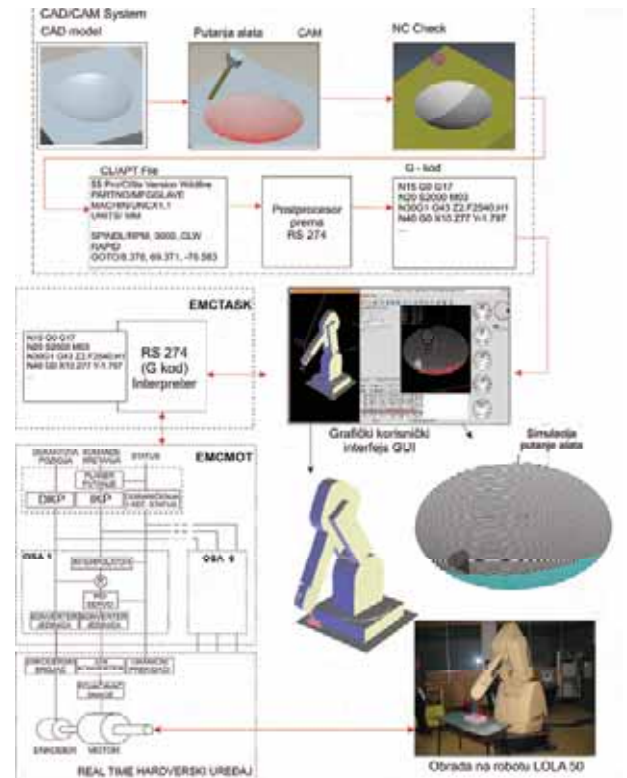
definiše poziciju i orijentaciju koordinatnog sistema {T} vezanog za vrh alata u odnosu na koordinatni sistem $Ox_5y_5z_5$.

Matrica ${}^M_o T$ definiše poziciju i orijentaciju baznog koordinatnog sistema robota u odnosu na usvojeni koordinatni sistem po konvenciji za petoosne mašine alatke (u

slučaju na slici 5, ${}^M_o T = I$).

Za ovako postavljene kinematički model rešenje direktnog kinematičkog problema je jednostavno. Međutim, rešavanje inverznog kinematičkog problema je veoma specifično kako za slučaj da samo robot izvodi sva kretanja tako i u slučajevima preraspodele kretanja između robota i dodatnih osa. Za rešeni direktni i inverzni kinematički problem, napisane su odgovarajuće funkcije u C++ jeziku i integrisane sa HAL (Hardware Abstract Layer) u EMC2-u.

Polazeći od postavljenog cilja da se planirani rekonfigurabilni obradni sistem na bazi petoosnog robota programira kao CNC mašina alatka primenom G-koda (RS274), dobijenog iz raspoloživih CAD/CAM sistema, sistem upravljanja i programiranja je konfigurisan kao što je pokazano na slici 6.

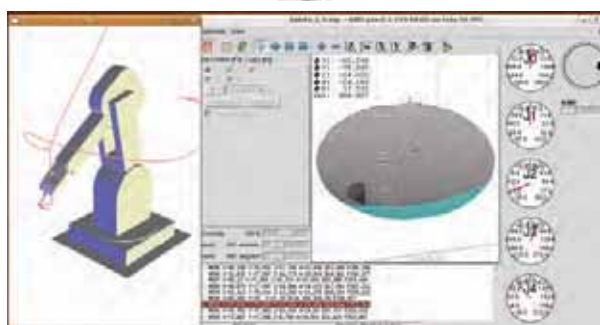
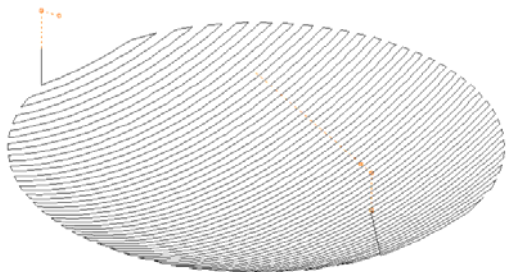


Slika 6. Koncept sistema upravljanja i programiranja za osnovnu varijantu sistema sa slike 3a

Polazi se od CAD modela za koji se u CAD/CAM sistemu (Pro/Engineer) generiše putanja alata (CLF – Cutter Location File). Za dobijenu putanju alata prvo se vrši njena verifikacija u raspoloživom softveru za simulaciju uklanjanja materijala (slika 6), a zatim pristupa postprocesiranju CLF radi dobijanja G-koda za petoosnu vertikalnu glodalicu. Razmatrane su varijante postprocesora za konfiguracije mašina (X,Y,Z,A,B) i (X,Y,Z,A,C) , [3,4], gde X,Y,Z predstavlja poziciju vrha alata, a A, B i C uglove orijentacije alata. Za varijantu sistema sa slike 3a, gde sva kretanja izvodi robot usvojen je postprocesor za konfiguraciju mašine (X,Y,Z,A,B) . Tako dobijeni G-kod se učitava u upravljački softver EMC2 gde se najpre vrši verifikacija programa na virtuelnoj mašini u realnom vremenu, slika 7, a zatim se upravljački signali sa sigurnošću mogu usmeriti ka realnom robotu kao petoosnoj vertikalnoj mašini. Virtuelni robot je konfigurisan preko nekoliko klasa predefinisanih u objektno orijentisanom jeziku Python.

Verifikacija programa u realnom vremenu na virtuelnoj mašini je neophodna zbog kinematike robota koja se bitno razlikuje od kinematike petoosnih mašina alatki (3 translatorne + 2 obrtne ose) čiji se G-kod preuzima. Takođe je

vrlo značajna analiza postavljanja obratka u radni prostor veštine robota, tako da obrada bude izvedena do kraja, a da ni jedna osa ne dođe do kraja svog hoda. To se proverava upravo na simulatoru, odnosno na virtuelnom robotu kao mašini, gde se vrši verifikacija G-koda, slika 7, sa pomeranjem segmenata i ispisivanjem putanje alata, kao da je reč o realnom robotu. Ukoliko dođe do prekoračenja hoda neke ose, vrši se korekcija postavljanja obratka u radni prostor i postupak ponavlja do ispunjenja svih uslova za obradu.



Slika 7. Prikaz ekrana za simulaciju putanje alata i simulator virtuelnog robota

4. PRIKAZ REALIZOVANOG PILOT REKONFIGURABILNOG OBRADNOG SISTEMA NA BAZI ROBOTA

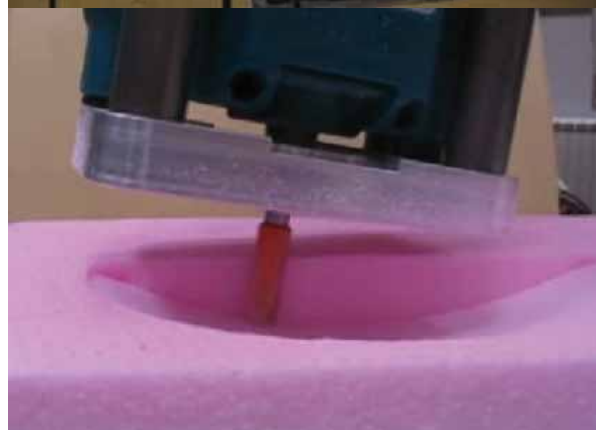
Osnovna verzija pilot rekonfigurabilnog multifunkcionalnog obradnog sistema na bazi robota, sa slike 3a je pokazana na slikama 8 i 9.

Tehničke karakteristike

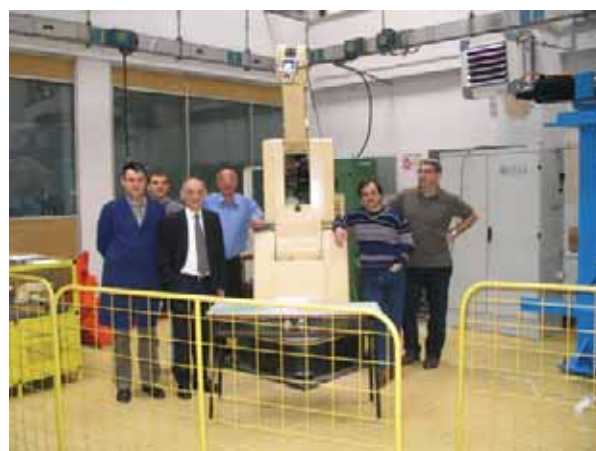
- Broj simultano upravljanih osa:
 - Na robotu 5 osa i
 - 1 ili 2 dodatne ose
- Radni prostor:
 - Robota oko 1 m³,
 - Robota sa dodatnom translatorskom osom do 3 × 1 × 1 m
- Nosivost robota: 50 kg
- Brzina glavnog kretanja: 25000 o/min
- Konturna brzina pomoćnih kretanja, u fazi uhadavanja prototipa: 2 m/min
- Dužina programa: neograničena
- CAD/CAM sistem: Pro/Engineer Wild fire 4
- Kinematička struktura mašine iz postprocesora: X, Y, Z, A, B, vertikalna glodalica
- Korekcija alata: implementirana u upravljačkom sistemu.

Tehničke mogućnosti:

Sistem omogućava 3-osnu, 3+2 osnu i 5-osnu obradu glodanjem delova od mekših materijala niže i srednje klase tačnosti sa estetskim i funkcionalnim površinama u oblastima: izrade delova od lakih legura, obrade drveta, obrade drugih nemetala (kamen, plastika, staklo, kompozit), livenja metala (modeli, kalupi za jezgra i sl.), izrade alata za proizvode od kompozita (korita čamaca, kabine vozila, ljsuki lopatica, branika i sl.). Takođe, značajan prostor za primenu ovakvih obradnih sistema predstavljaju i potrebe za restauracijom objekata kulturne baštine (crkve, manastiri, spomenici i sl.), kao i pozorišna i filmska scenografija.



Slika 8. Pilot rekonfigurabilnog multifunkcionalnog obradnog sistema na bazi robota



Slika 9. Projektni tim na prvoj internoj prezentaciji petoosne obrade robotom

5. ZAKLJUČAK

U radu je pokazan koncept i delimična realizacija rekonfigurabilnog obradnog sistema na bazi petoosnog robota, kao deo istraživanja na projektu Razvoj tehnologija višeosne obrade složenih alata za potrebe domaće industrije.

U ovoj fazi istraživanja konfigurisan je virtuelni sistem upravljanja i programiranja za slučaj obrade petoosnim robotom, pri čemu sva kretanja ostvaruje robot, dok obradak miruje. Napravljen je simulator virtuelnog robota kao mašine, za potrebe simulacije i testiranja programa pre slanja programa na realan robot. Nakon toga je tako konfigurisan sistem implementiran na realnom rekonstruisanom petoosnom robotu LOLA 50, čime je zamenjena postojeća upravljačka jedinica, koja je imala PTP (Point to Point) upravljanje i sistem programiranja obučavanjem. Izvršena je i verifikacija probnom petoosnom obradom udubljene kalote.

Rekonfigurabilni obradni sistem na bazi robota se koristi i u nastavi na master i doktorskim studijama na Katedri za proizvodno mašinstvo, Mašinskog fakulteta u Beogradu.

Suštinu novo konfigurisanog sistema upravljanja i programiranja čini mogućnost programiranja robota u višeosnoj obradi pomoću G-koda. Ovaj pristup se bitno razlikuje od postojećih sistema programiranja robota robotskim jezicima, što je za obradu veoma komplikovano. Takođe, ovako konfigurisan sistem upravljanja i programiranja se razlikuje i od danas aktuelnih pokušaja da se za obradu robotima, vrši prevođenje G-koda u robotske jezike. Sistem je testiran na većem broju primera, koji su programirani u raspoloživom CAD/CAM sistemu.

U narednim fazama istraživanja definišaće se broj, vrste i rapored dodatnih pomoćnih i pozicionih translatorskih i obrtnih osa. Ovo znači da će se sistem upravljanja i programiranja modifikovati tako da će omogućiti petoosnu obradu različitim kombinacijama osa robota i dodatnih pomoćnih osa.

6. IZJAVA ZAHVALNOSTI

Ovaj rad je nastao u okviru istraživanja na projektu Razvoj tehnologija višeosne obrade složenih alata za potrebe domaće industrije, koji je podržan od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj, Vlade Republike Srbije.

7. LITERATURA

- [1] Webb, G., Morel, M., K., Robots: The Lower Cost, More Flexible Process Improvement Alternative to CNC Machine Tools, <http://www.Robotmachining.com>
- [2] Bates, C., Move over machine tools here come robots, American Machinist Vol. 02/17/2006.
- [3] Milutinović, D., Glavonjić, M., Živanović, S., Slavković, N., Multifunkcionalni rekonfigurabilni obradni sistem za višeosnu obradu složenih alata i delova velikih gabarita, Elaborat, Mašinski fakultet Beograd, 2009.
- [4] Milutinović, D., Glavonjić, M., Živanović, S., Dimić, Z., Multifunkcionalni rekonfigurabilni obradni sistem na bazi robota, XXXII Savetovanje proizvodnog mašinstva sa međunarodnim učešćem, Zbornik radova ISBN 978-86-7892-131-5, str. 369-372, FTN Departman za proizvodno mašinstvo, Novi Sad, 2008.
- [5] EMC, Enhanced Machine controller web site, <http://www.linuxcnc.org>
- [6] NIST, National Institute of Standards and Technology web site, <http://www.nist.gov>

- [7] Dimić, Z., Živanović, S., Kvrđić, V., Konfigurisanje EMC2 za programiranje i simulaciju višeosnih mašina alatki u Python virtuelnom grafičkom okruženju, XXXII Savetovanje proizvodnog mašinstva sa međunarodnim učešćem, Zbornik radova ISBN 978-86-7892-131-5, str.353-356, FTN Departman za proizvodno mašinstvo, Novi Sad, 2008.

Autori: Prof. dr Dragan Milutinović, Prof. dr Miloš Glavonjić, mr Saša Živanović, Nikola Slavković, dipl. maš. inž., Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Katedra za proizvodno mašinstvo, Kraljice Marije 16, 11000 Beograd, Srbija, Tel.: +381 11 3302-271, Fax: +381 11 3370-364.

Zoran Dimić, dipl. inž. el, Lola institut d.o.o, Kneza Višeslava 70a, 11030 Beograd, Srbija, Tel.: +381 11 2542-510, Fax: +381 11 2544-096

E-mail: dmilutinovic@mas.bg.ac.rs
mglavonjic@mas.bg.ac.rs
szivanovic@mas.bg.ac.rs
dimic@lola-ins.co.rs
nslavkovic@mas.bg.ac.rs