



D.Milutinović¹⁾, M. Glavonjić¹⁾, N. Slavković¹⁾, Z. Dimić²⁾, S. Živanović¹⁾, B. Kokotović¹⁾, Lj. Tanović¹⁾

REKONFIGURABILNI OBRADNI SISTEM NA BAZI ROBOTA ZA VIŠEOSNU OBRADU ³⁾

Rezime

Industrijski roboti mogu biti dobra alternativa za višeosnu obradu delova od mekih materijala većih gabarita i niže i srednje klase tačnosti. U radu je predstavljen koncept rekonfigurabilnog obradnog sistema na bazi robota za višeosnu obradu ove klase delova. Za osnovnu konfiguraciju 5-osnog obradnog sistema na bazi robota prikazan je pristup modeliranja i prototip razvijenog sistema upravljanja sa programiranjem u G-kodu. Eksperimentalni obradni sistem na bazi robota je verifikovan uspešnom obradom nekoliko test radnih predmeta.

Ključne reči: obrada robotima, modeliranje robota, upravljanje i programiranje

1. UVOD

U poslednje četiri decenije industrijski roboti se veoma uspešno primenjuju za realizaciju različitih tehnoloških zadataka kao što su manipulacija, zavarivanje, montaža, bojenje kao i u tzv. pomoćnim operacijama vezanim za obradu (obaranje ivica, čišćenje, poliranje i sl.). Međutim, prema [1,2] samo 3 do 4 procenta od ukupnog broja robota se primenjuje u obradi.

U poređenju sa mašinama alatkama robote odlikuje niža cena veća fleksibilnost i potencijalno veći radni prostor. Iz ovih razloga istraživači, vodeći proizvođači robota i softvera kao i ljudi iz industrije poslednjih nekoliko godina nastoje da zamene 5-osne mašine alatke robotima za odgovarajuće vrste obrade. Ovo se pre svega odnosi na glodanje materijala kao što su gлина, pena, vosak itd. pri projektovanju proizvoda i brzom izradi prototipova [3,4,5,6,7,8]. Obrada radnih predmeta od tradicionalnih materijala kao što su drvo, kamen, aluminijum itd. niže i srednje klase tačnosti je takođe dala zadovoljavajuće rezultate [1,9,10]. Kao što je poznato slaba tačnost i krutost struktura robota kao i kompleksnost programiranja su i dalje ozbiljno ograničenje za šire prihvatanje obrade robotima u praksi. Aktuelna istraživanja u oblasti obrade robotima se danas odnose na analizu kinematike, kalibraciju, upravljanje i programiranje kao i same procese obrade robotima [2,4,9,11,12]. Vodeći proizvođači robota razvijaju specifična rešenja robota za obradu [13].

S obzirom da su roboti po definiciji multifunkcionalne mašine, robotski jezici pokrivaju vrlo različite oblasti primene. Programski jezici za robote u kombinaciji sa obučavanjem su pogodni za slučajeve gde se jednom napisan program koristi duže vremena. Međutim, za primenu robota u brzom izradi prototipova ili u višeosnoj obradi programiranje robota programskim jezicima je veoma složeno i dugotrajno. Složenost programiranja robota je posledica nedovoljne 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 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 većih gabarita danas je pokrenuto nekoliko projekata kako od velikih i renomiranih proizvođača robota, tako i od proizvođača softvera [12,13]. Osnovni ciljevi ovih projekata su razvoj softvera za prevođenje G koda generisanih iz postojećih postprocesora za petoosne mašine alatke na njihove robotske programske jezike,

¹⁾ Prof. dr Dragan Milutinović (dmilutinovic@mas.bg.ac.rs), prof. dr Miloš Glavonjić, Nikola Slavković, asistent, mr Saša Živanović, asistent, mr Branko Kokotović, asistent, prof. dr Ljubodrag Tanović, Mašinski fakultet, Kraljice Marije 16, 11120 Beograd

²⁾ Zoran Dimić, dipl. ing (dimic@li.rs), LOLA Institut d.o.o, Kneza Višeslava 70a

³⁾ Ovaj rad je nastao u okviru istraživanja na projektu Razvoj tehnologija višeosne obrade složenih alata za potrebe domaće industrije (TR-14034), koji je podržan od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj, Vlade Republike Srbije.

razvoj specifičnih postprocesora za robotske jezike, razvoj novih upravljačkih sistema i sl. Međutim, svi ovi pristupi ne rešavaju suštinski problem, a to je primenljivost postojećih CAD/CAM sistema i postojećih znanja u fabrikama u oblasti tehnologije izrade složenih delova i CNC programiranja.

U cilju doprinosa efikasnijoj primeni robota u obradi pokrenut je projekat razvoja rekonfigurabilnog obradnog sistema na bazi robota koji bi se programirao kao CNC mašina alatka [14,15]. Ovako zamišljen rekonfigurabilni obradni sistem na bazi robota bi omogućavao višeosnu obradu složenih delova većih gabarita od mekših materijala niže i srednje klase tačnosti sa skulpturnim površinama generisanim raspoloživim CAD/CAM sistemima i metodama reverznog inženjerstva.

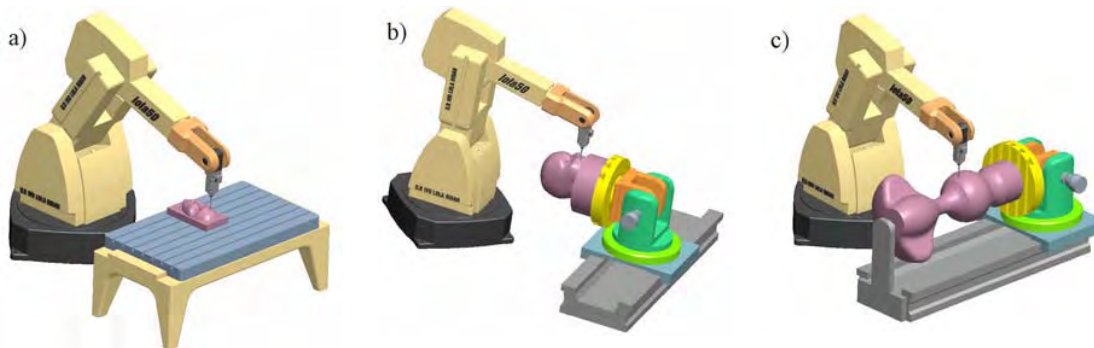
U radu je predstavljen koncept rekonfigurabilnog obradnog sistema na bazi robota za višeosnu obradu ove klase delova. Za osnovnu konfiguraciju 5-osnog obradnog sistema na bazi robota prikazan je pristup modeliranja i prototip razvijenog sistema upravljanja sa programiranjem u G-kodu. Eksperimentalni obradni sistem na bazi robota je verifikovan uspešnom obradom nekoliko test radnih predmeta.

2. KONCEPT REKONFIGURABILNOG OBRADNOG SISTEMA NA BAZI ROBOTA

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

Postavka koncepta rekonfigurabilnog obradnog sistema na bazi robota za višeosnu obradu [14,15], slika 1, koja se ovde ukratko daje se zasniva na:

- razvoju specijalizovanog 5-osnog robota vertikalne zglobne konfiguracije, slika 1a, većeg radnog prostora, veće nosivosti i krutosti sa integrisanom obradnom jedinicom, slično kao [9,16]. Ovakav robot bi zbog prednosti vezanih za krutost [1] i singularitete [21] funkcionisao kao vertikalna 5-osna glodalica (X, Y, Z, A, B) sa klačenjem vretena [17];
- mogućnosti rekonfigurisanja sistema preko dodatnih modularnih obrtnih i translatorskih osa (slika 1b i 1c);
- upravljačkom sistemu otvorene arhitekture, u ovoj fazi baziranom na PC real-time Linux platformi i EMC2 (Enhanced Machine Control) softverskom sistemu [18,19];
- mogućnosti programiranja robota kao vertikalne 5-osne glodalice u G-kodu;
- mogućnosti korišćenja postojećih CAD/CAM sistema sa implementiranom 3-osnom i 5-osnom obradom za vertikalne glodalice (X, Y, Z, A, B) sa klačenjem vretena;
- virtuelnim rekonfigurabilnim obradnim sistemom za verifikaciju i simulaciju programa na bazi Python grafičkog okruženja implementiranom u upravljačku jedinicu;



Slika 1. Koncept rekonfigurabilnog obradnog sistema za višeosnu obradu na bazi robota

Kao što se može uočiti, planirani sistem koji se delimično predstavlja u ovom radu u osnovi ima za cilj da bude primenljiv u pogonu od ljudi koji imaju iskustva u CNC tehnologiji i programiranju u G-kodu koji je još uvek veoma rasprostranjen [20].

Verifikacija postavljenog koncepta razvoja sistema upravljanja i programiranja koji se delimično opisuje u ovom radu je baziran na raspoloživom 6-osnom robotu domaće proizvodnje nosivosti 50 kg pri čemu je šesta osa blokirana, slika 2. Obradna jedinica snage 1,2 kW i 5000-25000 min⁻¹ kao i set ravnih i poluloptastih glodala, različitih prečnika i dužina, su izvedeni modifikovanjem postojećih komercijalnih rešenja.



Slika 2. Eksperimentalni Laboratorijski 5-osni obradni sistem na bazi robota

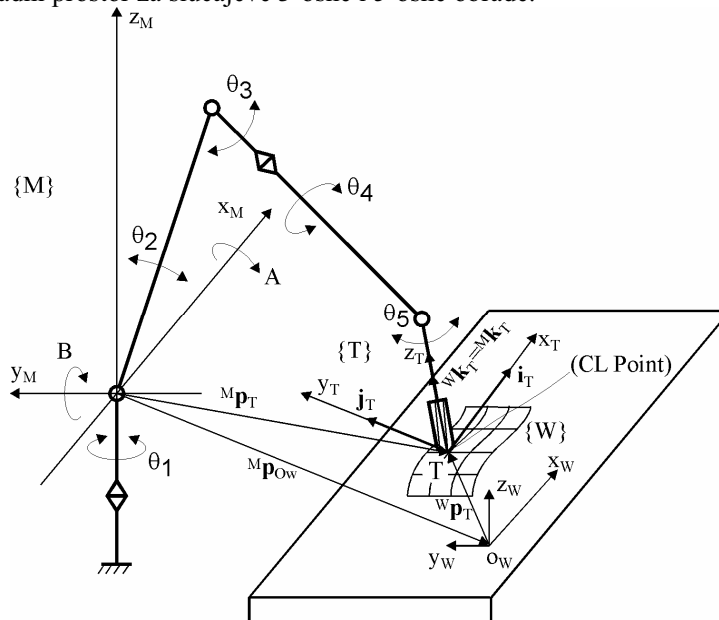
Kao što se vidi sa slike 2, eksperimentalni obradni sistem na bazi robota se dalje razmatra kao 5-osna vertikalna glodalica (X, Y, Z, A, B) sa klaćenjem vretena pri čemu se obrada vrši na radnom stolu ispred robota. Ovako konfigurisan sistem kao i ograničena kretanja u zglobovima u odnosu na referentnu poziciju omogućavaju:

- pogodnosti vezane za krutost,
- uzimanje u obzir samo jednog rešenja inverzne kinematike i
- eliminaciju singulariteta robota.

Problemi analize krutosti, kalibracije i kompenzacije koji su, kao što je poznato, od velike važnosti [9,11,21] nisu razmatrani u ovom radu.

3. KINEMATIČKO MODELIRANJE

S obzirom da 5-osni robot sa slike 1a odnosno slike 2 treba da funkcioniše kao 5-osna vertikalna glodalica (X, Y, Z, A, B) razvijen je specifičan pristup modeliranja koji omogućava realizaciju sistema upravljanja i programiranja. Činjenica da sistem treba da omogući korišćenje postojećih CAD/CAM sistema to je neophodno: uspostaviti koordinatne sisteme mašine {M}, alata {T} i obratka {W} po konvencijama za mašine alatke, slika 3, definisati unutrašnje i spoljašnje koordinate, rešiti direktni i inverzni kinematički problem i definisati radni prostor za slučajeve 3-osne i 5-osne obrade.



Slika 3. Pozicija i orijentacija alata u koordinatnom sistemu obratka {W} i referentnom koordinatnom sistemu robota {M}

Geometrijski model 5-osnog robota, slika 3, ukazuje na dve specifičnosti. Prvo, raspored osa 4 i 5 nije kao kod većine 5-osnih robota a drugo, referentni koordinatni sistem {M} i koordinatni sistem alata {T} su pridruženi po konvenciji za 5-osne glodalice (X, Y, Z, A, B) sa njihovim alata [22].

U cilju rešavanja direktnog i inverznog kinematičkog problema polazi se od definisanja unutrašnjih i spoljašnjih koordinata.

Unutrašnje koordinate: Vektor unutrašnjih koordinata je predstavljen kao $\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4 \ \theta_5]^T$ gde su $\theta_i, i=1,2,\dots,5$ skalarne promenljive odnosno ugaona pomeranja u zglobovima upravljana aktuatorima.

Spoljašnje koordinate: Kao što je poznato CAD/CAM sistem izračunava putanju alata (CL file) koju u koordinatnom sistemu obratka $\{W\}$ čine vektor položaja centra alata ${}^W \mathbf{p}_T = [x_T \ y_T \ z_T]^T$ i orijentacija alata definisana jediničnim vektorom ose alata z_T kao ${}^W \mathbf{k}_T = [k_{Tx} \ k_{Ty} \ k_{Tz}]^T$.

Kako su koordinatni sistemi mašine $\{M\}$ i radnog predmeta $\{W\}$ uvek paralelni i iste orijentacije osa to su položaj centra alata i njegova orijentacija u koordinatnom sistemu mašine $\{M\}$ definisani vektorima

$${}^M \mathbf{p}_T = [x_M \ y_M \ z_M]^T = {}^M \mathbf{p}_{Ow} + {}^W \mathbf{p}_T \quad (1)$$

$${}^M \mathbf{k}_T = {}^W \mathbf{k}_T = [k_{Tx} \ k_{Ty} \ k_{Tz}]^T \quad (2)$$

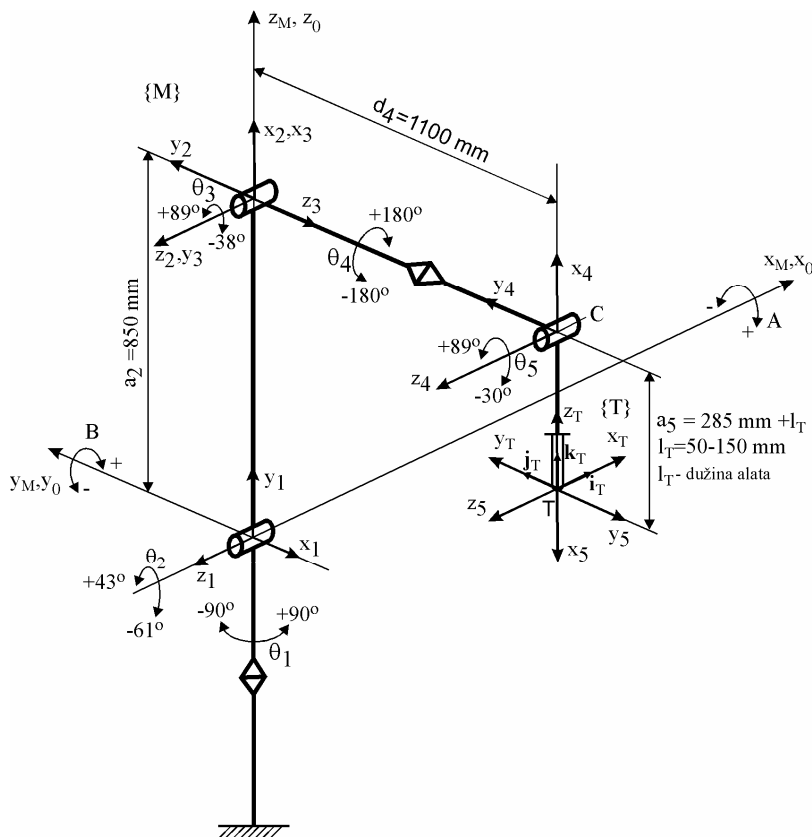
gde je ${}^M \mathbf{p}_{Ow} = [x_{Ow} \ y_{Ow} \ z_{Ow}]^T$ vektor položaja koordinatnog sistema obratka $\{W\}$ koji se određuje po uobičajenoj proceduri za CNC mašine alatke. U cilju kompletiranja vektora spoljašnjih koordinata, pored vektora položaja ${}^M \mathbf{p}_T$ potrebno je odrediti i uglove orijentacije z_T ose alata A i B. S obzirom da robot ima 5 stepeni slobode promenom unutrašnjih koordinata θ može se upravljati samo osom orijentacije alata z_T dok se orijentacijama osa x_T i y_T ne može upravljati.

Izračunavanjem uglova orijentacije A i B iz jediničnog vektora orijentacije alata ${}^W \mathbf{k}_T$ (2) po uobičajenoj proceduri [23] se kompletira vektor spoljašnjih koordinata \mathbf{x} koji specificira položaj alata i njegovu orijentaciju kao

$$\mathbf{x} = [x_M \ y_M \ z_M \ A \ B]^T \quad (3)$$

Direktni i inverzni kinematički problem: Specifičnost strukture robota kao i usvojeni referentni koordinatni sistem vezan za osnovu robota $\{M\}$ i koordinatni sistem alata $\{T\}$ po konvenciji za vertikalne 5-osne glodalice, slika 3, su usloveli specifičan način kinematičkog modeliranja.

Koristeći Denavit-Hartenbergov pristup prvo je formiran kinematički model robota, slika 4.



Slika 4. Kinematički model robota u referentnom položaju

Kao što se vidi sa slike pridruženi koordinatni sistemi segmentima robota $0_i x_i y_i z_i$, $i = 0, 1, 2, \dots, 5$, referentni položaji zglobova kao i opsezi kretanja definišu parametre segmenata na osnovu kojih su formirane matrice ${}^i A$, $i = 1, 2, \dots, 5$.

Uzimajući u obzir da se koordinatni sistem alata $\{T\}$ u odnosu na koordinatni sistem vezan za vrh robota $0_5 x_5 y_5 z_5$ može opisati homogenom transformacijom

$${}^5 T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & | & 0 \\ 0 & -1 & 0 & | & 0 \\ -1 & 0 & 0 & | & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & | & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

to se položaj centra alata i orijentacija alata odnosno položaj i orijentacija koordinatnog sistema alata $\{T\}$ u odnosu na referentni koordinatni sistem mašine $\{M\}$ mogu odrediti kao

$${}^M T = {}^0 A \cdot {}^1 A \cdot {}^2 A \cdot {}^3 A \cdot {}^4 A \cdot {}^5 T = \begin{bmatrix} {}^M_T R & | & {}^M \mathbf{p}_T \\ \hline 0 & 0 & 0 & | & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{Tx} & j_{Tx} & k_{Tx} & | & x_M \\ i_{Ty} & j_{Ty} & k_{Ty} & | & y_M \\ i_{Tz} & j_{Tz} & k_{Tz} & | & z_M \\ \hline 0 & 0 & 0 & | & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

gde su

$$\begin{aligned} i_{Tx} &= s\theta_1 \cdot s\theta_{23} \cdot s\theta_4 + c\theta_1 \cdot c\theta_4 \\ i_{Ty} &= -c\theta_1 \cdot s\theta_{23} \cdot s\theta_4 + s\theta_1 \cdot c\theta_4 \\ i_{Tz} &= -c\theta_{23} \cdot s\theta_4 \\ j_{Tx} &= s\theta_1 \cdot s\theta_{23} \cdot c\theta_4 \cdot s\theta_5 - c\theta_1 \cdot s\theta_4 \cdot s\theta_5 - s\theta_1 \cdot c\theta_{23} \cdot c\theta_5 \\ j_{Ty} &= -c\theta_1 \cdot s\theta_{23} \cdot c\theta_4 \cdot s\theta_5 - s\theta_1 \cdot s\theta_4 \cdot s\theta_5 + c\theta_1 \cdot c\theta_{23} \cdot c\theta_5 \\ j_{Tz} &= -c\theta_{23} \cdot c\theta_4 \cdot s\theta_5 - s\theta_{23} \cdot c\theta_5 \\ k_{Tx} &= -s\theta_1 \cdot s\theta_{23} \cdot c\theta_4 \cdot c\theta_5 + c\theta_1 \cdot s\theta_4 \cdot c\theta_5 - s\theta_1 \cdot c\theta_{23} \cdot s\theta_5 \\ k_{Ty} &= c\theta_1 \cdot s\theta_{23} \cdot c\theta_4 \cdot c\theta_5 + s\theta_1 \cdot s\theta_4 \cdot c\theta_5 + c\theta_1 \cdot c\theta_{23} \cdot s\theta_5 \\ k_{Tz} &= c\theta_{23} \cdot c\theta_4 \cdot c\theta_5 - s\theta_{23} \cdot s\theta_5 \\ x_M &= -a_5 \cdot k_{Tx} + s\theta_1 \cdot (d_4 \cdot c\theta_{23} - a_2 \cdot s\theta_2) \\ y_M &= -a_5 \cdot k_{Ty} - c\theta_1 \cdot (d_4 \cdot c\theta_{23} - a_2 \cdot s\theta_2) \\ z_M &= -a_5 \cdot k_{Tz} + d_4 \cdot s\theta_{23} + a_2 \cdot c\theta_2 \end{aligned}$$

pri čemu je $\theta_{ij} = \theta_i + \theta_j$.

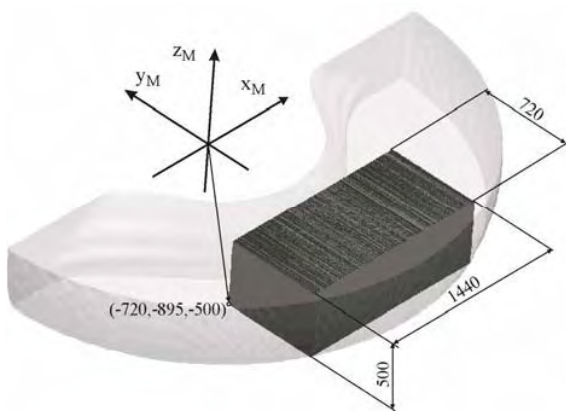
Jednačine (5) pokazuju rešenja direktnog kinematičkog problema. Iz ovih jednačina je analitički rešen inverzni kinematički problem. Uglovi θ_1, θ_2 i θ_3 su rešeni geometrijski dok su uglovi θ_4 i θ_5 rešeni algebarski. Postupak rešavanja je detaljno pokazan u [23]. Kao što se može videti sa slike 4 ograničena kretanja u zglobovima obezbeđuju izbor samo onih rešenja inverzne kinematike koja su logična za obradu kao i eliminaciju singulariteta.

Radni prostor: Korišćenjem rešenja direktne i inverzne kinematike mogući su različiti pristupi za određivanje radnog prostora pozicije i orijentacije (tzv. radni prostor veštine). Precizno određivanje radnog prostora veštine i kod robota i kod 5-osnih mašina alatki je veoma važno u cilju efikasnog korišćenja. Pristup koji je ovde korišćen se pokazao kao veoma koristan iako je zasnovan na definiciji radnog prostora pozicije i orijentacije za mehanizme sa paralelnom kinematikom [24]. U slučaju robota koji se ovde razmatra radni prostor veštine

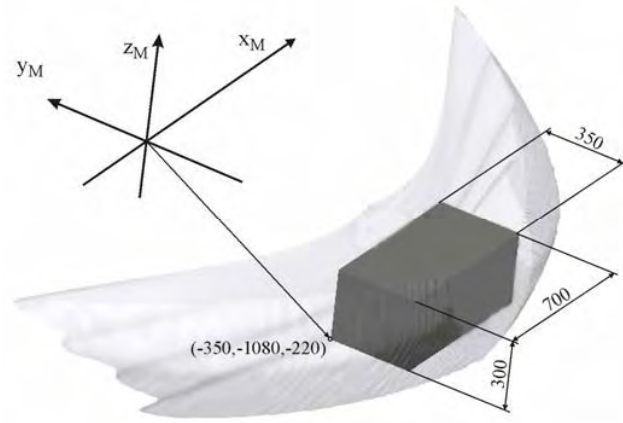
$$W_s(X, Y, Z, A, B) = \{0, 1\} \quad (6)$$

je Bulova funkcija čija je vrednost 1 ako alat može dostići poziciju i orijentaciju definisanu petorkom (X, Y, Z, A, B) bez prekoračenja ograničenja kretanja u zglobovima. Korišćenjem jednačina inverzne kinematike definisane su tačke na granicama radnog prostora za svaku kombinaciju uglova orijentacije A i B na osnovu kojih se zatim u Pro/Engineer-u dobija oblik radnog prostora.

Na slici 5 je pokazan deo radnog prostora za slučaj 3-osne obrade ($A = 0^\circ, B = 0^\circ$) u granicama duž z_M ose koje su logične za obradu. Za programere i operatere koji su familijarni sa CNC mašinama alatkama ovaj radni prostor je redukovao na kvadar. U veoma iscrpnoj analizi radnih prostora za sve moguće kombinacije uglova orijentacije alata u opsezima $A[-30^\circ, 30^\circ]$ i $B[-30^\circ, 30^\circ]$ su takođe u Pro/Engineer dobijeni solid modeli radnih prostora čiji je presek dat na slici 6. Ovako dobijeni radni prostor je iz praktičnih razloga redukovao na kvadar. Kao što je poznato u praksi, ovaj radni prostor je moguće proširiti u slučajevima kada su uglovi orijentacije alata u užim granicama.



Slika 5. Radni prostor za slučaj 3-osne obrade



Slika 6. Radni prostor za slučaj 5-osne obrade sa orijentacijom alata u opsezima $A[-30^\circ, 30^\circ]$ i $B[-30^\circ, 30^\circ]$

4. SISTEM UPRAVLJANJA I PROGRAMIRANJA

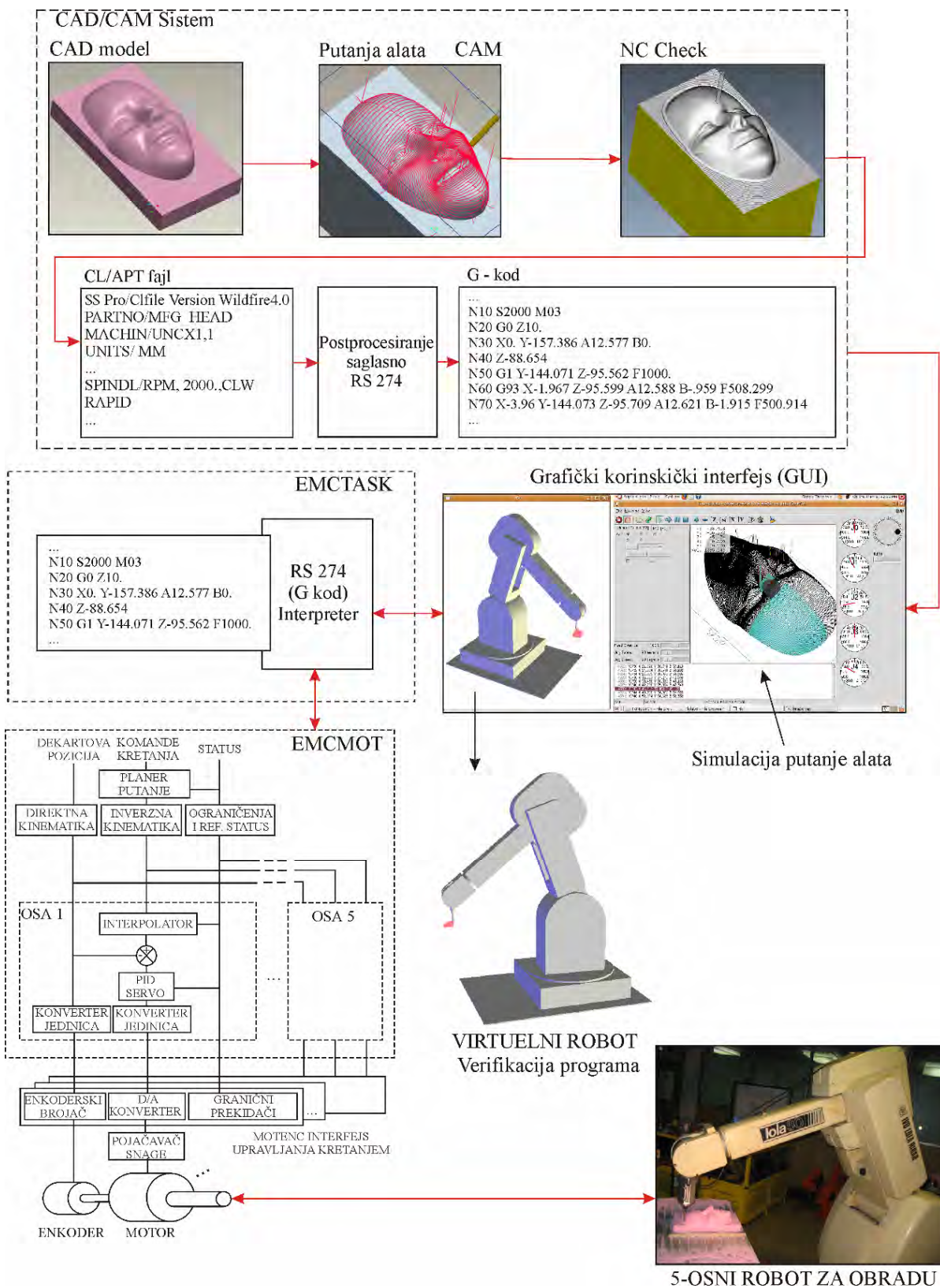
Polazeći od osnovne ideje da rekonfigurabilni obradni sistem za višeosnu obradu na bazi robota bude direktno primenljiv od programera CNC mašina alatki koristeći postojeće CAD/CAM sisteme i G-kod, razvijen je upravljački sistem otvorene arhitekture (OAC). Sistem je baziran na PC real-time Linux platformi i EMC2 softverskom sistemu za upravljanje mašina alatki i serijski i paralelnih mašina i robota [25]. Softverski sistem EMC2 je kreiran u NIST (National Institute of Standards and Technology) i predstavlja otvoreni softver (GPL-General Public License) [18,19].

Razvoj sistema se odvijao u više faza. U cilju testiranja funkcija inverzne i direktne kinematike, ponašanja upravljačkog sistema u realnom vremenu i razvoja sistema programiranja prvo je konfigurisan virtuelni robot u EMC2 preko Python grafičkog okruženja. Kinematički modul, baziran na jednačinama direktne i inverzne kinematike je programiran u C jeziku i integrisan u EMC2 software. Ovako konfigurisan sistem upravljanja je omogućio testiranje funkcionalnosti novo konfigurisanih elemenata korisničkog interfejsa, interpolacionih parametara i programirane putanje alata u granicama radnog prostora.

Zatim su za kompletiranje sistema upravljanja realnog robota korišćene PC interfejs kartice za upravljanje kretanjem. PCI interfejs na matičnoj ploči je bio osnovni kriterijum za izbor dve MOTENC Lite kartice od kojih svaka može da podrži po 4 ose kretanja. Na ovaj način pored 5 osa robota moguće je kasnije upravljati i sa još 3 ose kao što je pokazano na slici 1.

Na slici 7 je pokazana uprošćena struktura sistema upravljana i programiranja sa naznačenim osnovnim elementima EMC2 sistema.

Kao što se vidi sa slike 7 programiranje je veoma konvencionalno pri čemu se koristi postprocesor za prevođenje CL-file u G-kod. U toku učitavanja G-koda EMC2 softver izvršava grafičku simulaciju putanje alata. Za inicijalizovan robot i postavljen obradak program se može pokrenuti. Pri startovanju programa instrukcije G-koda se izvršavaju u realnom vremenu i generišu upravljačke signale koji se mogu usmeriti na realni ili virtuelni robot. Virtuelni robot omogućava završnu verifikaciju G-koda slično postojećim sistemima za off-line programiranje robota. Nakon verifikacije program se može bezbedno izvršiti na realnom robotu.



Slika 7. Struktura sistema upravljanja i programiranja

5. EKSPERIMENTALNA VERIFIKACIJA SISTEMA

Eksperimentalna verifikacija mogućnosti sistema je urađena na 4 reprezentativna test radna predmeta. Prva tri test dela su izrađena od stirodura dok je 4 urađen od materijala visoke gustine na bazi poliuretana koji se veoma često koristi za izradu modela.

Za eksperimentalnu verifikaciju sistema upravljanja i programiranja je korišćen Pro/Engineer sa ciljem da se programiranje rekonfigurabilnog obradnog sistema za višeosnu obradu na bazi robota sprovede na identičan način kao za 5-osne vertikalne glodalice (X, Y, Z, A, B) sa njihovim vretena. Programer startuje sa CAD modelom radnog predmeta, na uobičajen način, pri čemu generiše putanju alata (CL-file) koja se verifikuje preko modula NC-Check, slika 7. Korišćeni konfigurisani postprocesor za 5-osne glodalice (X, Y, Z, A, B) CL-file se prevodi u G-kod koji se učitava u upravljačku jedinicu sistema. Pre izvršenja obrade, kao što je pokazano na slici 7, verifikacija programa se može izvršiti na dva načina. Prvo, kao čisto grafička provera putanje alata i drugo, preko virtuelnog robota. Druga opcija verifikacije je veoma važna jer omogućava suštinsku proveru programa kroz proveru mogućih kolizija alata i obratka, kolizije segmenata robota i/ili alata sa pomoćnim priborom kao i to da li se obrada može izvršiti u radnom prostoru robota.

Na slici 8a je pokazan prvi test radni predmet projektovan tako da pokaže mogućnosti sistema za obradu uobičajenih kontura i površina koje su obuhvaćene različitim standardima. Slika 8b pokazuje 3-osnu obradu koja uključuje i predobradu za 5-osnu obradu kalote, slika 8c. Gotov test deo je pokazan na slici 8d. Korišćeni alat je ravno glodalo dužine 60/30 mm prečnika $d = 12\text{mm}$.

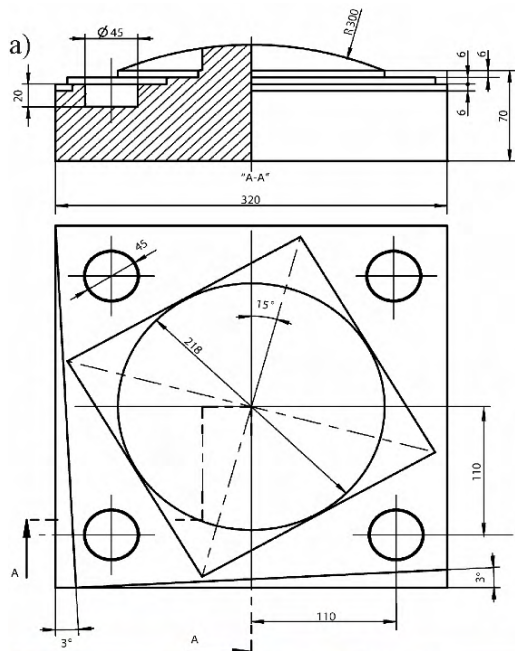
Na slici 9a je pokazan drugi test radni predmet sa složenom analitičkom površinom koja se sastoji od dve sferne površine povezane torusnom površinom. Slika 9b pokazuje 3-osnu predobradu dok je na slici 9c pokazana 5-osna završna obrada. U oba slučaja je korišćeno poluloptasto glodalo dužine 140/80 mm i prečnika $d = 11\text{mm}$. Ovaj primer je bio veoma značajan zbog provere ponašanja robota pri velikim promenama orijentacije alata na malim rastojanjima odnosno pri obradi zaobljenja između konkavne i konveksne sfere.

Na slici 10 se pokazuje 3-osna obrada trećeg test dela u obliku ljudskog lica. Slika 10a pokazuje predobradu i grubu obradu dok se na slici 10b pokazuje završna obrada. Alat za izradu ovog dela je isti kao u prethodnom primeru.

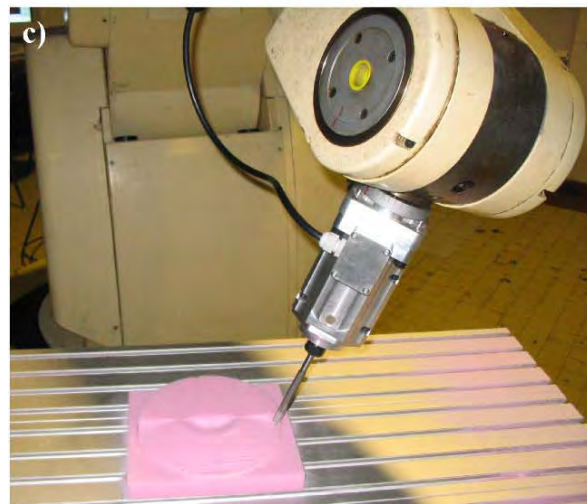
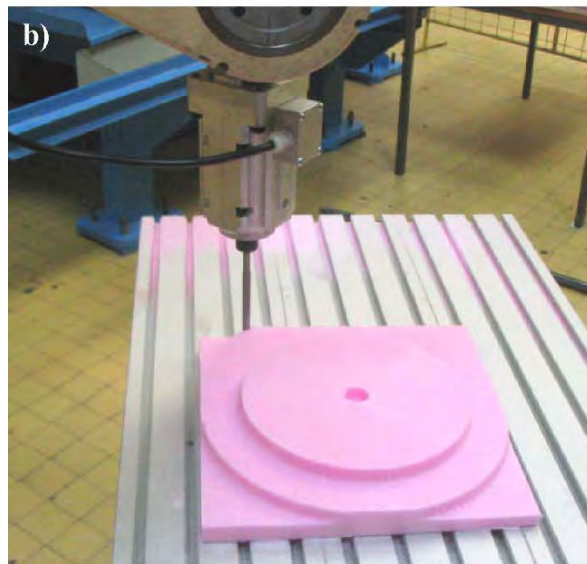
Na slici 11 je pokazana izrada lopatice od modela materijala visoke gustine na bazi poliuretana (Sika Block M560). Ovaj test radni predmet pokazuje da razvijeni sistem omogućava 5-osnu obradu najslabijih delova. Slika 11a pokazuje prvi od četiri prolaza predobrade, slika 11b treći odnosno završni prolaz grube obrade dok je na slici 11c pokazana završna obrada. Korišćeni alat za ovaj test primer je poluloptasto glodalo dužine 85/35 mm prečnika $d = 8\text{mm}$.

6. ZAKLJUČAK

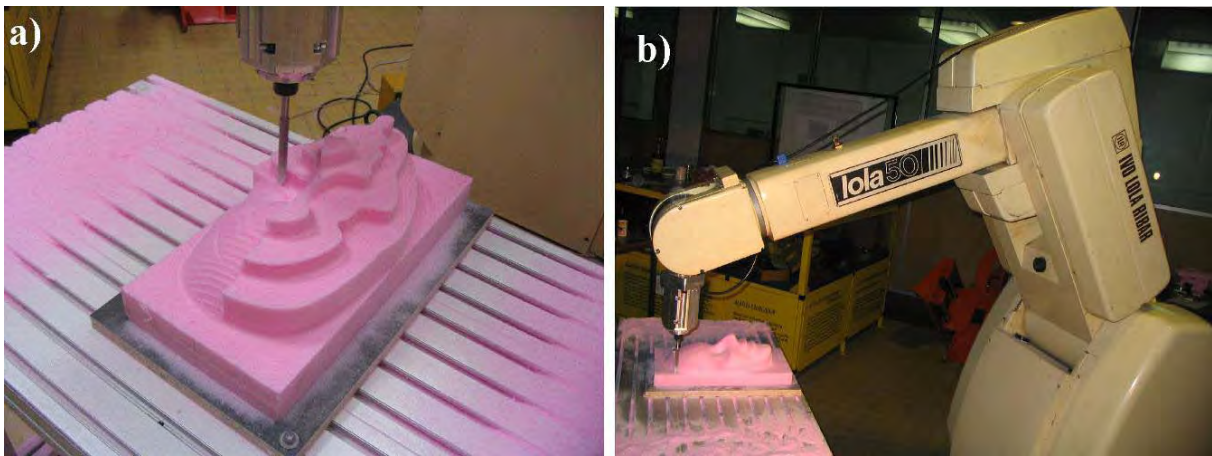
U radu je predstavljen koncept rekonfigurabilnog obradnog sistema za višeosnu obradu kompleksnih delova sa složenim površinama od mekših materijala niže i srednje klase tačnosti. Predstavljeni koncept je baziran na 5-osnom robotu vertikalne zglobove konfiguracije koji je razmatran kao specifična konfiguracija vertikalne 5-osne glodalice (X, Y, Z, A, B) sa mogućnošću programiranja u G-kodu. Za osnovnu konfiguraciju obradnog sistema na bazi 5-osnog robota pokazan je pristup modeliranja kao i razvijeni prototip sistema upravljanja i programiranja na bazi EMC2 softvera i hardvera. Verifikacija eksperimentalnog obradnog sistema na bazi robota je pokazana na četiri reprezentativna test radna predmeta od mekših materijala. Prikazane obrade test radnih predmeta su se odnosile na 3-osnu i 5-osnu obradu analitičkih i skulpturnih površina. Takođe je pokazano da se programiranje i sama obrada izvode po procedurama za CNC mašine alatke. Razvijeni i eksperimentalni prototip rekonfigurabilnog obradnog sistema jasno pokazuje da bi komercijalna realizacija bila superiornija od postojećih rešenja obradnih sistema na bazi robota s obzirom da je G-kod još uvek dominantan u industriji.



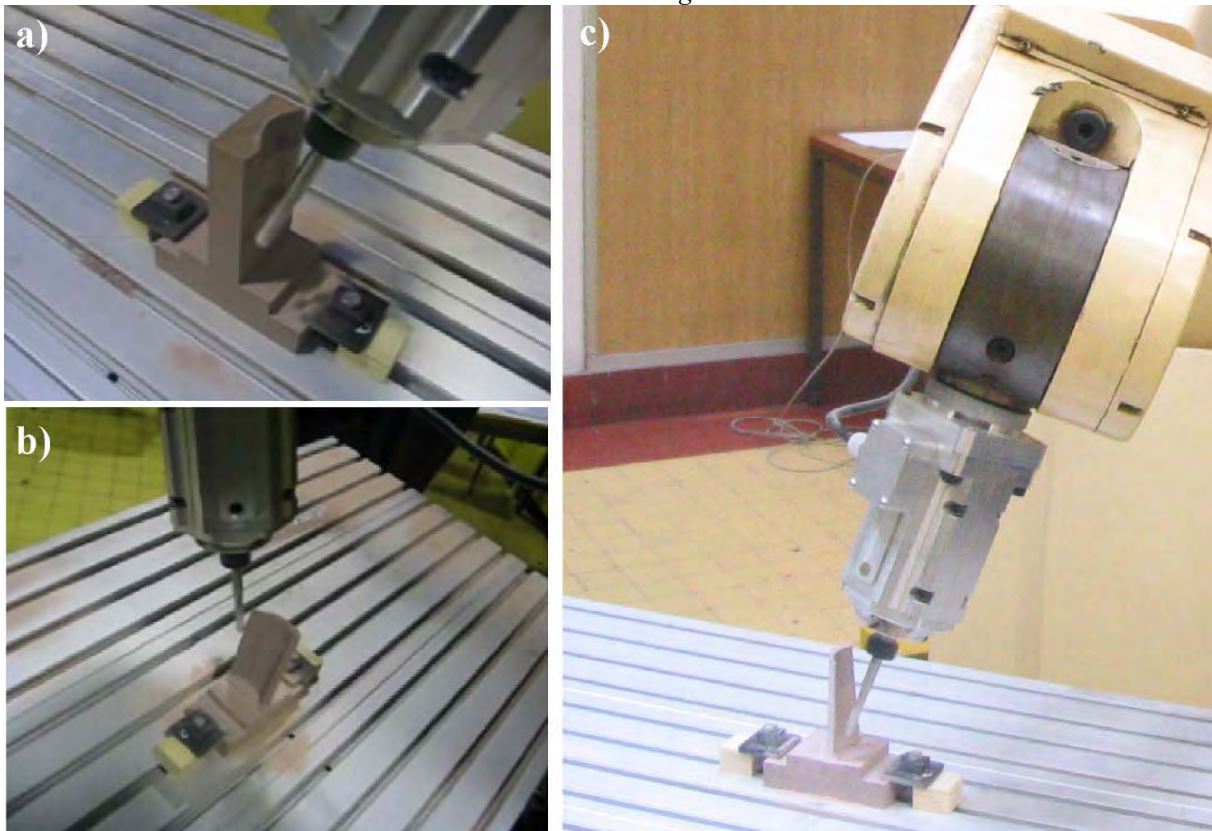
Slika 8. Obrada prvog test dela



Slika 9. Obrada drugog test dela



Slika 10. Obrada trećeg test dela



Slika 11. Obrada četvrtog test dela

7. LITERATURA

- [1] Abele E, Kulok M, Weigold M (2005) Analysis of a machining industrial robot. Proc 10th International Scientific Conference on Production Engineering-CIM2005, Lumbarda, Croatia, pp II 1-11.
- [2] Pan Z, Zhang H (2008) Robotics 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.
- [3] Vergeest JSM, Tangelder JWH (1996) Robot machines rapid prototype. The industrial robot 23(5):17-20 doi:10.1108/01439919610130328.
- [4] Shirase K, Tanabe N, Hirao M, Yasui T (1996) Articulated robot application in end milling of sculptured surface. JSME International Journal Series C 39(2):308-316.
- [5] Chen YH, Hu YN (1999) Implementation of a robot system for sculptured surface cutting. Part 1. Rough machining. Int J Adv Manuf Technol 15:624-629 doi: 10.1007/s001700050111.
- [6] Hu YN, Chen YH (1999) Implementation of a robot system for sculptured surface cutting. Part 2. Finish machining. Int J Adv Manuf Technol 15:630-639 doi: 10.1007/s001700050112.

- [7] Song Y, Chen YH (1999) Feature-based robot machining for rapid prototyping. Proc Instn Mech Engrs Part B 213(5):451-459 doi:10.1243/0954405991516921.
- [8] Gerke W (2004) Milling robot with 3D vision system for styrofoam modelling. Proc IEEE International Conference on Mechatronics and Robotics part II, Aachen, pp 192-196.
- [9] Abele E, Weigold M, Rothenbucher S (2007) Modeling and identification of an industrial robot for machining applications. Annals of the CIRP 56(1):387-390 doi: 10.1016/j.cirp.2007.05.090.
- [10] Shin-ichi M, Kazunori S, Nobuyuki Y, Yoshinari O (1999) High-speed end milling of an articulated robot and its characteristics. Journal of Materials Processing Technology, 95:83-89 doi:10.1016/S0924-0136(99)00315-5.
- [11] Olabi A, Beare R, Gibaru O, Damak M (2010) Feedrate planning for machining with industrial six-axis robots. Control Engineering Practice. Article in press doi:10.1016/j.conengprac.2010.01.004
- [12] Li W, Red E, Jensen G, Evans M (2007) Reconfigurable mechanisms for application control (RMAC): applications. Computer-Aided Design & Applications 4(1-4):549-556 ISSN 1686-4360.
- [13] DePree J, Gesswein C (2008) Robotic machining white paper project-Halcyon Development, <http://www.halcyondevelop.com>
- [14] Milutinovic D, Glavonjic M, Zivanovic S, Dimic Z, Slavkovic N (2009) Development of robot based reconfigurable machining system. Proc 33rd Conference on Production Engineering of Serbia, Belgrade, pp 151-155 ISBN 978-86-7083-662-4.
- [15] Milutinović D, Glavonjić M, Slavković N, Dimić Z, Kokotović B, Živanović S, 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 u okviru projekta TR-14034, Mašinski fakultet Beograd, 2010.
- [16] <http://www.staubli.com/en/robotics/robot-solution-application/high-speed-machining-robot/>
- [17] Lee RS, She CH (1997) Developing a postprocessor for three types of five-axis machine tools. Int J Adv Manu Technol. 13 (9):658-665 doi:10.1007/BF01350824.
- [18] <http://www.isd.mel.nist.gov/projects/rcslib/>
- [19] <http://www.linuxcnc.org/>
- [20] Shin SJ, Suh SH, Stroud I (2007) Reincarnation of G-code based part programs into STEP-NC for turning applications. Computer-Aided Design. 39:1-16 doi: 10.1016/j.cad.2006.08.005.
- [21] Affouard A, Duc E, Lartigue C, Langeron JM, Bourdet P (2004) Avoiding 5-axis singularities using tool path deformation. International Journal of Machine Tools & Manufacture 44:415-425 doi:10.1016/j.ijmachtools.2003.10.008.
- [22] ISO 841:2001 Industrial automation systems and integration -- Numerical control of machines -- Coordinate system and motion nomenclature.
- [23] Milutinovic D, Glavonjic M, Slavkovic N, Dimic Z, Zivanovic S, Kokotovic B, Tanovic Lj (2010) Reconfigurable robotic machining system controlled and programmed in a machine tool manner. Int J Adv Manuf Technol. (rad u štampi).
- [24] Innocenti C, Parenti CV (1994) Exhaustive enumeration of fully parallel kinematic chains. Dynamic Systems and Control 55:1135-1141.
- [25] Glavonjic M., Milutinovic D, Zivanovic S, Dimic Z, Kvrđic V (2010) Desktop 3-axis parallel kinematic milling machine. Int J Adv Manuf Technol. 46(1-4):51-60 doi:10.1007/s00170-009-2070-3.

Dragan Milutinovic, Milos Glavonjic, Nikola Slavkovic, Zoran Dimic, Sasa Zivanovic, Branko Kokotovic, Ljubodrag Tanovic

RECONFIGURABLE ROBOT MACHINING SYSTEM FOR MULTI-AXIS MACHINING

Summary

Industrial robots could be a promising cost-effective alternative for multi-axis machining of complex parts of light materials with lower tolerances having freeform surfaces. For the basic configuration of a 5-axis robotic machining system, the robot modeling approach and prototype of developed control system with programming in G-code are shown. Finally, several test work pieces were machined to demonstrate the effectiveness of experimental robotic machining system.

Keywords: robotic machining, robot modeling, control and programming system