

**UNIVERZITET U BEOGRADU  
MAŠINSKI FAKULTET BEOGRAD  
Kraljice Marije 16**

**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**

**BEOGRAD, 2010.**

<b>Vrsta tehničkog rešenja</b>	Novi eksperimentalni laboratorijski obradni sistem na bazi robota M81
<b>Autori tehničkog rešenja</b>	Prof. dr Dragan Milutinović, Prof. dr Miloš Glavonjić, Nikola Slavković dipl. ing. maš., Zoran Dimić dipl. ing. el., mr Branko Kokotović dipl. ing. maš., mr Saša Živanović dipl. ing. maš.
<b>Naziv tehničkog rešenja</b>	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
<b>Za koga je radeno tehničko rešenje</b>	Novi eksperimentalni laboratorijski obradni sisteme na bazi robota je razvijen u saradnji Mašinskog fakulteta u Beogradu i privrede u okviru projekta Razvoj tehnologija višeosne obrade složenih alata za potrebe domaće industrije TR-14034
<b>Ko koristi tehničko rešenje</b>	CPS Cad Professional Systems Bulevar dr Zorana Đindića 87 11070 Novi Beograd, Srbija
<b>Godina izrade tehničkog rešenja</b>	2009/2010
<b>Verifikacija rezultata</b>	Od strane recezenata: 1. Prof. dr Branislav Borovac, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad 2. Prof dr Miroslav Pilipović, Mašinski fakultet Beograd
<b>Ko je prihvatio tehničko rešenje</b>	Mašinski fakultet u Beogradu
<b>Primena rezultata</b>	Industrija-Proizvodnja delova većih gabarita od mekših materijala sa složenim površinama

## 1. OBLAST NA KOJU SE TEHNIČKO REŠENJE ODNOŠI

Tehničko rešenje pripada oblasti novih proizvodnih tehnologija odnosno najnovijoj generaciji rekonfigurabilnih i multifunkcionalnih višeosnih obradnih sistema na bazi robota.

## 2. TEHNIČKI PROBLEM

Osvajanje tehnologije višeosne obrade glodanjem složenih estetskih i funkcionalnih površina (ili tzv. skulpturnih površina odnosno free-form surfaces) je danas još uvek veoma izazovan istraživački zadatak [1]. Postojeća rešenja odnosno 5-osne mašine alatke i rekonfigurabilni sistemi bazirani na njima su razvijena za vrlo složene i odgovorne delove visoke klase tačnosti i kvaliteta obrade kao što su složeni alati, lopatice turbina, delovi u avio industriji i sl. Ovi sistemi se odlikuju veoma visokom cenom (550-1000 KE), visokom tačnošću i malim radnim prostorima. Međutim, potrebu za tehnologijom višeosne obrade glodanjem složenih estetskih i funkcionalnih površina kao i za rekonfigurabilnim multifunkcionalnim obradnim sistemima 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, ljudski 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 [2, 3, 4].

Rekonfigurabilni obradni sistem na bazi robota, koji se ovde predstavlja na jedinstven način rešava problem izrade ove klase delova. Sistem ima višestruko nižu cenu od postojećih 5-osnih mašina i obezbeđuje brzu izradu, na jednom mestu, složenih delova većih gabarita od mekših materijala niže i srednje klase tačnosti. Složene estetske i funkcionalne površine ovih delova mogu biti generisane raspoloživim CAD/CAM sistemima i metodama reverznog inženjerstva[5].

## 3. STANJE TEHNIKE

Stalni i sve brži razvoj novih proizvoda u mnogim industrijama uslovio je izuzetno brz i dinamičan razvoj u domenu proizvodnih tehnologija. Novi proizvodi pred proizvođače obradnih sistema postavljaju veoma teške i oprečne zahteve. Sa jedne strane se radi o složenoj geometriji delova u malim serijama ili čak u unikatnoj proizvodnji, dok se sa druge strane zahtevaju visoka tačnost, kvalitet obrade kao i visoka produktivnost. Istraživačke institucije i proizvođači u oblasti obradnih sistema na ove zahteve odgovaraju stalnim razvojem 5-osnih mašina alatki i rekonfigurabilnih i multifunkcionalnih obradnih sistema [1]. Međutim, kao što je poznato, savremene 5-osne 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 zadovoljavajuće karakteristike u pogledu nosivosti, tačnosti i dinamike. Poredеći 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. Programske jezice za robote su u kombinaciji sa obučavanjem pogodni za slučajeve gde se jednom napisan program koristi duže vremena. Međutim, za primenu robota u brzoj 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.

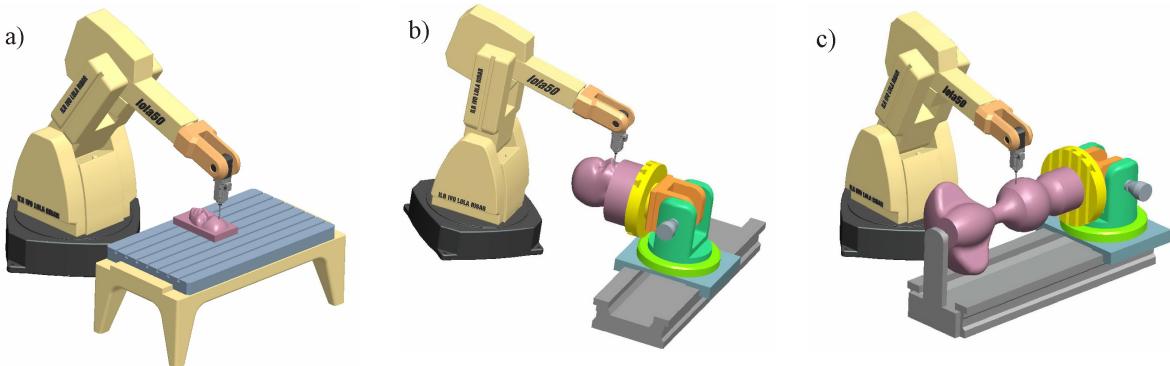
U cilju savladavanja ove ozbiljne barijere za primenu robota u višeosnoj obradi mekših delova velikih gabarita danas je pokrenuto nekoliko projekata [6] kako od velikih i renomiranih proizvođača robota (KUKA, Motoman, Fanuc, Staubli), tako i od proizvođača softvera (Delcam). Osnovni ciljevi ovih projekata su razvoj softvera za prevođenje G koda generisanih iz postojećih postprocesora za peteosne mašine alatke na njihove robotske programske jezike, razvoj specifičnih postprocesora za robotske jezike i sl. Međutim, svi ovi pristupi ne rešavaju suštinski problem a to je primenljivost postojećih CAD/CAM sistema i postojećih znanja u fabrikama iz oblasti tehnologije izrade složenih delova i CNC programiranja.

#### 4. SUŠTINA TEHNIČKOG REŠENJA

Rekonfigurabilni obradni sistem na bazi robota omogućava 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.

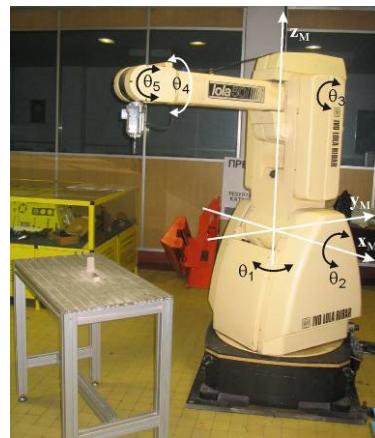
Osnovu koncepta sistema pokazanog na slici 1 čine:

- sečijalizovani 5-osni robot vertikalne zglobne konfiguracije velikog radnog prostora i krutosti sa integrисаном obradном jedinicом, slika 1a. Zbog svojih prednosti u pogledu krutosti i singulariteta ovakav robot funkcioniše kao 5-osna vertikalna glodalica (X, Y, Z, A, B) sa klaćenjem vretena [7],
- mogućnost rekonfigurisanja sistema preko dodatnih modularnih obrtnih i translatornih osa, slike 1b i 1c,
- upravljački sistem otvorene arhitekture u ovoj fazi razvijen na PC real-time Linux platformi i EMC2 (Enhanced Machine Control) softverskom sistemu [8, 9],
- mogućnost programiranja robota kao 5-osne glodalice u G-kodu,
- mogućnost korišćenja svih postojećih CAD/CAM sistema sa implementiranim 3-osnom i 5-osnom obradom za vertikalne 5-osne glodalice tipa (X, Y, Z, A, B),
- virtuelni obradni sistem na bazi robota razvijen u objektno orijentisanom jeziku-Python koji je implementiran u upravljačkom sistemu za simulaciju i verifikaciju programa.



Slika 1 Rekonfigurabilni obradni sistem za višeosnu obradu na bazi robota

Eksperimentalni laboratorijski prototip sistema u ovoj fazi je baziran na raspoloživom 6-osnom robotu domaće proizvodnje nosivosti 50kg, pri čemu je šesta osa blokirana, slika 2. Obradna jedinica snage 1,2 kW i  $5000\text{-}25000 \text{ min}^{-1}$  kao i set ravnih i poluloptastih glodala različitih prečnika i dužina su izvedeni modifikovanjem postojećih komercijalnih rešenja.



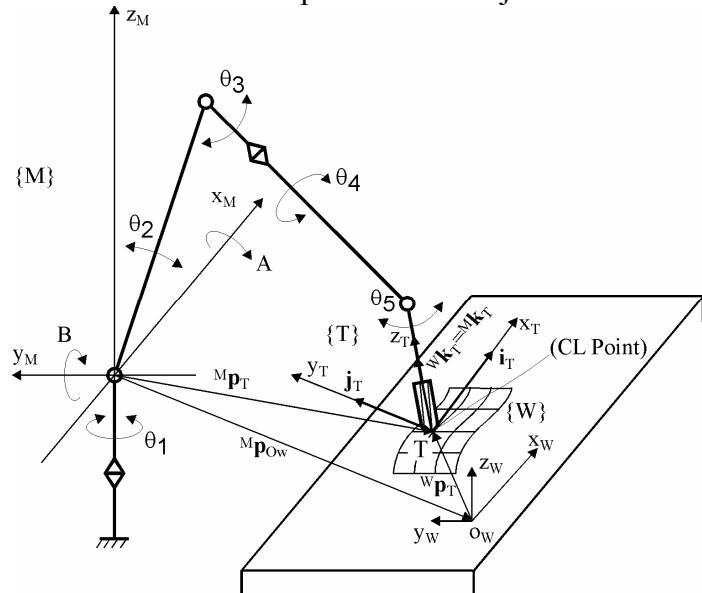
Slika 2 Eksperimentalni Laboratorijski 5-osni obradni sistem na bazi robota

## 5. DETALJAN OPIS TEHNIČKOG REŠENJA

Kao što je rečeno, laboratorijski odnosno eksperimentalni rekonfigurabilni obradni sistem je zasnovan na bazi postojećeg robota domaće proizvodnje. Osnovu tehničkog rešenja u ovoj fazi predstavljaju kinematičko modeliranje robota i na bazi toga razvijeni sistem upravljanja i programiranja u G-kodu što ga čini jedinstvenim i različitim u odnosu na postojeća rešenja.

### 5.1. Kinematičko modeliranje robota

S obzirom da 5-osni robot sa slike 1a odnosno 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 maštine  $\{M\}$ , alata  $\{T\}$  i obratka  $\{W\}$  po konvencijama za maštine alatke, slika 3, definisati unutrašnje i spoljašnje koordinate, rešiti direktni i inverzni kinematički problem i definisati radni prostor za slučajevе 3-osne i 5-osne obrade.



Slika 3 Pozicija i orientacija 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 i drugo, referentni koordinatni sistem  $\{M\}$  i koordinatni sistem alata  $\{T\}$  su pridruženi po konvenciji za 5-osne glodalice (X, Y, Z, A, B) sa njihanjem alata [10].

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

**Unutrašnje koordinate:** Vektor unutrašnjih koordinata je predstavljen kao  $\boldsymbol{\theta} = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4 \ \theta_5]^T$  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 orientacija 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

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

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

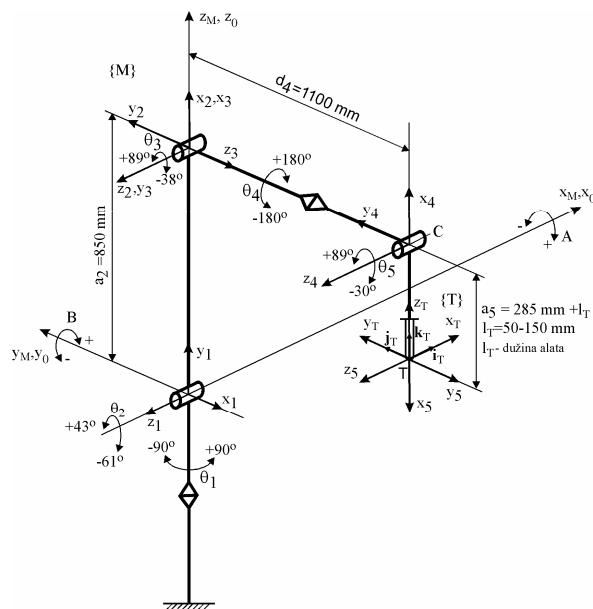
gde je  ${}^M \mathbf{p}_{Ow} = [x_{Ow} \ y_{Ow} \ z_{Ow}]^T$  vektor položaja koordinatnog sistema obratka  $\{W\}$  koji se određuje po uobičajenoj proceduri za CNC mašine alatke. U cilju kompletiranja vektora spoljašnjih koordinata, pored vektora položaja  ${}^M \mathbf{p}_T$  potrebno je odrediti i uglove orijentacije  $z_T$  ose alata A i B. S obzirom da robot ima 5 stepeni slobode promenom unutrašnjih koordinata  $\boldsymbol{\theta}$  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 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 uslovili specifičan način kinematičkog modeliranja.

Koristeći Denavit-Hartenbergov [11, 12, 13] 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  ${}_0x_iy_iz_i$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots, 5$ , referentni položaji zglobova kao i opsezi kretanja definišu parametre segmenata na osnovu kojih su formirane matrice  ${}^{i-1}_iA$ ,  $i = 1, 2, \dots, 5$ .

Uzimajući u obzir da se koordinatni sistem alata  $\{T\}$  u odnosu na koordinatni sistem vezan za vrh robota  ${}_5x_5y_5z_5$  može opisati homogenom transformacijom

$${}^5_T T = \left[ \begin{array}{ccc|c} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \quad (4)$$

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

$${}^M_T T = {}^0_1 A \cdot {}^1_2 A \cdot {}^2_3 A \cdot {}^3_4 A \cdot {}^4_5 A \cdot {}^5_T T = \left[ \begin{array}{ccc|c} {}^M_T R & & & {}^M \mathbf{p}_T \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{ccc|c} i_{Tx} & j_{Tx} & k_{Tx} & x_M \\ i_{Ty} & j_{Ty} & k_{Ty} & y_M \\ i_{Tz} & j_{Tz} & k_{Tz} & z_M \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \quad (5)$$

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  $\theta_1, \theta_2$  i  $\theta_3$  su rešeni geometrijski dok su uglovi  $\theta_4$  i  $\theta_5$  rešeni algebarski. Postupak rešavanja je ovde izostavljen kako zbog obimnosti tako i zbog ograničenosti cirkulacije rezultata. 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 razvijen je specifičan algoritam 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. U poglavlju tehničke karakteristike sistema su pokazani radni prostori za slučaj 3-osne i 5-osne obrade.

## 5.2. Sistem upravljanja i programiranja

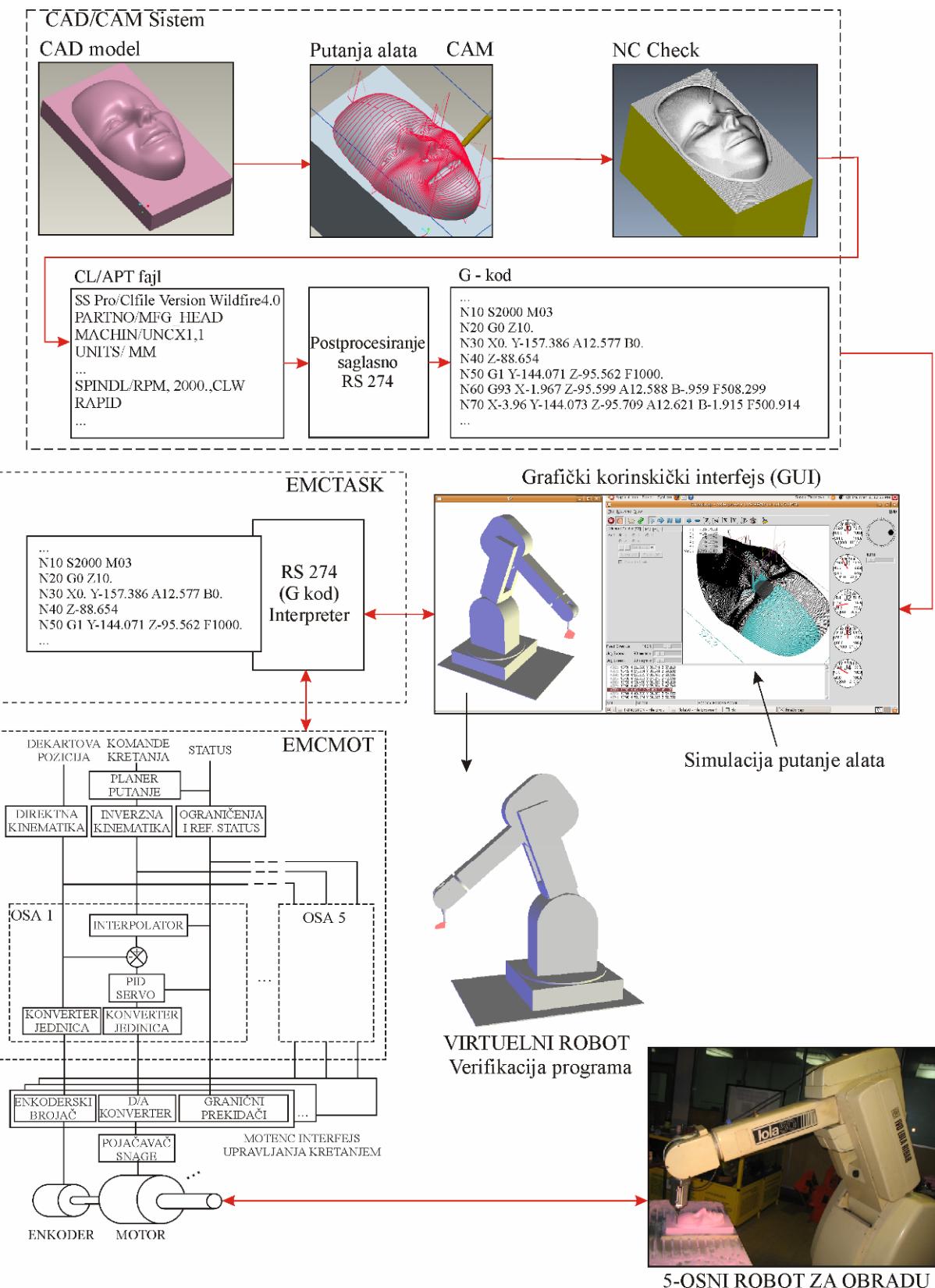
Polazeći od osnovne ideje da rekonfigurabilni obradni sistem za višeosnu obradu na bazi robota bude direktno primenljiv od programera CNC mašina alatki koristeći postojeće CAD/CAM sisteme i G-kod, razvijen je upravljački sistem otvorene arhitekture (OAC). Sistem je baziran na PC real-time Linux platformi i EMC2 softverskom sistemu za upravljanje mašina alatki i serijski i paralelnih mašina i robota [14]. Softverski sistem EMC2 je kreiran u NIST (National Institute of Standards and Technology) i predstavlja otvoreni softver (GPL-General Public License) [8, 9].

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 virtualni robot u EMC2 preko Python grafičkog okruženja. Kinematički modul, baziran na jednačinama direktne i inverzne kinematike je programiran u C jeziku i integriran 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 5 je pokazana uprošćena struktura sistema upravljanja i programiranja sa naznačenim osnovnim elementima EMC2 sistema.

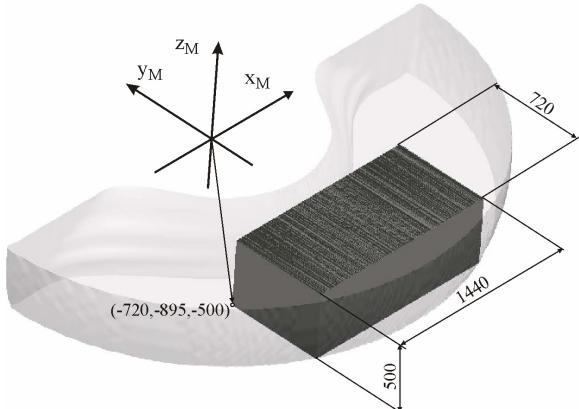
Kao što se vidi sa slike 5 programiranje je veoma konvencionalno pri čemu se koristi postprocesor za prevođenje CL-file u G-kod. U toku učitavanja G-koda EMC2 softver izvršava grafičku simulaciju putanje alata. Za inicijalizovan robot i postavljen obradak program se može pokrenuti. Pri startovanju programa instrukcije G-koda se izvršavaju u realnom vremenu i generišu upravljačke signale koji se mogu usmeriti na realni ili virtualni robot. Virtualni robot omogućava završnu verifikaciju G-koda slično postojećim sistemima za off-line programiranje robota. Nakon verifikacije program se može bezbedno izvršiti na realnom robotu.



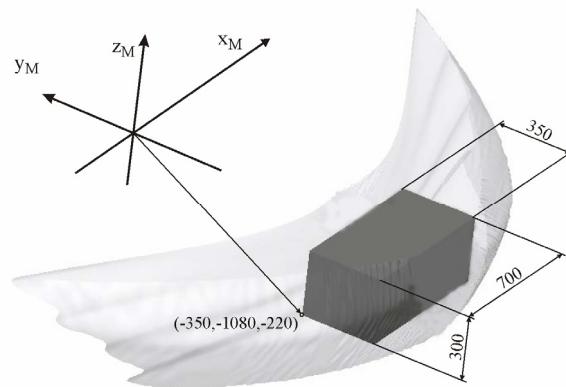
Slika 5 Struktura sistema upravljanja i programiranja

### 5.3. Tehničke karakteristike

- Broj simultano upravljenih osa:
  - o Na robotu 5 osa i
  - o 1 ili 2 dodatne rotacione i/ili translatorne ose
- Radni prostor:



Slika 6 Radni prostor za slučaj 3-osne obrade



Slika 7 Radni prostor za slučaj 5-osne obrade sa orientacijom alata u opsezima  
A  $[-30^\circ, 30^\circ]$  i B  $[-30^\circ, 30^\circ]$

- Nosivost robota: 50 kg
- Brzina glavnog kretanja: 5000-25000 o/min
- Snaga glavnog kretanja 1,2 kW
- Konturna brzina pomoćnih kretanja pri obradi: 2-5 m/min
- Dužina programa: neograničena
- CAD/CAM sistem: Pro/Engineer Wild fire 4
- Kinematička struktura mašine iz postprocesora: vertikalna globalica (X, Y, Z, A, B) sa njihanjem vretena
- Korekcija alata: implementirana u upravljačkom sistemu
- Mogućnost simulacije i verifikacije programa na virtuelnom robotu

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, 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.

## 5.4. Prikaz mogućnosti sistema na primerima Korisnika

Eksperimentalna verifikacija mogućnosti sistema je urađena na 4 test radna predmeta u saradnji sa korisnikom tehničkog rešenja. 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.

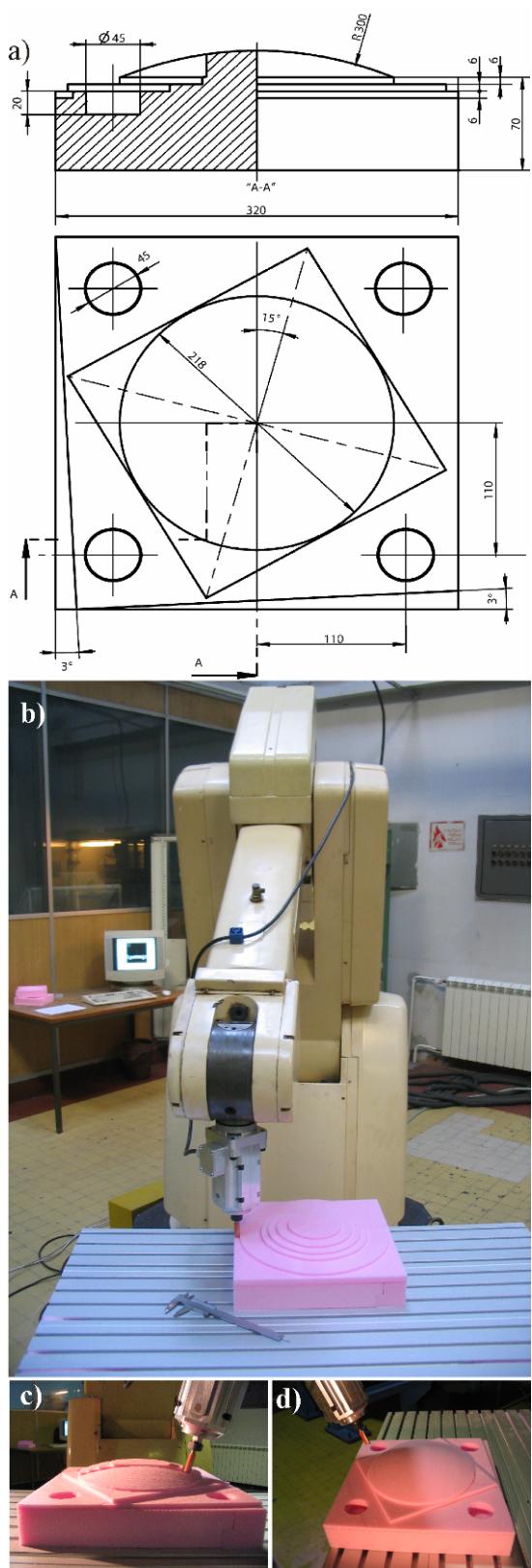
Za eksperimentalnu verifikaciju sistema upravljanja i programiranja je korišćen Pro/Engineer sa ciljem da se programiranje rekonfigurableg obradnog sistema za višeosnu obradu na bazi robota sproveđe na identičan način kao za 5-osne vertikalne glodalice (X, Y, Z, A, B) sa njihanjem vretena. Programer startuje sa CAD modelom radnog predmeta, na uobičajen način, pri čemu generiše putanje alata (CL-file) koja se verifikuje preko modula NC-Check, slika 5. Koristeći 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 5, 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  $d = 12\text{mm}$ .

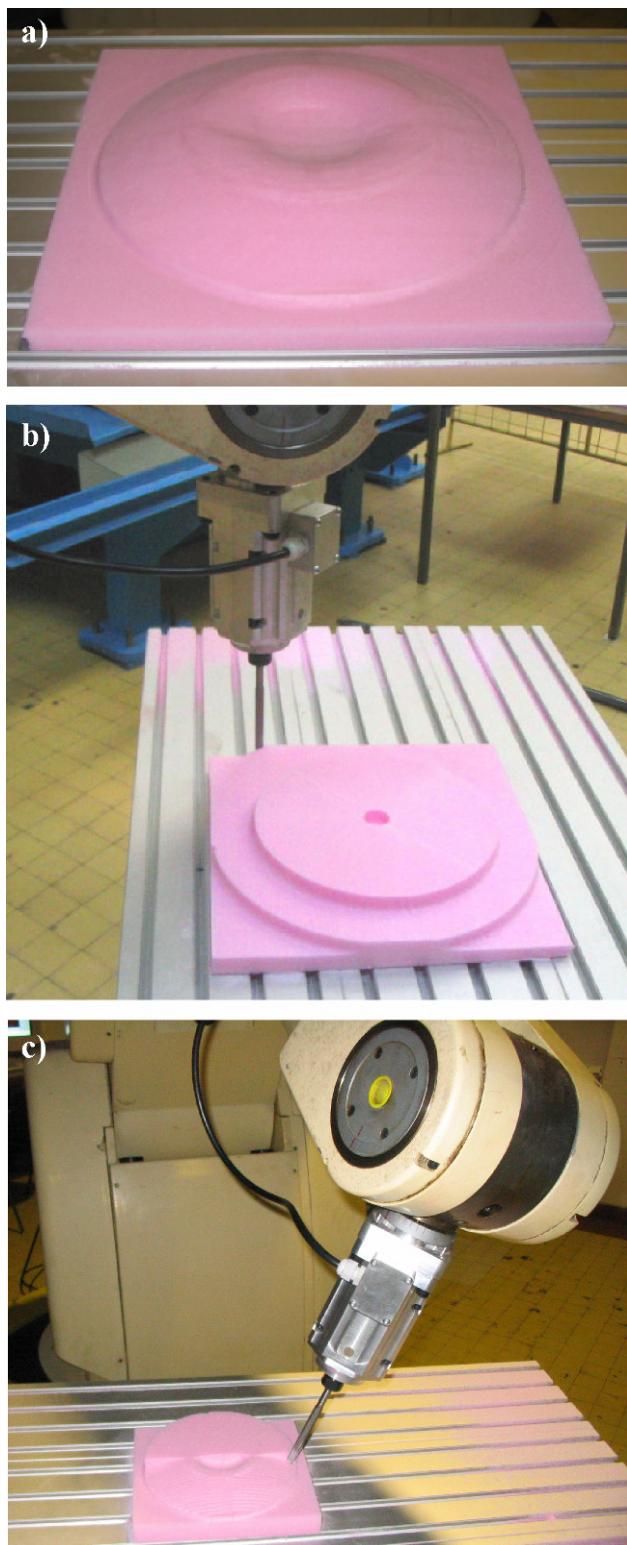
Na slici 9a je pokazan drugi test radni predmet sa složenom analitičkom površinom koja se sastoji od dve sferne površine povezane torusnom površinom. Slika 9b pokazuje 3-osnu predobradu dok je na slici 9c pokazana 5-osna završna obrada. U oba slučaja je korišćeno poluloptasto glodalo dužine 140/80 mm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

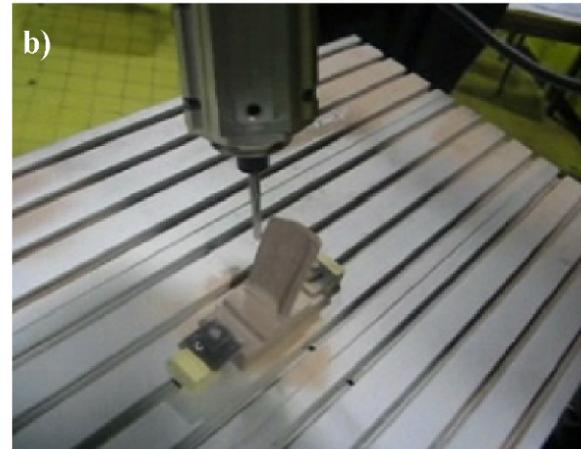
Na slici 11 je pokazana izrada lopatice od modela materijala visoke gustine na bazi poliuretana (Sika Block M560). Ovaj test radni predmet pokazuje da razvijeni sistem omogućava 5-osnu obradu najsloženijih delova. Slika 11a pokazuje prvi od četiri prolaza predobrade, slika 11b treći odnosno završni prolaz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



Slika 8 Obrada prvog test dela



Slika 9 Obrada drugog test dela



Slika 10 Obrada trećeg test dela

Slika 11 Obrada četvrtog test dela

## 6. ZAKLJUČAK

Razvijeni eksperimentalni rekonfigurabilni obradni sistem na bazi robota za višeosnu obradu složenih delova većih gabarita, od mekih materijala i niže i srednje klase tačnosti pokriva značajne oblasti primene za koje 5-osne mašine alatke nisu racionalno rešenje. Njegova prednost se ogleda u niskoj ceni, visokoj produktivnosti i programiranju u G-kodu što ga čini direktno primenljivim u pogonu, odnosno od korisnika koji poznaju CNC programiranje mašina alatki. Razvijeni eksperimentalni rekonfigurabilni obradni sistem na bazi robota je uključen u laboratorijske vežbe iz predmeta Mašine alatke, Industrijski roboti i Mašine alatke i roboti nove generacije na Katedri za proizvodno mašinstvo.

Pored verifikacije od strane korisnika koji ga koristi za svoje potrebe obrade složenih delova na Mašinskom fakultetu, postoji interes od vodećeg evropskog proizvođača robota za komercijalnu proizvodnju ovog novog obradnog sistema.

## 7. LITERATURA

1. Moriwaki T, Altintas Y (2008) Multi-Functional machine tool. CIRP Annals 57(2):736-749.
2. Vergeest JSM, Tangelder JWH (1996) Robot machines rapid prototype. The industrial robot 23(5):17-20.
3. Gerke W (2004) Milling robot with 3D vision system for styrofoam modeling. Proc IEEE International Conference on Mechatronics and Robotics part II, Aachen, pp 192-196.
4. 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.
5. Tanović Lj, Milutinović D, Glavonjić M, Živanović S, Slavković N, i drugi (2009) Razvoj tehnologija višeosne obrade složenih alata za potrebe domaće industrije TR-14034. Godišnji izveštaj (2008- 2009), Mašinski fakultet Beograd, Maj 2009.
6. DePree J, Gesswein C (2008) Robotic machining white paper project-Halcyon Development, <http://www.halcyondevelop.com>
7. 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.
8. <http://www.isd.mel.nist.gov/projects/rclib/>
9. <http://www.linuxcnc.org/>
10. ISO 841:2001 Industrial automation systems and integration -- Numerical control of machines - - Coordinate system and motion nomenclature.
11. Paul RP (1981) Robot Manipulators: mathematics, programming and control. The MIT Press.
12. Fu KS, Gonzalez RC, Lee CSG (1987) Robotics: control, sensing, vision, and intelligence. McGraw-Hill.
13. Craig JJ (1989) Introduction to robotics: mechanics and control, 2nd ed. Addison- Wesley.
14. Glavonjić M, Milutinović D, Živanović S, Dimić Z, Kvrgić V (2010) Desktop 3-axis parallel kinematic milling machine. Int J Adv Manuf Technol. 46(1-4):51-60.

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ -

БРОЈ: 52/1

ДАТУМ: 08.04.2010.

На основу захтева проф.др Драгана Милутиновића од 07.04.2010. и чл. 12.4 Статута Машинског факултета, Истраживачко-стручно веће Машинског факултета на седници одржаној дана 08.04.2010. године, донело је следећу

### ОДЛУКУ

Предлаже се Министарству за науку и технолошки развој да прихвати Техничко решење рађено у оквиру пројекта под насловом: **"Реконфигурабилни обрадни систем на бази робота за вишесну обраду делова већих габарита са сложеним естетским и функционалним површинама од мекших материјала средње и ниже класе тачности"**, ТР 14034, чији су аутори проф.др Драган Милутиновић, проф.др Милош Главоњић, дипл.инж. Никола Славковић, дипл.инж. Зоран Димић, mr Бранко Кокотовић и mr Саша Живановић.

За рецензенте Техничког решења именују се:

- др Бранислав Боровац, ред.проф., Факултет техничких наука, Нови Сад и
- др Мирослав Пилиповић, ред.проф.

Одлуку доставити: Министарству за науку и технолошки развој РС, ауторима, рецензентима, и архиви Факултета ради евидентије.



ПРОДЕКАН

ЗА НАУЧНОИСТРАЖИВАЧКУ ДЕЛАТНОСТ

проф.др Војкан Лучанин

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ
<b>-АРХИВА-</b>
Број: 32/3
Датум: 01 JUN 2010
Краљице Марије 16, 11126 Београд 35

Одлуком Истраживачко-стручног већа Машинског факултета у Београду бр 52/1 од 07.04.2010 године именовани смо за рецензенте техничког решења "Реконфигурабилни обрадни систем на бази робота за вишеосну обраду делова већих габарита са сложеним естетским и функционалним површинама од мекших материјала средње и ниже класе тачности" аутора: проф. др Драган Милутиновић, проф. др Милош Главоњић, Никола Славковић дипл. инж. маш., Зоран Димић дипл. инж. ел., мр Бранко Кокотовић дипл. инж. маш., мр Саша Живановић дипл. инж. маш. На основу предлога овог техничког решења подносимо следећи:

## ИЗВЕШТАЈ

Техничко решење "Реконфигурабилни обрадни систем на бази робота за вишеосну обраду делова већих габарита са сложеним естетским и функционалним површинама од мекших материјала средње и ниже класе тачности" аутора: проф. др Драган Милутиновић, проф. др Милош Главоњић, Никола Славковић дипл. инж. маш., Зоран Димић дипл. инж. ел., мр Бранко Кокотовић дипл. инж. маш., мр Саша Живановић дипл. инж. маш. описано је на 14 страница А4 формата, писаних са 12 pt сингл прореда, садржи 11 слика. Састављено је од шест поглавља и списка коришћене литературе. Наслови поглавља су:

1. Област на коју се техничко решење односи
2. Технички проблем
3. Ставе технике
4. Суштина техничког решења
5. Детаљан опис техничког решења, и
6. Закључак

Техничко решење припада области нових производних технологија односно најновијој генерацији реконфигурабилних и мултифункционалних вишеосних обрадних система на бази робота. Прихваћено је од стране фирме "CPS Cad Professional Systems" који га користи на Машинском факултету за своје потребе обраде сложених делова. Реконфигурабилни обрадни систем на бази робота је такође укључен и у лабораторијске вежбе из предмета Машине алатке, Индустриски роботи и Машине алатке и роботи нове генерације на Катедри за производно машинство.

Представљени реконфигурабилни обрадни систем на бази робота, на специфичан начин решава проблем вишеосне обраде глодањем сложених естетских и функционалних површина на деловима већих габарита од мекших материјала и ниже и средње класе тачности. Као што је познато за ову класу задатака није рационално користити скупе 5-осне машине алатке. За разлику од постојећих обрадних система на бази робота чије програмирање је компликовано и који користе транслаторе G-кода у роботске језике представљени систем се директно програмира у G-коду. Ово значи да може бити директно применљив у погону од CNC програмера машина алатки.

Поглавље ставе технике указује да 5-осне машине алатке и реконфигурабилни обрадни системи базирани на њима због високе цене и малог радног простора нису рационално решење за обраде глодањем сложених естетских и функционалних површина на деловима већих габарита од мекших материјала и ниже и средње класе тачности. Такође се указује да водећи произвођачи робота настоје да покрију овај простор обрадним системима на бази робота. Највећи недостатак постојећих обрадних система на бази робота је сложеност програмирања па су произвођачи робота и софтвера покренули неколико пројеката за развој софтвера за превођење G-кода у

роботске језике или за развој специфичних постпроцесора. Међутим, сви ови приступи не решавају суштински проблем а то је применљивост постојећих CAD/CAM система и постојећих знања у фабрикама из области технологије израде сложених делова и CNC програмирања.

У поглављу суштина техничког решења аутори наводе свој концепт који је базиран на: специјализованом 5-осном роботу који функционише као 5-осна вертикална глодалица (X, Y, Z, A, B) са њихањем вретена уз могућност реконфигурања система преко додатних обртних и/или трансляторних оса и на сопствено развијеном управљачком систему отворене архитектуре базираном на PC real-time Linux платформи и EMC2 (Enhanced Machine Control) софтверском систему. Систем омогућава коришћење свих постојећих CAD/CAM система и програмирање у G-коду уз могућност симулације и верификације програма на виртуелном роботу у Python графичком окружењу.

Детаљним описом техничког решења је обухваћено комплетно кинематичко моделирање са решеном директном и инверзном кинематиком и анализом радног простора као основама за развој управљачког система. Детаљно је описан систем управљања отворене архитектуре са програмирањем у G-коду и модулом виртуелног робота. Такође је описана и процедура програмирања од генерисања CL file преко конфигурања постпроцесора до генерисања G-кода. Приказане техничке карактеристике система говоре о високим перформансама иако се ради о експериментално лабораторијском прототипу. Могућности система су показане на врло сложеним примерима обраде дефинисаних са корисником техничког решења.

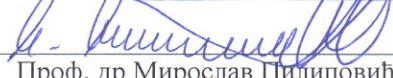
На крају, у оквиру закључка, се наводи да корисник обрађује сложене делове и алате на овом обрадном систему на машинском факултету као и то да се систем користи за лабораторијске вежбе из три предмета на Катедри за производно машинство. Посебно је важно истаћи да постоји и интерес водећег европског производијаца робота за производњу овог новог обрадног система.

## МИШЉЕЊЕ

Аутори техничког решења "Реконфигурабилни обрадни систем на бази робота за вишеосну обраду делова већих габарита са сложеним естетским и функционалним површинама од мекших материјала средње и ниже класе тачности" су јасно приказали и теоријски обрадили комплетну структуру техничког решења. Приказане могућности система на примерима обраде веома сложених делова за потребе корисника као и у извођењу лабораторијских вежби јасно указују да ово техничко решење представља нов допринос у развоју реконфигурабилних обрадних система на бази робота. Са задовољством предлажемо Истраживачко-стручном већу машинског факултета у Београду да експериментално лабораторијско техничко решење "Реконфигурабилни обрадни систем на бази робота за вишеосну обраду делова већих габарита са сложеним естетским и функционалним површинама од мекших материјала средње и ниже класе тачности" прихвати као ново техничко решење.



Проф. др Бранислав Боровач



Проф. др Мирослав Пилиповић

**PREDMET: 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**

Eksperimentalni laboratorijski 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 je razvijen i instalisan na Mašinskom fakultetu u Beogradu.

Ovo tehničko rešenje koje su razvili autori: prof. dr D. Milutinović, prof. dr M. Glavonjić, N. Slavković dipl. inž. maš., Z. Dimić dipl. inž. el., mr B. Kokotović dipl. inž. maš., mr S. Živanović dipl. inž. maš. naša firma permanentno koristi za izradu vrlo složenih delova i alata od mekših materijala. Iako je u pitanju eksperimentalni laboratorijski sistem veoma je efikasan jer se programiranje izvodi na tradicionalan način kao CNC 5-osna vertikalna glodalica (X, Y, Z, A, B) sa njihanjem vretena.

Za CPS- CAD Professional Systems,  
Dr Milan Bojanović, dipl.inž.  
direktor



Beograd, 26. Mart 2010.g.



УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ  
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ -  
БРОЈ: 52/2  
ДАТУМ: 22.04.2010.

На основу захтева проф.др Драгана Милутиновића од 07.04.2010. године и чл. 12.4. Статута Машинског факултета, Истраживачко-стручно веће Машинског факултета на седници одржаној дана 22.04.2010. године, донело је следећу

### ОДЛУКУ

Прихвата се Техничко решење рађено у оквиру пројекта ТР 14034, под насловом: „Реконфигурабилни обрадни систем на бази робота за вишеснлу обраду делова већих габарита са сложеним естетским и функционалним површинама од мекших материјала средње и ниже класе тачности“, чији су аутори проф.др Драган Милутиновић, проф.др Милош Главоњић, дипл.инж. Никола Славковић, дипл.инж. Зоран Димић, mr Бранко Кокотовић и mr Саша Живановић, а позитивну рецензију поднели: др Бранислав Боровац, ред.проф. Факултет техничких наука, Нови Сад и проф.др Мирослав Пилиповић.

Одлуку доставити: Министарству за науку и технолошки развој РС, ауторима, рецензентима и архиви факултета ради евиденције.

