



Milutinović D., Glavonjić M., Tanović Lj., Bojanić P., Puzović R., Živanović S., Kokotović B., Popović M., Slavković N., Mladenović G.¹⁾

REZULTATI ISTRAŽIVANJA I RAZVOJA NOVE GENERACIJE OBRADNIH SISTEMA²⁾

Rezime

U radu je prikazan deo rezultata istraživanja u oblasti nove generacije obradnih sistema. Prikazom su obuhvaćeni razvijeni prototipovi mašina alatki i robota sa paralelnom kinematikom, kao i rekonfigurabilni obradni sistem za višeosnu obradu na bazi robota. Prikazani rezultati predstavljaju osnovu za saradnju sa domaćom industrijom, učešće u međunarodnim projektima i dalja istraživanja. Razvijeni sistemi takođe čine i resurs za laboratorijski rad studenata proizvodnog mašinstva na svim nivoima studija.

Ključne reči: mašine alatke, roboti, upravljanje i programiranje, ispitivanje mašina alatki

1. UVOD

Obradni sistemi nove generacije čine osnovu razvoja proizvodnih tehnologija u svim granama industrije. Ključna istraživanja u ovim oblastima su danas fokusirana na multifunkcionalne i rekonfigurabilne mašine alatke i robote, upravljačke sisteme otvorene arhitekture, nove metode programiranja, razvoj novih procesa i alata kao i široku primenu CAD/CAM sistema.

Polazeći od ovih konstatacija Katedra je u prethodnom periodu pokretala istraživanja u oblasti razvoja nove generacije obradnih sistema kroz:

- četiri projekta tehnološkog razvoja, od kojih je jedan u toku,
- jedan inovacioni i
- jedan EUREKA! projekat.

Cilj ovih istraživanja je unapređenje saradnje sa domaćom industrijom, učešća na međunarodnim projektima i obezbeđenja resursa za obrazovanje studenata proizvodnog mašinstva na svim nivoima studija i kao materijalne baze za dalja istraživanja u ovim oblastima.

Deo ključnih rezultata koji će biti prikazan u ovom radu obuhvata:

- razvijene prototipove mašina alatki i robota sa paralelnom kinematikom,
- razvoj rekonfigurabilnog obradnog sistema za višeosnu obradu na bazi robota,
- razvoj upravljačkog sistema otvorene arhitekture, i
- ispitivanje ovih obradnih sistema.

Iz ovih istraživanja su proistekle doktorske disertacije [45,46] i magistarske teze [44], kao i danas potrebne reprezentativne reference kao što su radovi u međunarodnim časopisima sa SCI liste [1-7], veći broj priznatih domaćih i međunarodnih patenata [50-56], radovi na međunarodnim [13-21] i domaćim [22-43] konferencijama, tehnička rešenja [47-49], kao i nagrade i priznanja od domaćih institucija i organizacija.

2. MAŠINE SA PARALELNOU KINEMATIKOM

Kada se govori o mašinama alatkama i industrijskim robotima nove generacije, uglavnom se misli na promene koncepcija i usavršavanje osnovnih podsistema. Mašine sa paralelnom kinematikom ili paralelne mašine, o kojima je ovde reč, su mašine alatke i industrijski roboti. Paralelene mašine alatke i paralelni roboti

¹⁾ Prof. dr Dragan Milutinović (dmilutinovic@mas.bg.ac.rs), prof. dr Miloš Glavonjić (mglavonjic@mas.bg.ac.rs), prof. dr Ljubodrag Tanović (ltanovic@mas.bg.ac.rs), prof. dr Pavao Bojanić (pbojanic@mas.bg.ac.rs), prof. dr Radovan Puzović (rpuzovic@mas.bg.ac.rs), doc. dr Saša Živanović (szivanovic@mas.bg.ac.rs), mr Branko Kokotović (bkokotovic@mas.bg.ac.rs), mr Mihajlo Popović (mpopovic@mas.bg.ac.rs), Nikola Slavković (nslavkovic@mas.bg.ac.rs), Goran Mladenović (gmladenovic@mas.bg.ac.rs), Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Kraljice Marije 16, 11120 Beograd

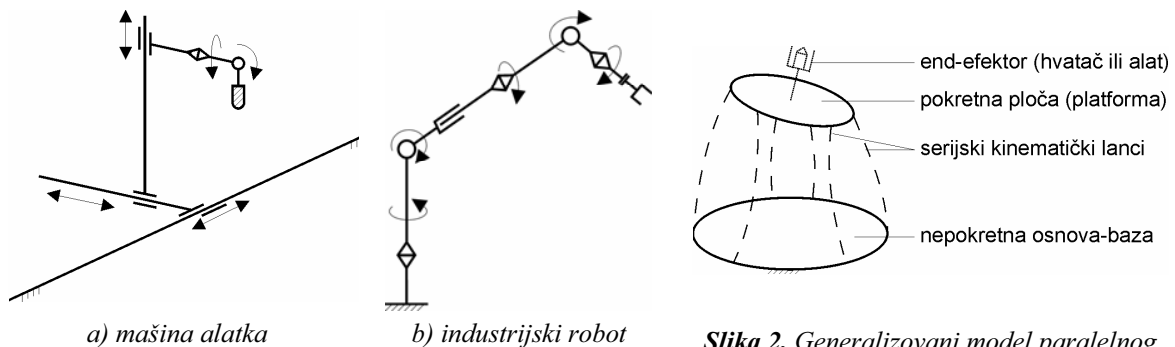
²⁾ Ovaj rad je nastao u okviru projekata, koji su podržani od strane Ministarstvo prosvete i nauke, Vlade Republike Srbije.

su bazirani na mehanizmima sa paralelnom kinematikom i danas se mogu eksplicitno prepoznati i smatrati mašinama nove generacije. Pojava mašina alatki i robota sa paralelnom kinematikom ranih devedesetih odnosno osamdesetih godina prošlog veka se smatra za najznačajniji pomak u ovim oblastima od pojave numeričkog upravljanja.

Zbog specifičnosti paralelnih mehanizama i mašina alatki i robota baziranih na njima istraživanja u ovoj oblasti su i dalje veoma intenzivna i bazirana su na visokom nivou kooperacije univerziteta, istraživačkih instituta i industrije. Ova istraživanja se odnose na sintezu novih mehanizama, modeliranje, upravljanje, projektovanje, izradu i korišćenje mašina alatki i robota baziranih na njima.

2.1 Mehanizmi sa paralelnom kinematikom

Manipulatori odnosno mehanizmi tradicionalnih industrijskih robota i mašina alatki su izvedeni kao serijski mehanizmi, slika 1. I pored impresivnih rezultata u razvoju pojedinih podsistema mašina alatki i robota opšta je konstatacija da su iscrpljene granice mogućnosti serijskih struktura. Napredak u prevazilaženju suštinskih nedostataka serijskih mehanizama odnosno manipulatora je ostvaren napuštanjem koncepta "ljudske ruke" odnosno ideje jednog, glavnog, kinematičkog lanca. Novi koncept je počeo od generalizacije koncepta zatvorenih petlji (od serijskih kinematičkih lanaca) i korišćenja više njih paralelno za vezu osnove i end-efektora, slika 2. Zbog ovakve prirode ovi mehanizmi se nazivaju mehanizmi sa paralelnom kinematikom ili paralelni mehanizmi.



Slika 1. Serijski mehanizmi mašina alatki i robota

Slika 2. Generalizovani model paralelnog mehanizma

Tip strukture paralelnog mehanizma je poznat već dugo vremena. Još je matematičar Koši proučavao krutost zglobnog oktaedra (1813). Za prvi paralelni mehanizam se smatra patentirano rešenje manipulatora iz 1942. godine, W. Polarda, zatim Gočov mehanizam iz 1947. i Stjuartov iz 1965. godine [57]. Zbog široke primene od simulatora leta do mašina alatki i robota, paralelni mehanizmi se danas pojavljuju u vrlo velikom broju varijeteta, kako po topologiji, tako i po broju stepeni slobode.

Značaj teorijskih i primenjenih istraživanja vezanih za razvoj mašina alatki i robota na bazi mehanizama sa paralelnom kinematikom se ogleda u čitavom nizu specifičnosti i suprotnosti ovih mehanizama u odnosu na serijske kao što su:

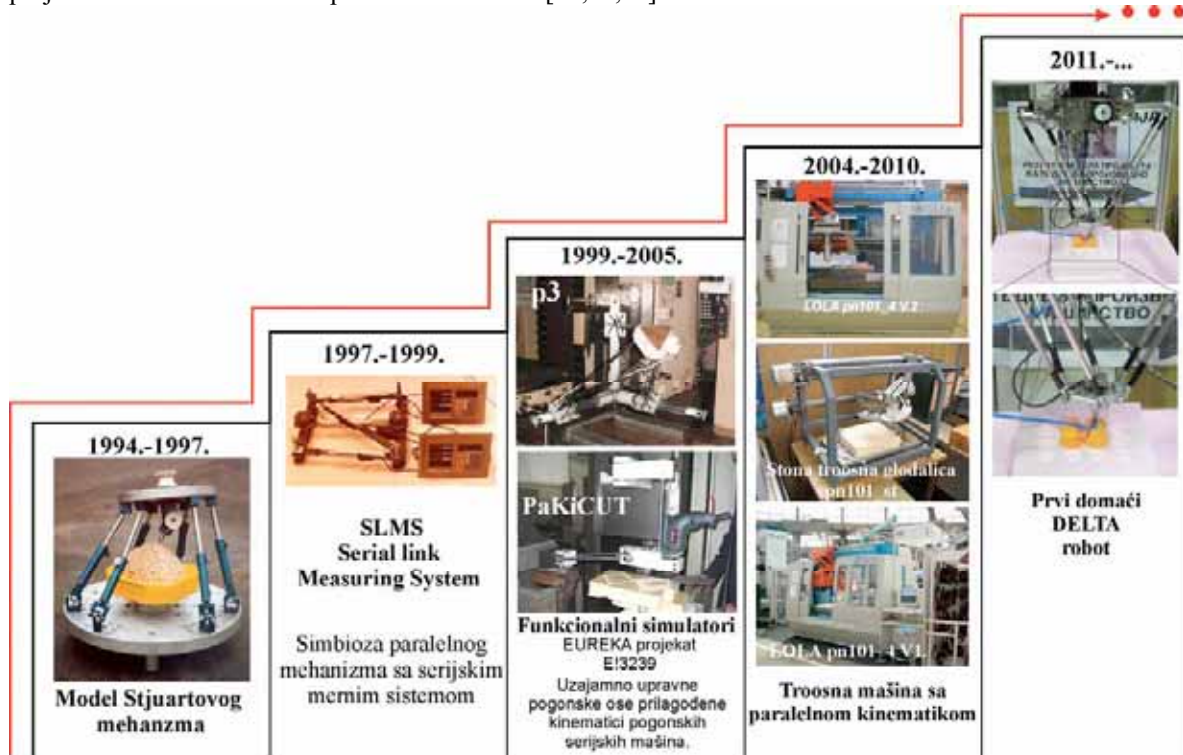
- relativno jednostavno rešavanje IKP,
- veoma komplikovano rešavanje DKP koji u opštem slučaju, ali i u mnogim posebnim nije rešiv u analitičkoj formi,
- složenost analize singulariteta i oblika i dimenzija radnog prostora,
- komplikovano dinamičko modeliranje,
- složeno upravljanje,
- neophodnost i kompleksnost kalibracije i kompenzacije.

Sa druge strane, mašine alatke i roboti sa paralelnom kinematikom odlikuju velike brzine zbog malih pokretnih masa, velika krutost, modularnost i rekonfigurabilnost itd.

2.2 Rezultati istraživanja

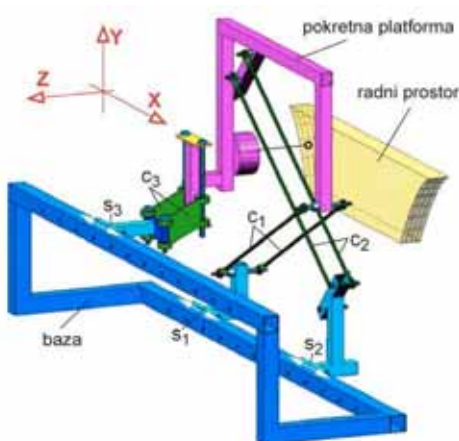
Istraživanja u oblasti mašina alatki i robota sa paralelnom kinematikom na Katedri za proizvodno mašinstvo su započela neposredno pre pojave prvih komercijalnih paralelnih mašina na IMTS, Čikago 1994. godine (Variax – Giddings& Lewis i Hexapod - Ingresol). Prvi radovi iz ove oblasti kod nas su se pojavili 1996. godine [22,23]. Ovo su bila prva istraživanja u ovoj oblasti u našoj zemlji i po obimnom i dugoročnom

programu su imala za cilj razvoj nove generacije domaćih mašina alatki i robota. U istraživanja su na samom startu uključene i domaće fabrike na izradi modela, simulatora i konačno, prvih industrijskih prototipova mašina alatki i robota [8, 13, 14, 25, 26, 44], slika 3. Takođe, ostvarena je i međunarodna saradnja u okviru projekata EUREKA! 3239 sa partnerom iz Grčke [15,33,34].



Slika 3. Etape istraživanja paralelnih mašina

Ovim programom istraživanja su obuhvaćena teorijska istraživanja u oblasti siteze novih mehanizama, kinematike, dinamike, metoda kalibracije i kompenzacije i upravljanja kao i primenjena istraživanja vezana za projektovanje, gradnju, ispitivanje primenu i programiranje paralelnih mašina alatki i robota. Takođe je značajno pomenuti da je ova problematika uključena i u proces nastave na svim nivoima studija kroz nekoliko predmeta iz oblasti mašina alatki, robota, CAD/CAM-a i alata što je rezultiralo većim brojem diplomskih, magistarskih i doktorskih radova od kojih su i neki u toku.



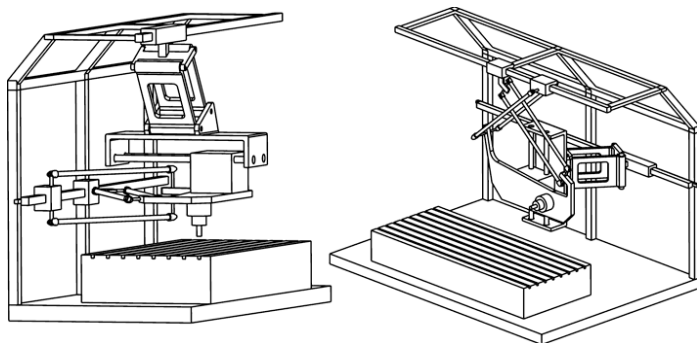
Slika 4. CAD model inicijalne verzije mehanizma[1]

2.2.1 Kratak prikaz troosnih glodalica sa paralelnom kinematikom

U cilju razvoja troosne glodalice sa dugačkom X osom koja zadovoljava uslove savremene proizvodnje razvijen je i patentiran [56] novi troosni mehanizam sa paralelnom kinematikom.

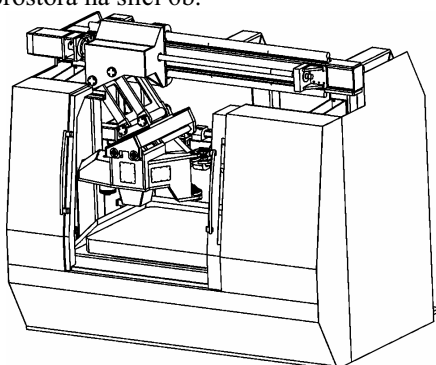
Polazeći od činjenice da su oblik i dimenzije radnog prostora među najvećim nedostacima mašina sa paralelnom kinematikom razvijen je i patentiran domaći prostorni troosni paralelni mehanizam za horizontalne i vertikalne glodalice, slika 4.

U poređenju sa sličnim mehanizmima sa paralelnim vodičama i konstantnim dužinama spojki, ovaj mehanizam ima nekoliko prednosti: pravilan radni prostor, što je karakteristika serijskih mašina, veću krutost po prirodni koncepcije mehanizma sa ukrštenim spojkama i vrlo dobar odnos sila i brzina u celom radnom prostoru. Varijantnost strukture mehanizma omogućava široku oblast primene za vertikalne i horizontalne troosne glodalice, slika 5, odnosno obradne centre, kao i za hibridne paralelno-serijske petoosne mašine zbog povoljnog oblika i dimenzija pokretne platforme.

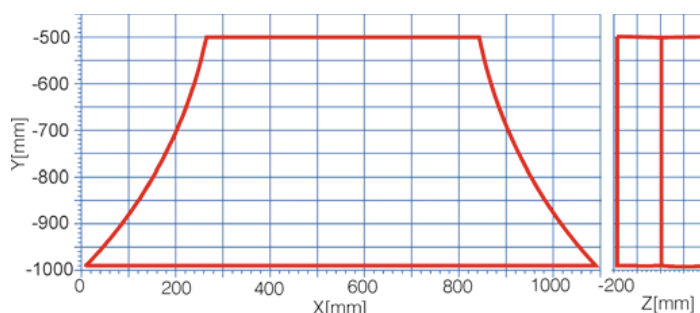


Slika 5. Koncepti vertikalne i horizontalne glodalice sa paralelnom kinematikom [1]

CAD model razvijenog prototipa troosne vertikalne glodalice pokazan je na slici 6a, oblik i mere radnog prostora na slici 6b.



a) CAD model industrijskog prototipa



b) radni prostor

Slika 6. CAD model prototipa sa oblikom i dimenzijama radnog prostora[1]

Na slici 7a prikazana je prva verzija razvijenog prototipa koji je izrađen u tadašnjem LOLA Sistemu AD Beograd 2004. godine. Saradnja na ovom programu traje i danas sa LOLA Institutom iz Beograda. Na slici 7b je pokazana nova verzija koja je instalisana na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Razvijeni prototip je naišao na izuzetan prijem u međunarodnoj naučnoj i stručnoj javnosti i osvojio je veći broj nagrada i priznanja. Razvijeni pristupi modeliranja pored efikasnih upravljačkih algoritama omogućavaju i razvoj novih algoritama za kalibraciju i kompenzaciju.



a) LOLA pn101_4 V.1



b) LOLA pn101_4 V.2

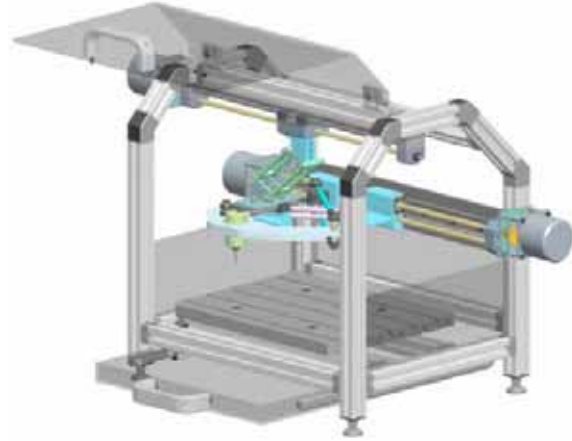
Slika 7. Verzije razvijenog industrijskog prototipa LOLA pn101_4

Polazeći od potencijalnih potreba za edukacijom u oblasti CNC programiranja na mašinskim fakultetima, visokim strukovnim i srednjim mašinskim školama u zemlji i okruženju razvijen je i prototip

edukacione stone troosne glodalice sa paralelnom kinematikom [5,12, 20, 35, 38, 46], slika 8a, čija je već projektovana komercijalna varijanta prikazana na slici 8b. Osnovna ideja ovog projekta koji je u toku je da to bude mašina veoma niske cene, jednostavna za rukovanje i održavanje, bezbedna i da omogući studentima i učenicima da pojedinačno uvežbavaju sve korake u programiranju, verifikaciji programa i rukovanju mašinom.



a) prvi prototip



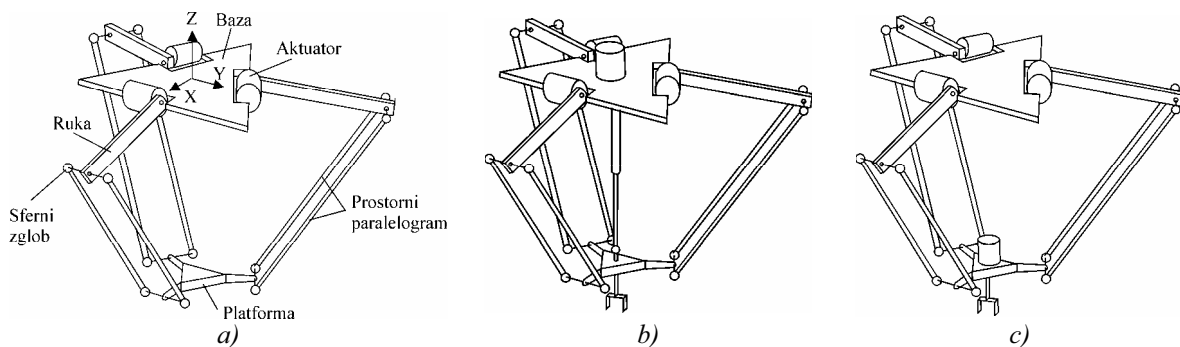
b) CAD model projektovanog komercijalnog prototipa

Slika 8. Edukaciona stona troosna glodalica sa paralelnom kinematikom [5]

2.2.2 Kratak prikaz razvijenog DELTA robota

DELTA robot je osnova savremenih linija i sistema za manipulaciju i pakovanje proizvoda prehrambene, konditorske i farmaceutske industrije. Takođe ima primenu i u montaži u mikroelektronici. Zahtevani standardi produktivnosti, pouzdanosti i higijene u ovim industrijama potiskuju postojeće serijske robote iz procesa proizvodnje.

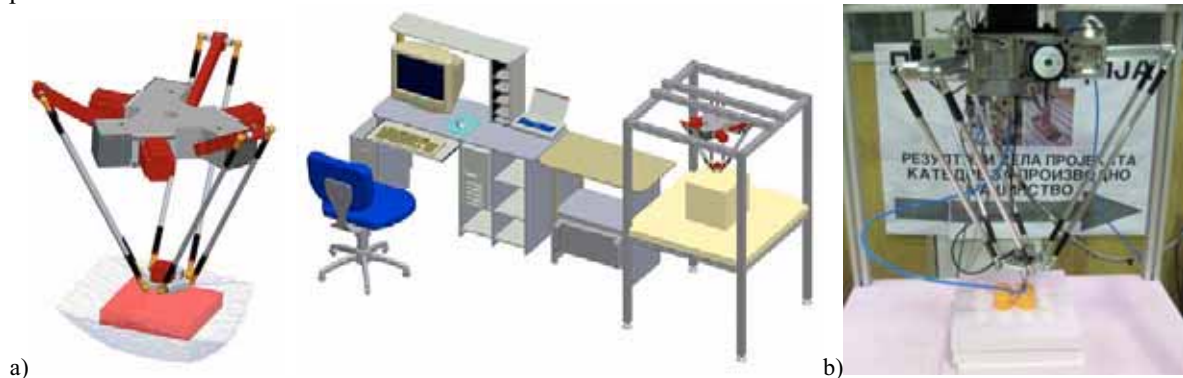
DELTA paralelni robot [58] razvijen je sa idejom da nema potrebe koristiti robote sa motorima od po nekoliko kilovata za manipulaciju delovima mase od nekoliko grama. Originalni shematski prikaz DELTA robota pokazan je na slici 9. Ovakva, na prvi pogled kompleksna struktura mehanizma sa većim brojem segmenata, slika 9a, omogućava da pokretna ploča ima samo 3 stepena slobode. Četvrti stepen slobode, odnosno orijentacija, obezbeđuje se aktuatorom na nepokretnoj ploči, čiji se moment prenosi pomoću dva kardanska zgloba i teleskopskog vratila, slika 9b, ili pomoću aktuatora na unutrašnjoj strani platforme, slika 9c. Sa aspekta kinematičkih mogućnosti DELTA robot može biti posmatran kao SCARA robot, s tim što mu je odnos nosivost/masa višestruko veći kao i brzine nego kod SCARA robota (brzine vrha preko 10 m/s uz ubrzanja i iznad 10g).



Slika 9. DELTA mehanizam sa obrtnim zglobovima

Na složenost modeliranja, projektovanja i izrade ukazuje činjenica da mali broj proizvođača robota uključuje DELTA robot u svoj proizvodni program. S obzirom na potrebe za ovakvim robotima i u domaćoj industriji kao i za potrebe nastave i istraživanja pokrenut je projekat razvoja domaćeg DELTA robota koji je u toku. Na slici 10a je pokazan CAD model DELTA robota sa radnim prostorom i okruženjem, dok je na

slici 10b pokazan prototip prvog domaćeg DELTA robota koji je kompletno razvijen i izrađen na Katedri za proizvodno mašinstvo.

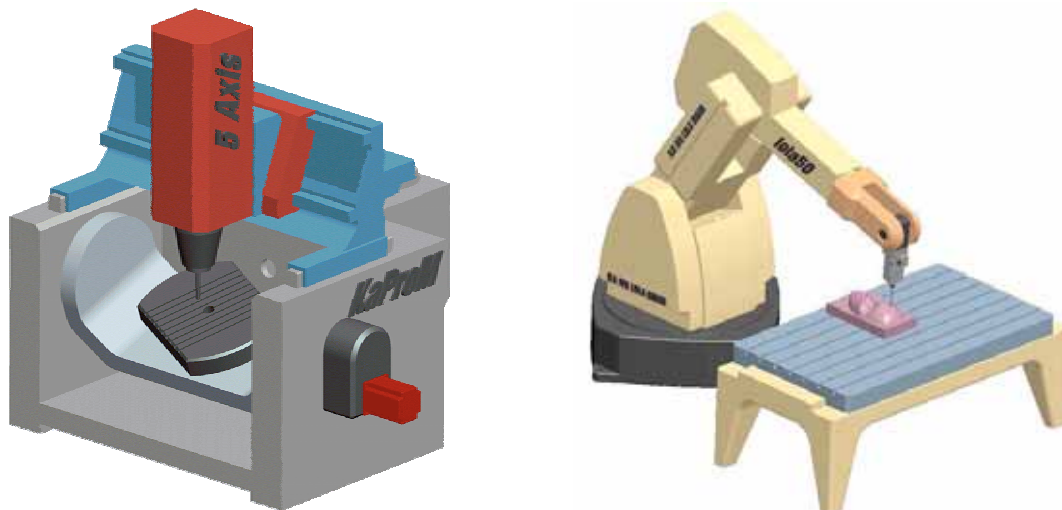


Slika 10. Domaći DELTA robot

Osnovu za projektovanje, upravljanje i izradu DELTA robota sa izuzetnim karakteristikama čini razvoj kinematičkih modela koji su veoma složeni. Naša dosadašnja istraživanja su rezultirala razvojem kinematičkog modela DELTA robota na bazi minimalnog broja parametara, što ga čini efikasnijim od postojećih pristupa ne samo u pogledu upravljanja već i u pogledu efikasnih algoritama za kalibraciju i kompenzaciju čiji je razvoj u toku.

3. MAŠINE SA SERIJSKOM KINEMATIKOM

U oblasti serijske kinematike istraživanja obuhvataju razvoj rekonfigurabilnih i multifunkcionalnih mašina alatki i robota za višeosnu obradu glodanjem, slika 11. Osvajanje tehnologije višeosne obrade glodanjem složenih estetskih i funkcionalnih površina je danas još uvek izazovan istraživački zadatak kako u pogledu razvoja novih mašina alatki i robota tako i u razvoju sistema za upravljanje i programiranje. Dalje će se pokazati samo rezultati istraživanja i razvoja rekonfigurabilnog obradnog sistema za višeosnu obradu na bazi robota.



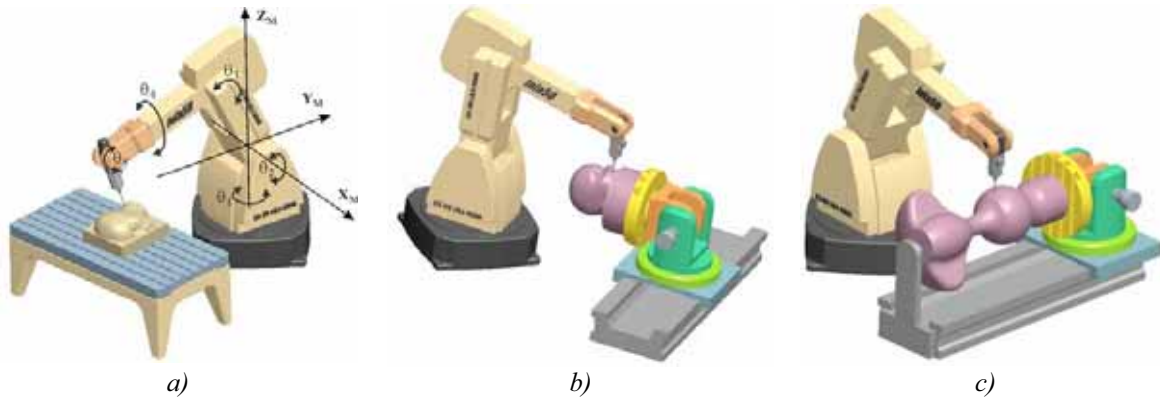
a) koncept petoosne mašine alatke

b) koncept petoosnog robota za obradu

Slika 11. Koncepti petoosnih serijskih mašina za obradu glodanjem

3.1 Rekonfigurabilni multifunkcionalni obradni sistem za višeosnu obradu na bazi robota

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 rekonfigurabilnog obradnog sistema na bazi robota za višeosnu obradu glodanjem delova većih gabarita od mekših materijala, niže klase tačnosti i sa složenim estetskim i funkcionalnim površinama, slika 12. Osnovu ovog koncepta čine:



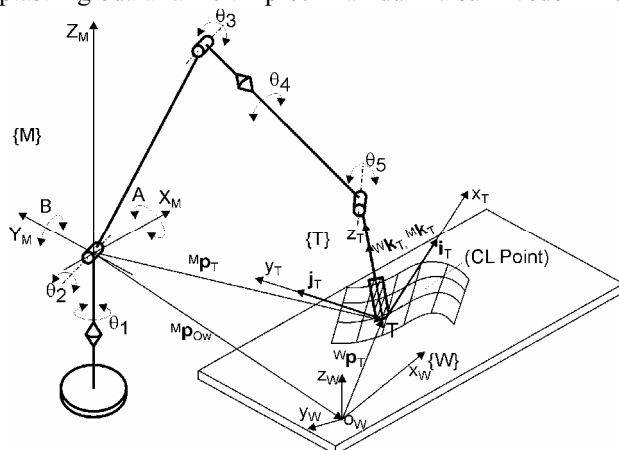
Slika 12. Rekonfigurabilni obradni sistem za višeosnu obradu na bazi robota

- secijalizovani 5-osni robot vertikalne zglobne konfiguracije velikog radnog prostora i krutosti sa integrisanom obradnom jedinicom, slika 12a. Zbog svojih prednosti u pogledu krutosti i singulariteta ovakav robot funkcioniše kao 5-osna vertikalna glodalica (X, Y, Z, A, B) sa naginjanjem alata,
- mogućnost rekonfigurisanja sistema preko dodatnih modularnih obrtnih i translatorskih osa, slike 12b i 12c,
- upravljački sistem otvorene arhitekture u ovoj fazi razvijen na PC real-time Linux platformi i EMC2 (Enhanced Machine Control) [59-61] softverskom sistemu,
- mogućnost programiranja robota kao 5-osne glodalice u G-kodu,
- mogućnost korišćenja svih postojećih CAD/CAM sistema sa implementiranom 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 13. Petoosni obradni sistem na bazi robota

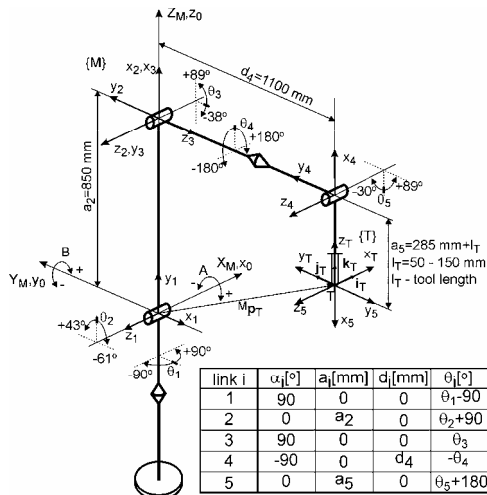
U ovoj fazi sistem je baziran na raspoloživom 6-osnom robotu domaće proizvodnje nosivosti 50kg, pri čemu je šesta osa blokirana, slika 13. Obradna jedinica snage 1,2 kW i 5000-25000 min⁻¹ kao i set ravnih i loptastih glodala različitih prečnika i dužina su izvedeni modifikovanjem postojećih komercijalnih rešenja.



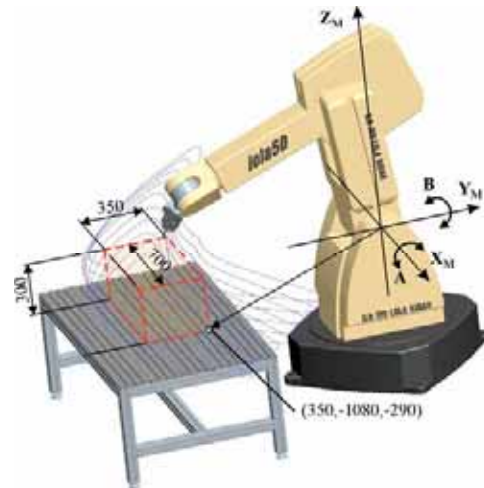
Slika 14. Pozicija i orijentacija alata u referentnom koordinatnom sistemu $\{M\}$ i koordinatnom sistemu obratka $\{W\}$

radni prostor za slučajeve 3-osne i 5-osne obrade, slika 16.

S obzirom da 5-osni robot sa slike 12a, odnosno slike 13, 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 14, i definisati unutrašnje i spoljašnje koordinate. Koristeći Denavit-Hartenbergov pristup (D-H) [62-64] formiran je kinematički model robota, slika 15, za koji je rešen direktni i inverzni kinematički problem i definisan



Slika 15. Kinematički model robota i D-H kinematički parametri



Slika 16. Radni prostor za slučaj 5-osne obrade sa orijentacijom alata u opsezima $A[-30^\circ, 30^\circ]$ i $B[-30^\circ, 30^\circ]$

Robote za obradu glodanjem delova od mekih materijala i niže klase tačnosti u poređenju sa 5-oosnim mašinama alatka, odlikuje veći radni prostor i cena koja je niža za red veličine. 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 brzoi izradi prototipova ili u višeosnoj obradi programiranje robota programskim jezicima je veoma složeno i dugotrajno. U cilju savladavanja ove ozbiljne barijere za primenu robota u višeosnoj obradi, pokrenuto je nekoliko projekata od strane vodećih proizvođača robota i proizvođača CAD/CAM softvera na razvoju sistema upravljanja i programiranja. Razvijena se različita softverska rešenja kao što su specijalizovani postprocesori, translatori G koda u cilju da programiranje učine efikasnim kao što je to slučaj sa CNC mašinama alatka.

Upravljački sistem razvijenog prototipa rekonfigurabilnog multifunkcionalnog obradnog sistema za višeosnu obradu na bazi robota, slika 13, je otvorene arhitekture na PC real-time Linux platformi i EMC2 softverskom sistemu. Programira se kao 5-osna glodalica u G-kodu i ima mogućnost korišćenja svih postojećih CAD/CAM sistema sa implementiranom 3-osnom i 5-osnom obradom za vertikalne 5-osne glodalice tipa (X, Y, Z, A, B). Razvijen je i virtuelni obradni sistem na bazi robota u objektno orijentisanom jeziku-Python koji je implementiran u upravljačkom sistemu za simulaciju i verifikaciju programa.

4. SISTEM UPRAVLJANJA OTVORENE ARHITEKTURE

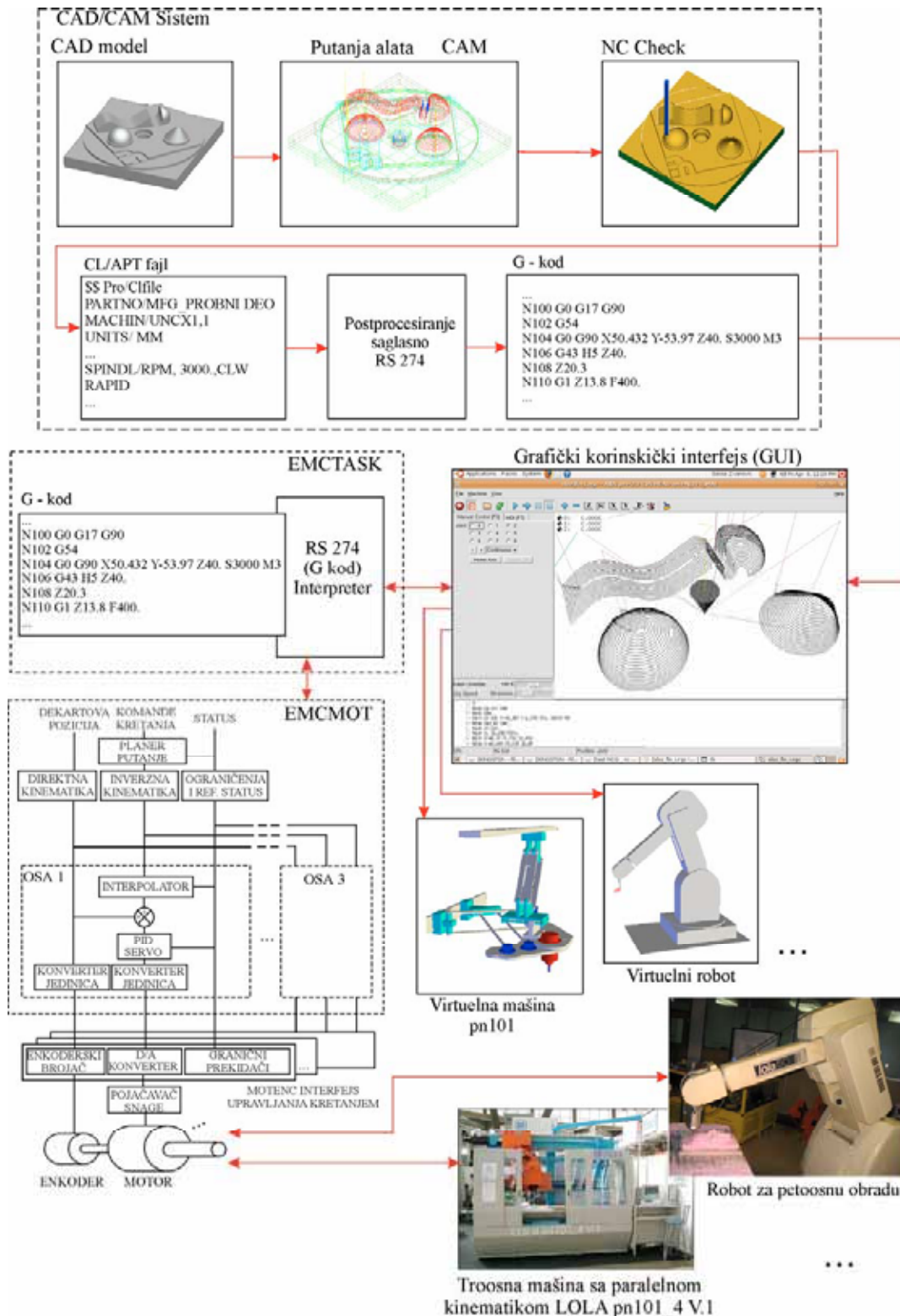
Upravljački sistemi razvijenih prototipova su bazirani na PC real-time Linux platformi i EMC2 softverskom sistemu za upravljanje i imaju strukturu koja je pokazana na slici 17.

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 se konfigurisu virtuelne mašine u EMC2 u Python grafičkom okruženju. Kinematički moduli, su bazirani na jednačinama direktne i inverzne kinematike koje se programiraju u C jeziku i integrišu u jezgro EMC2 sistemskog softwara. Ovako konfigurisani sistemi upravljanja omogućavaju testiranje funkcionalnosti novo konfigurisanih elemenata korisničkog interfejsa, interpolacionih parametara i programirane putanje alata u granicama radnog prostora.

Za kompletiranje sistema upravljanja razvijenih prototipova sa servosistemima korišćene su PC interfejs kartice za upravljanje kretanjem. PCI interfejs na matičnoj ploči je bio osnovni kriterijum za izbor po jedne MOTENC Lite kartice za svake 4 servo ose. Otuda se na ovaj način sa dve Motenc kartice može upravljati sa 5 osa robota i ostaviti mogućnost za kasnije upravljanje sa još 3 ose kao što je pokazano na slici 12b,c. Za kompletiranje sistema upravljanja razvijenih prototipova sa koračnim motorima korišćen je paralelni port PC-a za komunikaciju sistema upravljanja i pogona prototipova.

Kao što se vidi sa slike 17 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 inicijalizovanu mašinu i postavljen obradak program se može pokrenuti. Pri startovanju programa instrukcije G-koda se izvršavaju u realnom vremenu i generišu upravljački signali koji se mogu

usmeriti na realnu ili virtuelnu mašinu. Virtuelna mašina omogućava završnu verifikaciju G-koda slično postojećim sistemima za off-line programiranje. Na virtuelnim mašinama je implementirana i provera ostvarivosti poza u granicama odgovarajućeg radnog prostora prototipa mašine. Na taj način se mogu uočiti i eventualne kolizije mašine i alata sa pripremkom i priborom. Nakon verifikacije program se može bezbedno izvršiti na realnoj mašini.



Slika 17. Struktura sistema upravljanja i programiranja

5. ISPITIVANJE RAZVIJENIH PROTOTIPOVA

Ispitivanje razvijenih prototipova obuhvatilo je i direktna i indirektna ispitivanja. Direktna ispitivanja su se odnosila na ispitivanja geometrijskih tačnosti, tačnosti pozicioniranja i statičkih krutosti, slika 18.



a) ispitivanje LOLA pn101_4 V.1[1,2]



b) ispitivanje robota LOLA50

Slika 18. Primeri direktnih ispitivanja paralelnih i serijskih prototipova

Indirektna ispitivanja su se odnosila na ispitivanje radne tačnosti i na dinamičko-energetski bilans, slika 19. Radna tačnost je proveravana na probnim delovima koji su projektovani tačno za ova ispitivanja.



a) ispitivanje LOLA pn101_4 V.1[1,2]



b) ispitivanje robota LOLA50 [6]

Slika 19. Primeri indirektnih ispitivanja paralelnih i serijskih prototipova

Ciljevi ovih ispitivanja su bili:

- provera korišćenih modela za analize statičke krutosti i očekivane tačnosti obrade,
- provera kinematičkih modela za verifikaciju sistema upravljanja mašina sa netrivialnim kinematikama,
- postavljanje modela za kalibracije i kompenzacije,
- eksploataciona ispitivanja napravljenih prototipova obradom odabranih probnih delova i svođenjem dinamičko-energetskog bilansa ispitivanih obradnih sistema.

6. ZAKLJUČAK

Obradni sistemi nove generacije čine osnovu razvoja proizvodnih tehnologija u svim granama industrije. Istraživanja u oblasti mašina alatki i robota nove generacije su se odnosila na razvoj prototipova mašina alatki i robota sa paralelnom i serijskom kinematikom, razvoj rekonfigurabilnog obradnog sistema za višeosnu obradu na bazi robota, razvoj i primenu upravljačkih sistema otvorene arhitekture i ispitivanje ovih obradnih sistema. U radu su prikazani ključni rezultati višegodišnjih istraživanja u oblasti razvoja nove generacije domaćih obradnih sistema kroz:

- afirmaciju mašina sa paralelnom kinematikom u domaćim uslovima,
- osvajanje tehnologije višeosne obrade,
- upravljanje otvorene arhitekture obradnih sistema nove generacije,
- specifičan metod programiranja industrijskih robota pomoću G koda,
- primena virtuelnih mašina u verifikaciji sistema za programiranje i simulaciju i verifikaciju programa,
- razvoj stonih mašina i metoda njihove implementacije u edukaciji,
- razvoj i primena procedura razvojnog ispitivanja mašina sa netrivialnom kinematikom i
- informisanje domaće i međunarodne naučne i stručne javnosti o ostvarenim rezultatima u cilju proširenja oblasti saradnje.

Svi rezultati su direktno primenjeni kroz instalisane prototipove koji su instalisani u Zavodu za mašine alatke, Mašinskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu i koriste se za tekuća istraživanja i kao resursi za obrazovanje studenata proizvodnog mašinstva na svim nivoima studija.

7. LITERATURA

Radovi u međunarodnim časopisima sa SCI liste

- [1] Milutinovic D., Glavonjic M., Kvrđic V., Zivanovic S., (2005), A New 3-DOF Spatial Parallel Mechanism for Milling Machines with Long X Travel, CIRP Annals-Manufacturing Technology, Vol 54/1, pp 345-348, doi: 10.1016/S0007-8506(07)60119-X
- [2] Glavonjic, M., Milutinovic, D., (2008), Parallel structure milling machines with long X travel, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol 24, pp 310-320, doi: 10.1016/j.rcim.2006.12.001
- [3] Glavonjic, M., Milutinovic, D., Zivanovic, S., (2009), Functional simulator of 3-axis parallel kinematic milling machine, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol 42/7, pp 813-821, doi:10.1007/s00170-008-1643-x
- [4] Tanovic Lj., Bojanic P., Puzovic R., (2009), Experimental Investigation of Microcutting Mechanisms in Marble Grinding, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol 131/6, 064507, 5 pages, doi:10.1115/1.4000619
- [5] Glavonjic M., Milutinovic D, Zivanovic S, Dimic Z, Kvrđic V., (2010), Desktop 3-axis parallel kinematic milling machine, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol 46/1-4, pp 51-60, doi:10.1007/s00170-009-2070-3
- [6] Milutinovic D., Glavonjic M., Slavkovic N., Dimic Z., Zivanovic S., Kokotovic B., Tanovic Lj., (2011), Reconfigurable robotic machining system controlled and programmed in a machine tool manner, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol 53, pp 1217-1229, doi:10.1007/s00170-010-2888-8
- [7] Tanovic Lj., Bojanic P., Puzovic R., Milutinovic M., (2011), Experimental Investigation of Microcutting Mechanisms in Granite Grinding, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol 133/2, 024501, 5 pages, doi:10.1115/1.4003521

Radovi u domaćim časopisima

- [8] Živanović S., (2000), Parallel Kinematic Machines, International Journal of Production Engineering and Computers, Vol 3/3, pp.49-54
- [9] Glavonjic M., Milutinovic, D., Živanović, S., (2005), Pokazni centar za mašine sa paralelnom kinematikom, Naučno - stručni časopis iipp – Istraživanja i projektovanja za privredu, Broj 9/III, str. 29-34

- [10] Živanović S., (2005), Primer ispitivanja radne tačnosti jedne troosne paralelne mašine, Naučno-stručni časopis Tehnička Dijagnostika, Broj 3/IV, str. 42-48
- [11] Živanović S., (2005), Ispitivanje i verifikacija geometrije i upravljanja mašina alatki sa paralelnom kinematikom, Naučno-stručni časopis Tehnička Dijagnostika, Broj 1/IV, str. 55-60
- [12] Zivanovic S., Glavonjic M., Dimic Z., (2009), Methodology for Configuring Desktop 3-axis Parallel Kinematic Machine, Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, FME Transactions Vol 37/3, pp 107-115

Radovi na međunarodnim skupovima

- [13] Milutinović D., Glavonjić M., Serial Link Measuring System - based Approach for Testing and Control of Stewart Platform - based Machines; Proceedings of the Fourth ECPD International Conference on Advanced Robotics, Intelligent Automation and Active Systems, Moscow, pp.288-293, 1998.
- [14] Milutinović D., Glavonjić M., Pose measurement of Parallel Kinematics Machines with Serial Link Measuring System in Parallel Kinematic Machines-Theoretical Aspects and Industrial Requirements, Eds. Boer C.R., Molinari Tosatti L., and Smith K.S., Springer Verlag, pp.189-203, 1999.
- [15] Glavonjic M., Milutinovic D., Zivanovic S., Bouzakis K., Mitsi S., Misopolinos L., Development of a Parallel Kinematic device Integrated into a 3-axis Milling centre, Proceedings of 2nd Interanational Conference on Manufacturing Engineering ICMEN and EUREKA Brokerage Event, Kassandra-Chalkidiki, Greece, pp.351-361, 2005.
- [16] Živanović S., Ivanović R., Simulacija kinematike troosne paralelne mašine sa translatorno pokretnim aktuatorima duž X ose, 7.Međunarodni naučno-stručni skup o dostignućima elektro i mašinske industrije DEMI 2005, Zbornik radova, Univerzitet u Banja Luci, Mašinski fakultet, Banja Luka, str.77-82, 2005.
- [17] Mitsi S., Bouzakis K., Misopolinos L., Milutinovic D., Workspace and Manipulability Optimizations with Genetic Algorithms of a 3 DOF Spatial Parallel Mechanism Used in Machining Processes, Proseedings 2nd International Conference on Manufacturing Engineering (ICMEN), Kassandra-Chalkidiki, Greece, pp 363-372, 2005.
- [18] Milutinović D., Glavonjić M., Živanović S., Mašine sa paralelnom kinematikom, VIII.Međunarodni naučno-stručni skup o dostignućima elektrotehnike, mašinstva informatike DEMI 2007, Zbornik radova, Univerzitet u Banja Luci, Mašinski fakultet, Banja Luka, str.3-14, 2007.
- [19] Živanović S., Konfiguracije mehanizama za gradnju prototipa petoosne paralelne mašine, VIII.Međunarodni naučno-stručni skup o dostignućima elektrotehnike, mašinstva informatike DEMI 2007, Zbornik radova, Univerzitet u Banja Luci, Mašinski fakultet, Banja Luka, str.321-326, 2007.
- [20] Milutinovic D., Glavonjic M., Zivanovic S., Dimic Z., Kvrđic V., Mini educational 3-axis parallel kinematic milling machine, Proceedings of 3rd Interanational Conference on Manufacturing Engineering ICMEN and EUREKA Brokerage Event, Kallithea of Chalkidiki, Greece, pp 463-474, 2008.
- [21] Milutinović D., Glavonjić M., Živanović S., Slavković N., Rekonfigurabilni obradni sistemi na bazi petoosnog robota, 9. Međunarodna konferencija o dostignućima elektrotehnike, mašinstva informatike DEMI 2009, Zbornik radova, Univerzitet u Banjaluci, Mašinski fakultet, Banja Luka, Bosna i Hercegovina, str.273-280, 2009.

Radovi na domaćim skupovima

- [22] Glavonjic M., Milutinović D., Stjuartov mehanizam u novoj generaciji obradnih centara i robota, 22. JUPITER konferencija, 18. simpozijum NU - Roboti - FTS, Zbornik radova, str 3.53 - 3.63, Mašinski fakultet, Beograd, 1996.
- [23] Glavonjić M., Milutinović D., Novi kinematički podsistem mašine alatke, 26. Međunarodno savjetovanje proizvodnog mašinstva Jugoslavije, Zbornik radova, str.553-559, Podgorica-Budva, 1996.
- [24] Živanović S., Model mašine alatke i robota sa paralelnim mehanizmom, 23. JUPITER konferencija, 19. simpozijum NU-Roboti-FTS, Zbornik radova, str. 225 - 230, Mašinski fakultet, Beograd, 1997.
- [25] Milutinović D., Glavonjić M., Simbioza mašina sa paralelnom kinematikom i mernog sistema sa serijskim kinematičkim lancem, 25. JUPITER konferencija, 21. simpozijum NU - Roboti - FTS, Zbornik radova, str 3.43 - 3.50, Mašinski fakultet, Beograd, 1999.
- [26] Milutinović D., Glavonjić M., Stanje istraživanja i perspektive razvoja i primene mašina sa paralelnom kinematikom u Jugoslaviji, 26. JUPITER konferencija, 22. simpozijum NU - Roboti - FTS, Zbornik radova, str.3.1-3.6, Mašinski fakultet, Beograd, 2000.
- [27] Milutinović D., Čović N., Glavonjić M., Functional simulator of 3D Parallel Kinematics Milling Machine, Proceedings of 27th JUPITER Conference with foreign participants, pp. 3.1-3.10, 23th Simposium NU-Roboti-FTS, Beograd, 2001.
- [28] Živanović S., Varijantnost konfigurisanja mašina sa paralelnom kinematikom i pravolinijskim aktuatorima, 30. JUPITER konferencija, Plenarna sednica, 26. simpozijum NU - Roboti - FTS, Zbornik radova, str. 3.79-3.82, Mašinski fakultet, Beograd, 2004.
- [29] Glavonjić M., Milutinović D., Živanović S., Kvrđić V., Višnjić Z., O jednoj troosnoj paralelnoj mašini, 30. JUPITER konferencija, 26. simpozijum NU - Roboti - FTS, Zbornik radova, str. 3.49-3.54, Mašinski fakultet, Beograd, 2004.

- [30] Glavonjić M., Živanović S., Milutinović D., Troosna paralelna mašina pn101, 31. JUPITER konferencija, 27. simpozijum NU - Roboti - FTS, Zbornik radova, str.3.1-3.5, Mašinski fakultet, Beograd, Zlatibor, 2005.
- [31] Milutinović D., Glavonjić M., Kvrđić M., Živanović S., Novi paralelni mehanizam za glodalice sa dugačkom X osom, 31. JUPITER konferencija, 27. simpozijum NU - Roboti - FTS, Zbornik radova, str.3.6-3.11, Mašinski fakultet, Beograd, Zlatibor, 2005.
- [32] Živanović S., Konfigurisanje jedne troosne mašine sa paralelnom kinematikom, 30. Jubilarno savetovanje proizvodnog mašinstva SCG sa međunarodnim učešćem, Zbornik radova, str.119-124, Tehnički fakultet i Viša Tehnička škola Čačak, Vrnjačka banja, 2005.
- [33] Glavonjić M., Milutinović D., Živanović S., Troosni paralelni mehanizam sa specifičnim rešenjima pasivnog translatorskog zgloba, 32. JUPITER konferencija, 28. simpozijum NU - Roboti - FTS, Zbornik radova, str.3.1-3.4, Mašinski fakultet, Beograd, Zlatibor, 2006.
- [34] Milutinović D., Glavonjić M., Živanović S., Funkcionalni simulator troosnih mašina sa paralelnom kinematikom, 31. Savetovanje proizvodnog mašinstva SCG sa međunarodnim učešćem, Zbornik radova, str.295-304, Mašinski fakultet u Kragujevcu, 2006.
- [35] Živanović S., Dimić Z., Upravljanje modela troosne mašine sa paralelnom kinematikom pn 101 na bazi EMC sistemskog softvera, 33. JUPITER konferencija, 29. simpozijum NU-Roboti-FTS, Zbornik radova, str.3.19-3.24, Mašinski fakultet, Beograd-Zlatibor, 2007.
- [36] Glavonjić M., Milutinović D., Živanović S., Dimić Z., Konfiguracija jedne hibridne petoosne mašine, 33. JUPITER konferencija, 29. simpozijum NU-Roboti-FTS, str.3.1-3.6, Mašinski fakultet, Beograd-Zlatibor, 2007.
- [37] Dimić Z., Živanović S., Kvrđić V., Koncept razvoja CNC upravljanja za mašine alatke specifične konfiguracije na bazi EMC softvera, 34. JUPITER konferencija, 30. simpozijum NU-Roboti-FTS, Zbornik radova, str.3.19-3.26, Mašinski fakultet, Beograd, 2008.
- [38] Glavonjić M., Živanović S., Milutinović D., Dimić Z., Edukaciona troosna mašina sa paralelnom kinematikom, 34. JUPITER konferencija, 30. simpozijum NU-Roboti-FTS, Zbornik radova, str.3.27-3.34, Mašinski fakultet, Beograd, 2008.
- [39] 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, str.353-356, FTN Departman za proizvodno mašinstvo, Novi Sad, 2008.
- [40] Milutinović D., Glavonjić M., Živanović S., Dimić Z., Multifunkcionalni rekonfigurabilni obradni sistem na bazi robota, XXXII Savetovanje proizvodnog mašinstva sa međunarodnim učešćem, Zbornik radova, str. 369-372, FTN Departman za proizvodno mašinstvo, Novi Sad, 2008.
- [41] Milutinović D., Glavonjić M., Živanović S., Dimić Z., Slavković N., Razvoj rekonfigurabilnog obradnog sistema na bazi robota, XXXIII Savetovanje proizvodnog mašinstva SRBIJE 2009 sa međunarodnim učešćem, Zbornik radova, str. 151-155, Mašinski fakultet Beograd, Beograd, 2009.
- [42] Živanović S., Glavonjić M., Metodologija funkcionalnog konfigurisanja novih mašina alatki, 35. JUPITER konferencija, 31. simpozijum NU-Roboti-FTS, Zbornik radova, str.3.1-3.7, Mašinski fakultet, Beograd, 2009.
- [43] Milutinović D., Glavonjić M., Slavković N., Dimić Z., Živanović S., Kokotović B., Tanović Lj., Rekonfigurabilni obradni sistem na bazi robota za višeosnu obradu, 36. JUPITER konferencija, 32. simpozijum NU-Roboti-FTS, Zbornik radova, str.3.11-3.21, Mašinski fakultet, Beograd, 2010.

Magistarske teze i doktorske disertacije

- [44] Živanović S., Tehnološki modul sa paralelnim mehanizmom, Magistarska teza, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 2000.
- [45] Puzović R., Razvoj sistema modeliranja tehnoloških procesa FTS-a primenom računara, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 2000.
- [46] Živanović S., Konfigurisanje novih mašina alatki, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 2010.

Tehnička rešenja

- [47] Glavonjić M., Milutinović D., Kvrđić V., Dimić Z., Živanović S., Troosna vertikalna glodalica sa paralelnom kinematikom, Tehničko rešenje, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 2008.
- [48] 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, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 2010.
- [49] Tanović Lj., Bojanić P., Puzović R., Popović M., Milutinović M., Mladenović G., Nova metoda projektovanja i tehnologije izrade prizmatičnih-tangencijalnih strugarskih noževa, Tehničko rešenje, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 2010.

Patenti

- [50] Milutinovic D., Toothed belt of circular cross section, YU Patent, 48534 (1998), and Japanese Patent, JP 6257645, 1994.
- [51] Полонский Л. Г., Клименко С. А., Марченко А. И., Ковалев В. В., Новарчук В. П., Танович Л., и др. ВІДРІЗНИЙ РІЗЕЦЬ, Міністерство освіти і науки України, Державний департамент інтелектуальної власності, UA 40888 A, 15.08.2001.
- [52] Полонский Л. Г., Клименко С. А., Танович Л., и др. ИНСТРУМЕНТ УБРЮ-1 ДЛЯ УЩІЛЬНЕННЯ ТА ВИРІВНЮВАННЯ ТОВЩИНИ ГАЗОТЕРМІЧНИХ НАПИЛЕНИХ ПОКРИТТІВ І НАПЛАВЛЕНЬ, Міністерство освіти і науки України, Державний департамент інтелектуальної власності, UA 49435 A, 16.09.2002.
- [53] Полонский Л. Г., Ковалев В. В., Клименко С. А., Танович Л., и др. ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ВИКІНЧУВАЛЬНО-ЗМІЦНЮВАЛЬНОЇ ОБРОБКИ, Міністерство освіти і науки України, Державний департамент інтелектуальної власності, UA 46439 A, 15.05.2002.
- [54] Полонский Л. Г., Клименко С. А., Марченко А. И., Ковалев В. В., Новарчук В. П., Танович Л., и др. Отрезной резец, Национальный центр интеллектуальной собственности, ВУ7212 С1 2005.09.30.
- [55] Glavonjić M., Milutinović D., Kvirgić V., Troosni prostorni paralelni mehanizam, mašina alatka i industrijski robot sa tim mehanizmom, isprava o patentu broj RS 50375 B, Republika Srbija, Zavod za intelektualnu svojinu, upisan u registar patenata 22.07.2009. godine, objavljen u Glasniku intelektualne svojine 10.11.2009. godine. Isprava o patentu izdata 11.11.2009. godine.
- [56] Milutinović, D., Hiroshi, M., Eiffel mechanism, Japanese Patent, JP 2004025380, 2010.

Ostale reference

- [57] Stewart D., A Platform With Six Degree of Freedom, The Institution of Mechanical Engineers, Proceedings 1965-66, Part 1, No 15, pp 371-386
- [58] L. Rey, R. Clavel, The Delta Parallel Robot, Parallel Kinematic Machines, Eds. C.R. Boer, L. Molinari-Tosatti and K.S. Smith, Springer, 1999, pp 401-417
- [59] EMC - Enhanced Machine controller, web site: www.linuxcnc.org
- [60] NIST - National Institute of Standards and Technology, web site: <http://www.nist.gov/index.html>
- [61] Real-Time Control Systems Library, Software and Documentation, web site: <http://www.isd.mel.nist.gov/projects/rcslib/>
- [62] Paul RP (1981) Robot Manipulators: mathematics, programming and control. The MIT Press ISBN 0-262-16082-X.
- [63] Fu KS, Gonzalez RC, Lee CSG (1987) Robotics: control, sensing, vision, and intelligence. McGraw-Hill ISBN 0-07-022625-3.
- [64] Craig JJ (1989) Introduction to robotics: mechanics and control, 2nd ed. Addison- Wesley ISBN 0-201-09528-9.

Milutinovic D., Glavonjic M., Tanović Lj., Bojanic P., Puzovic R., Zivanovic S., Kokotovic B., Popovic M., Slavkovic N., Mladenovic G

RESULTS OF RESEARCH AND DEVELOPMENT OF A NEW GENERATION OF DOMESTIC MACHINING SYSTEMS

Abstract

The paper displays a part of research results achieved in the area of a new generation of machining systems. The presented results involve the developed prototypes of parallel kinematic machine tools and robots as well as the development of reconfigurable robotic multi-axis machining system. The results represent a basis for cooperation with domestic industry, participation in international projects and further research. Also, the developed systems make a resource for laboratory work of production engineering students at all study levels.

Key words: machine tools, robots, control and programming, testing machine tools