



UVODNI REFERAT

FUNKCIONALNI SIMULATOR TROOSNIH MAŠINA SA PARALELNO KINEMATIKOM

D. Milutinović ¹⁾, M. Glavonjić ²⁾, S. Živanović ³⁾

Rezime: Mašine sa paralelnom kinematikom (MPK) su danas tema istraživanja i razvoja mnogih univerziteta i instituta. Međutim, mnoge od njih nemaju ove mašine u svojim laboratorijama. U cilju sticanja praktičnih iskustava posebno u oblasti programiranja i primene MPK razvijen je uređaj sa paralelnom kinematikom integrisan sa troosnim serijskim CNC mašinama. Uređaj je razmatran kao funkcionalni simulator troosnih mašina sa paralelnom kinematikom niske cene. Uređaj je baziran na nekoliko razvijenih paralelnih mehanizama sa konstantnim dužinama spojki i translatorskim zglobovima. Upravljan je i pogonjen konvencionalnim troosnim CNC serijskim mašinama. U radu je opisano projektovanje uređaja, modeliranje i algoritmi i softver za upravljanje i programiranje na način kao kod serijskih mašina.

Ključne reči: mašine alatke, simulator, paralelne mašine

FUNKTIONAL SIMULATOR OF PARALLEL KINEMATICS MACHINES

Abstract: Parallel kinematic machines (PKM) are R&D topic in many laboratories but many of them, unfortunately, have no PKM. To gain practical experience, especially in programming and the use of PKM, the parallel kinematic device integrated into 3-axis milling machine has been developed. The device is considered as the low cost but functional simulator of 3D parallel kinematic machine. The device is based on several developed mechanisms with constant strut lengths and linear joints and is driven and controlled by a conventional 3D CNC machine tool. The paper describes device design, modelling approach, algorithms and software for the control and programming in the same way as in serial machine tools.

Key words: machine tools, simulator, parallel machines

1. UVOD

Iako je reč o novoj oblasti, istraživanje i obrazovanje u oblasti mašina sa paralelnom kinematikom (MPK) brzo izlazi iz domena teorije i nameće potrebu nabavke MPK kao eksperimentalne osnove. Nažalost, danas velika većina

¹⁾ Dragan Milutinović, Mašinski fakultet, Beograd, dmilutinovic@mas.bg.ac.yu,

²⁾ Prof. dr Miloš Glavonjić, Mašinski fakultet, Beograd, mglavonjic@mas.bg.ac.yu

³⁾ Saša Živanović, Mašinski fakultet, Beograd, szivanovic@mas.bg.ac.yu

univerzitetskih laboratorija, instituta i fabrika nemaju MPK za potrebe istraživanja i obuke. Razlozi za ovakvu situaciju su visoka cena ovih sistema, skupo održavanje i neprilagođenost komercijalnih verzija za šire potrebe obuke i istraživanja. U cilju sticanja praktičnih iskustava u modeliranju, projektovanju, upravljanju i posebno u programiranju i primeni MPK na Katedri za proizvodno mašinstvo Mašinskog fakulteta u Beogradu su započeta istraživanja na razvoju funkcionalnog simulatora troosnih mašina sa paralelnom kinematikom, osnaženog i upravljanog osama konvencionalnih - serijskih CNC glodalica i obradnih centara. Funkcionalni simulator (FS), kao hibridni sistem, integriše postojeću tehnološku opremu (CNC mašine alatke, CAD/CAM, hardver i softver) i mehanizme sa paralelnom kinematikom u moderan i sofisticiran proizvod namenjen za trening i edukaciju od visokoškolskih institucija do srednjih škola i fabrika [1,2,3]. Rezultati ovih istraživanja su bili osnova za pokretanje Inovacionog projekta IP 8115 – Funkcionalni simulator troosnih mašina sa paralelnom kinematikom.

Realne podloge za uspešnu realizaciju ovog projekta su rezultati postignuti na projektu Tehnološkog razvoja (MIS.3.02.0101B Troosne paralelne mašine, u periodu 2001-2004) [4] i EUREKA projektu E!3239, sa partnerom iz Grčke (PaKiCUT, u periodu 2003-2005) [5,6], kao i iskustvo i saradnja korisnika ovog projekta CPS-CAD Professional systems sa fakultetima, višim i srednjim školama i fabrikama u oblasti CAD/CAM. S obzirom da je jedna od važnih delatnosti korisnika i zastupanje firme PTC (Parametric Technology Corporation) proizvođača CAD/CAM/CAE sistema Pro/Engineer i Pro/Mechanica, za koje i Fakultet ima licencu to bi ovi simulatori značajno doprineli obuci budućih korisnika kako ovog sistema tako i paralelnih mašina.

Rad opisuje deo rezultata ovog projekta koji se odnosi na projektovanje simulatora, modeliranje, kalibraciju, algoritme i softver za upravljanje i programiranje. U cilju evaluacije prototipova funkcionalnih simulatora u realnim uslovima pokazani su i odabrani test radni predmeti izrađeni od poliuretana.

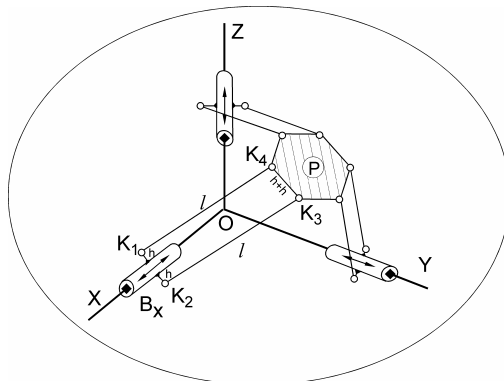
2. KONCEPCIJA FUNKCIONALNOG SIMULATORA

Po definiciji, mehanizmi sa paralelnom kinematikom imaju 6 stepena slobode. Tri stepena slobode i troosna obrada mogu da se ostvare ili sistemom za programiranje i upravljanje, ili kinematičkim ograničenjima u samom mehanizmu. Za ovaj proizvod je prihvaćeno da se tri stepena slobode dobiju uparivanjem po dve pogonske ose paralelnog mehanizma, slika 1. Pogonska mašina sa serijskom kinematikom ima uzajamno upravne ose, zbog čega i odabrani mehanizam ima tako raspoređene pogonske ose: na uzajamno upravnim vodičama.

Uopštena skica za opis osnovnih parametara troosnog funkcionalnog simulatora mašine sa paralelnom kinematikom data je na slici 1. Detaljno je pokazana samo osa X. Ostale dve imaju iste ili slične uslove. Paralelni mehanizam simulatora ima sledeće osobine:

- **B_x** je klizač na osi X na kome su upareni sferni zglobovi **K₁** i **K₂**, simetrični u odnosu na osu X i udaljeni od nje za po h.
- **K₃** i **K₄** su sferni, kardanski ili univerzalni zglobovi na pokretanoj platformi i na rastojanju h+h.
- **l** je konstantna dužina spojki.
- **P** je pokretana platforma.
- Figura **K₁K₂ K₃K₄** treba da ostaje (ravni) paralelogram za sve vreme kretanja mehanizma.

- Pravac K_1K_2 je stalno nagnut pod 45 stepeni prema ravni (X,Y),
- Paralelni mehanizam ostvaruje kretanje translacijom klizača B_x , B_y , B_z . Oni preko tri para spojki pomeraju pokretanu platformu P , koja stalno ostaje paralelna sama sebi, odnosno ostvaruje translatorno pomeranje.

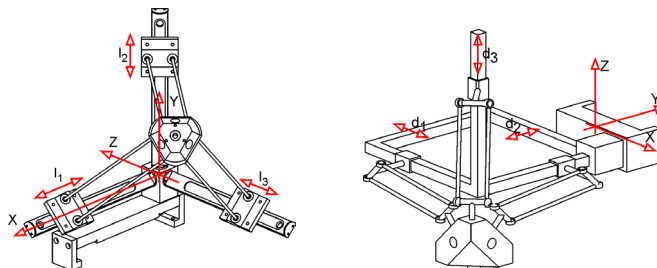


Slika 1. Polazni koncept funkcionalnog simulatora troosnih paralelnih mašina

3. KINEMATIČKI MODELI

Razmatrani funkcionalni simulatori su troosne mašine sa paralelnom kinematikom. U obe do sada razvijene konfiguracije (slika 2) paralelnog mehanizma za simulatore, pokretana platforma je sa klizačima povezana pomoću tri para spojki. Proračun se sprovodi sa srednjim dužinama spojki koje su tačno na sredini između dve spojke jednog para.

Kinematički model funkcionalnog simulatora P3 pokazan je na slikama 2a) i 3a) i predstavlja osnovnu konfiguraciju funkcionalnog simulatora, koja je realizovana i već testirana na obradnom centru HBG80, kao pogonskoj mašini. Platforma je obuhvaćena vodičama pogonskih osa u unutrašnjosti oktanta. Pretpostavlja se da su $O_B R_2 = O_P C_2$, $O_B R_3 = O_P C_3$, $O_B R_3 = O_P C_3$. Sve spojke su iste dužine $c = 600\sqrt{2} \cong 848.528$ mm. Koordinate podnožja alata u ravni (X_P, Y_P) iznose $x_{TP} = y_{TP} = 25$ mm. Udaljenost od vrha alata do podnožja TTP iznosi 110 mm + prepust vrha alata T ispred čela platforme.

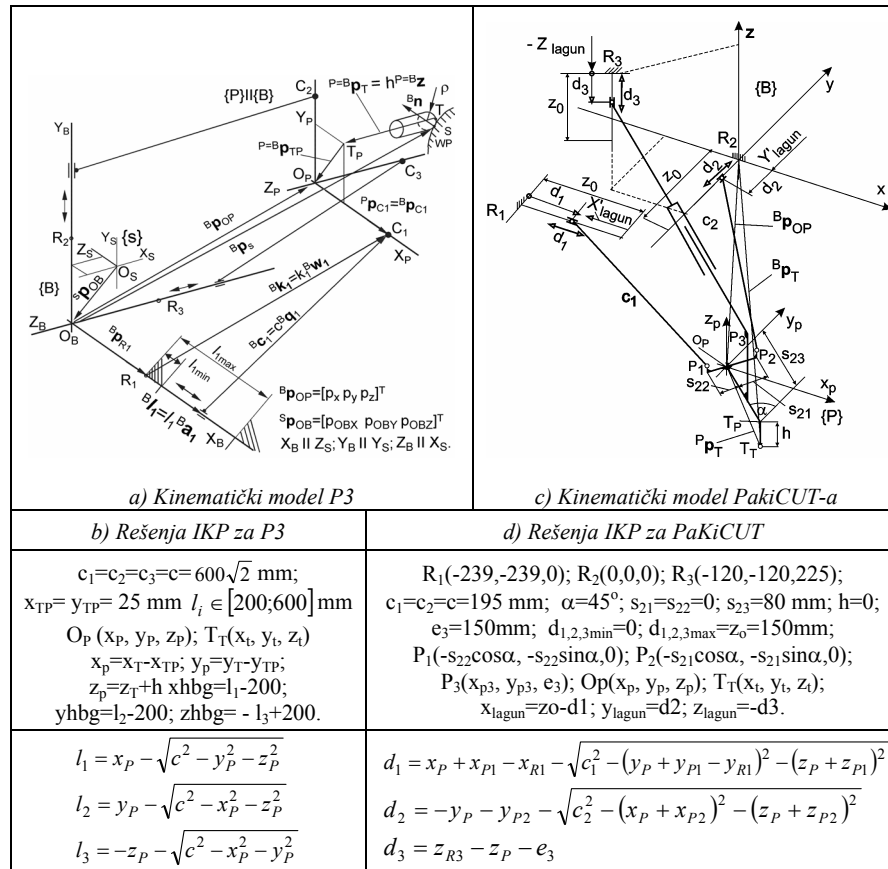


Slika 2. Dve osnovne konfiguracije funkcionalnog simulatora

Programiranjem osnovne mašine za pokretanje simulatora P3 realizuje se funkcionalni simulator mašine sa paralelnom kinematikom. Za ove potrebe neophodno

je rešenje inverznog geometrijskog problema (igp). Ono je sa parametrima mehanizma dato na slici 3b). Od po dva rešenja za svaku pogonsku osu bira se povoljnije rešenje sa aspekta konfiguracije simulatora. U ovakvoj konfiguraciji, u kojoj je platforma isturena, koriste se rešenja sa znakom minus ispred korena.

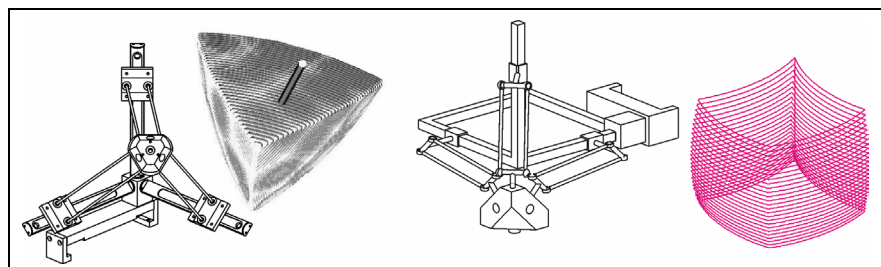
Kinematički model PaKiCUT pokazan je na slici 3c). Ovo je nova konfiguracija, kod koje platforma nije obuhvaćena vodicama pogonskih osa. U okviru ove konfiguracije postoji nekoliko varijanti, u zavisnosti od načina realizacije strukture pogonskih osa. Na slici 3c) je dat model kod koga se vertikalna pogonska osa pokreće preko polarnog mehanizma, a dve horizontalne ose se pokreću preko translatorskih veza. Moguće su i drugačije konfiguracije.



Slika 3. Kinematički modeli sa parametrima

Na slici 4. je pokazano poređenje ove dve osnovne konfiguracije funkcionalnih simulatora. U prvoj, čiji je predstavnik P3, platforma je obuhvaćena vodicama pogonskih osa. U drugoj, čiji je predstavnik PaKiCUT, platforma nije obuhvaćena vodicama pogonskih osa. Na osnovu razmatranih kriterijuma može se zaključiti da druga koncepcija ima bolje osobine, na koje dominantno utiče oblik i veličina radnog prostora, što je generalno problem svih mašina sa paralelnom kinematikom. Za drugu

koncepciju je radni prostor značajno veći i blizak je pravilnom obliku. Drugim rečima moguće je lakše upisati veću pravilnu prizmu u granice radnog prostora.



Tip Simulatora	P3	PaKiCUT
kriterijum		
Pokretne mase	male	male
Brzina	velika	velika
Krutost	dobra	zadovoljavajuća
Radni prostor	mali	veći
Oblik radnog prostora	nepravilan	blizak pravilnom
Troškovi izrade	veliki	mali
Kalibracija	teža	lakša
Montaža	lakša	teža

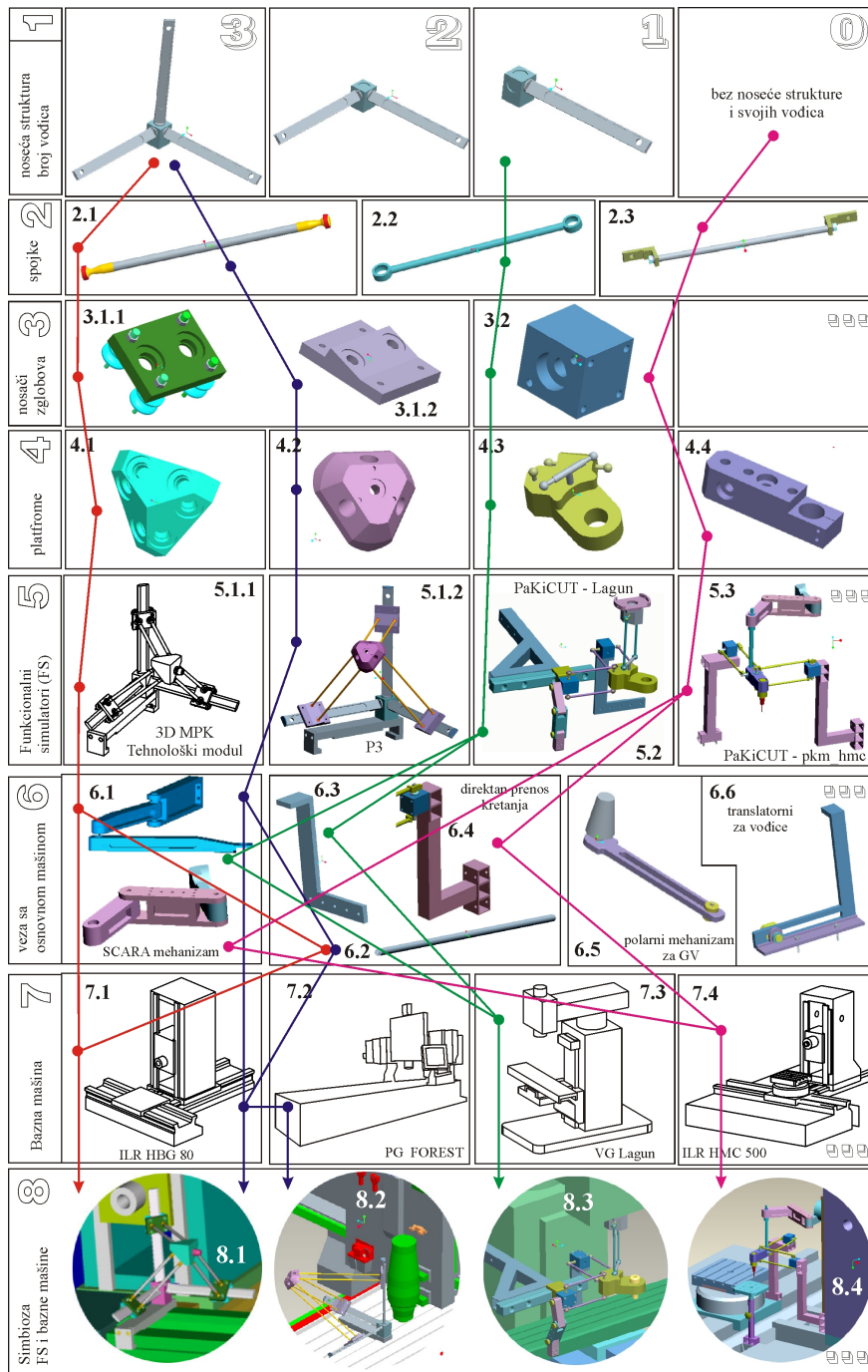
Slika 4. Poređenje osnovnih koncepcija FS

4. MODULARNI KONCEPT KONFIGURISANJA FS

S obzirom da potencijalni korisnici imaju vrlo različite troosne CNC mašine alatke, u cilju što ekonomičnije proizvodnje simulatora, odnosno, što pristupačnije cene, planirana je proizvodnja modularno konfigurisanih funkcionalnih simulatora. Kako su potencijalni korisnici već upoznati sa MPK, kao i to da su veoma verzirani u programiranju svojih mašina, funkcionalni simulator bi se mogao proizvoditi kao sistem sastavnih elemenata [7]. Ovo se u potpunosti uklapa u ideju da se oformi proizvodni program simulatora u različitim varijantama u zavisnosti od tipa bazne mašine.

Na slici 5. je pokazan primer opisivanja konfigurisanja simbioze funkcionalnih simulatora mašina sa paralelnom kinematikom i baznih mašina, primenom morfoloških matrica. Funkcijskim strukturisanjem problem opisivanja je sveden na 7 grupa, u okviru kojih je nastavljeno dalje strukturisanje. Ove grupe su: 1- noseća struktura i broj vodica; 2 - spojke; 3 - nosači zglobova (translatorno pokretni); 4 - pokretene platforme; 5 - funkcionalni simulator mašine sa paralelnom kinematikom; 6 - veza sa osnovnom mašinom; 7 - bazna mašina. Grupa 8 predstavlja rezultat izbora odgovarajućih realizacija prema strukturisanim funkcijama i predstavlja izvod iz mogućeg plana uzoraka ugrađenih simulatora na baznim mašinama.

Sve simulatore moguće je grubo podeliti u dve grupe: one koji imaju svoju noseću strukturu i vodice na njoj i one koji nemaju, već se direktno vezuju za klizače osnovne mašine. Noseća struktura (1) može da ima različiti broj vodica (1 do 3). Spojke (2) mogu biti realizovane sa sfernim ili univerzalnim zglobovima na svojim krajevima. Nosači zglobova (3) se mogu kretati po vodicama na strukturi funkcionalnog simulatora, ili preko interfejs ploča kretanje mogu dobijati direktno od bazne mašine (6.3, 6.4). Pokretane platforme (4) mogu imati jednu ili više baza za glavno vreteno.



Slika 5. Morfološka matrica konfigurisanja funkcionalnih simulatora troosnih MPK

Izvod iz plana uzoraka simbioze bazne mašine i funkcionalnih simulatora je dat u grupi (8). Grupa (6) predstavlja načine povezivanja simulatora sa baznom mašinom. To može biti direktno (6.2, 6.3, 6.4), ili preko SCARA mehanizma (6.1), ili preko polarnog mehanizma (6.5) ili preko translatorskih mehanizama (6.6). U grupi (7) su date do sada razmatrane bazne mašine (obradni centar ILR HBG 80, Portalna glodalica Forest, Vertikalna glodalica Lagun, obradni centar ILR HMC500). Ova morfološka matrica nije konačna, već se može i dalje proširiti. Osim realizacija modula u osnovnim funkcijama, moguće su i druge konfiguracije, koje zbog ograničenog prostora ovde nisu navedene.

5. PROGRAMIRANJE FUNKCIONALNOG SIMULATORA

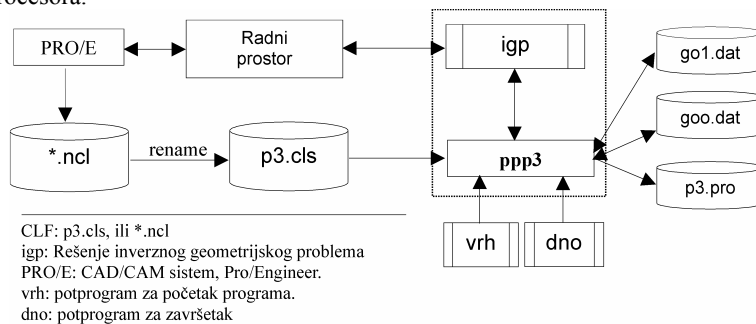
Programiranje mašina sa paralelnom kinematikom je daleko složenije nego kod tradicionalnih mašina sa serijskom kinematikom. Serijske mašine alatke, kod kojih se ose mašine sekvencijalno nadovezuju, postoji uparenost osa mašine i potrebnih kretanja alata u odnosu na obradak. Međutim, kod mašina sa paralelnom kinematikom postoji neuparenost osa mašine i potrebnih kretanja alata u odnosu na obradak u programiranju. Radi toga se i metod programiranja mora postaviti na nov način. Pogodnost je lakoća rešavanja inverznog kinematičkog problema za ovakve mehanizme. U upravljanju tradicionalnih NUMA jednostavno se ostvaruje pravolinijsko kretanje po nekoj od osa, dok je kod mašina sa paralelnom kinematikom za najobičnije pravolinijsko kretanje potrebno ostvariti preračunavanje kretanja po svim raspoloživim osama.

Sprezanjem osnovne mašine sa serijskom kinematikom i funkcionalnog simulatora ostvaruje se unutrašnja interpolacija pogonskih osa simulatora. Zbog toga je potrebno da putanja alata, koji se pomera u odnosu na obradak pomoću simulatora, bude dovoljno fino interpolisana, ili naknadno linearizovana, da bi tačnost obrade pomoću simulatora bila zadovoljavajuća. Za programiranje simulatora potrebno je izvršiti postprocesiranje proračunate putanje alata simulatora korišćenjem njegovog inverznog geometrijskog problema (igp), ali sa implementacijom formata programa za osnovnu mašinu. To se ovde vrši na tri načina:

- Ručnim programiranjem, kada se putanja alata zadaje tačka po tačka, na svaku tačku se primenjuje rešenje igp simulatora, a onda i sastavlja program za osnovnu mašinu. Moguće je da se tada vrši linearizacija putanje za slučaj da su delovi putanje dugi.
- Emuliranjem postprocesora za simulator, kada se pogodno razvijenom aplikacijom čita putanja alata izračunata u CAM sistemu (CL file), a onda na nju primenjuje postprocesorski račun na bazi igp za simulator i rezultati formatizuju u program za osnovnu mašinu. U ovom izračunavanju vrši se linearizacija putanje kada god se zaključi da je potrebna.
- Implementacijom sopstvenog postprocesora u CAM sistem kada je to moguće. Tada se rešenje igp simulatora implementira u postprocesor. Generatori postprocesora obično omogućavaju samo da se izabere neka od ponuđenih kinematičkih struktura mašine, među kojima nisu mašine sa paralelnom kinematikom. Otuda se ne koristi generator postprocesora nego se traže drugi načini da se koriguje izračunavanje u postprocesoru. Tako je, na primer, za simulator P3 i osnovnu mašinu HBG80 bio napravljen postprocesor u okruženju Pro/Engineer [3].

Ovde je ilustrovana emulacija postprocesora na slici 6. Proverena je i korišćena u okruženju CAD/CAM sistema Pro/Engineer (modul PRO/E). Putanja alata se preuzima iz zapisa *.ncl. Preimenuje se u p3.cls da se naznači da će biti korišćena u emulatoru

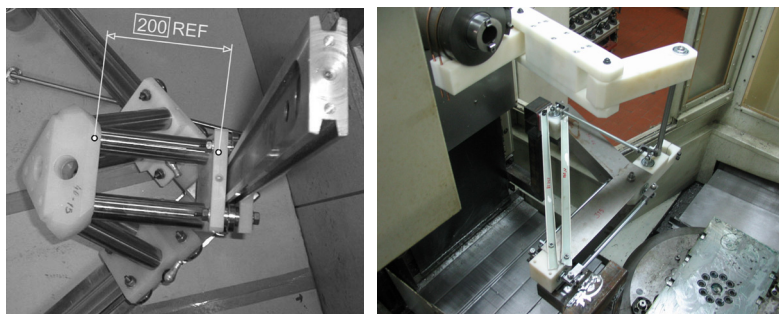
postprocesora. Jedan od razvijenih je ppp3. U njemu je implementirano rešenje igp. Gabarit radnog prostora simulatora (modul Radni prostor) koristi se i za proračunavanje putanje alata i za neprekidnu kontrolu pozicija simulatora da se ne desi da u radu pođe ka nepostojećoj poziciji svojih pogonskih osa. Moduli vrh i dno koriste se za sastavljanje početka i završetka programa za pogonsku mašinu. U zapisima g00 i g01 su evidentirana pozicioniranja i interpolacije, tim redom. Program za osnovnu mašinu je u zapisu p3.pro. Ovo je najčešći način programiranja simulatora p3 i PaKiCUT. Linearizacija putanje alata podešava se prilikom pokretanja odabranog emulatora postprocesora.



Slika 6. Struktura postprocesora ppp3

6. MODELI ZA KALIBRACIJU FUNKCIONALNOG SIMULATORA

Metod kalibracije simulatora zavisi od varijante primenjenog paralelnog mehanizma. Na slici 7a) je pokazana kalibracija P3, pomoću spojki referentnih dužina od po 200mm, čime su određeni referentni položaji translatorskih kolica za sve tri ose. Na slici 7b) je pokazana kalibracija mehanizma PaKiCUT, učvršćivanjem u poznati fiksni položaj kada su spojke međusobno upravne. U toj poziciji se vrši postavljanje na baznu mašinu.



a) kalibracija P3

b) kalibracija PakiCut-a

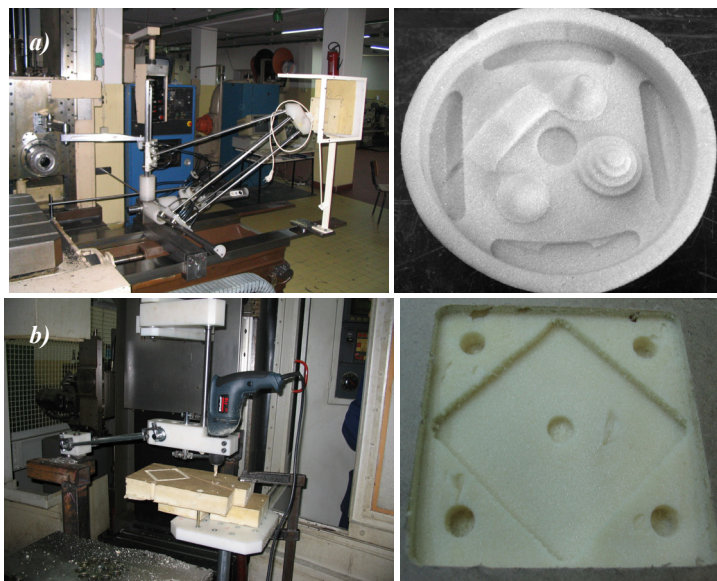
Slika 7. Primeri kalibracija simulatora

Simulator PaKiCUT nema sopstvenu noseću strukturu. Ose pogonske mašine (HMC500) koriste se i kao njegove pogonske ose. Otuda je za njega obavezno da se učvrsti kako je pokazano na slici 7b) da bi se baze na osnovnoj mašini mogle podesiti prema tako fiksiranom mehanizmu ovog simulatora. Ovakvo podešavanje je neizbežno

zato što su baze simulatora bez sopstvene strukture obično pravljene kao priručne i zato nemaju zadovoljavajuću tačnost. Sledeća aktivnost obično je računaska kalibracija simulatora zajedno sa ispitivanjem i poboljšavanjem njegove geometrijske i radne tačnosti.

7. PROTOTIPOVI I OBRADA TEST RADNIH PREDMETA

Realizovana su dva prototipa, P3 za integraciju sa HBG80 i FOREST i PaKiCUT za integraciju sa HMC500, slika 8. Po realizaciji prototipova simulatora izvršena je obrada test radnih predmeta, prema raznim procedurama za ispitivanje radne tačnosti ovakvih mašina. Još uvek ne postoje standardi za ispitivanje geometrijske i radne tačnosti mašina sa paralelnom kinematikom, pa i njihovih simulatora. Zato su uzorci za probne delove za realizovane simulatore birani među probnim delovima za brzohodne mašine i za numerički upravljane glodalice i među probnim delovima koje su neke laboratorije predložile za mašine sa paralelnom kinematikom. Probni delovi sa slike 8. su samo dva od nekoliko korišćenih. Funkcionalni simulatori su već uvedeni u nastavu predmeta Mašine alatke, na Mašinskom fakultetu u Beogradu.



Slika 8. Dva razvijena prototipa i na njima obrađeni test radni predmeti

8. ZAKLJUČAK

Osnovni cilj projekta je razvoj funkcionalnog simulatora troosnih mašina sa paralelnom kinematikom za višeosnu obradu mekih materijala (drvo, plastika, pena i sl), kao modernog i sofisticiranog proizvoda namenjenog za edukaciju i trening u oblasti mašina alatki sa paralelnom kinematikom generalno, kao i njihove primene i programiranja.

S obzirom na značaj paralelnih mašina kao novog koncepta u proizvodnim tehnologijama za 21. vek, funkcionalni simulator omogućava ekonomičnu i efikasnu edukaciju u oblasti paralelnih mašina primenom postojećih konvencionalnih - serijskih CNC mašina alatki. Simulator, kao proizvod, bi zadovoljio potrebe naše zemlje, ali i regiona uz mogućnost da postane i svetski proizvod. Razlog za ovakvu tvrdnju je realan jer osrednja troosna mašina sa paralelnom kinematikom košta oko 150.000 do 200.000 evra dok bi cena Simulatora bila između 6000 i 10000 evra, zavisno od zahteva kupca. Efekat proizvodnje Simulatora za Korisnika CPS - CAD Professional Systems bi mogao biti značajan s obzirom na činjenicu da svi mašinski fakulteti u zemlji i bližem okruženju, imaju troosne CNC glodalice ili obradne centre, zatim i veći broj viših i srednjih škola imaju ove mašine. Takođe i domaće fabrike, koje bi ušle u nabavku paralelnih mašina, bi korišćenjem simulatora stekle osnovna znanja iz ove oblasti, a pogotovu u pogledu primene i programiranja. Ovakve konstatacije se zasnivaju na činjenici da Korisnik CPS - CAD Professional Systems sa skoro svim pomenutim potencijalnim korisnicima ima saradnju u oblasti CAD/CAM-a.

ZAHVALNOST

Ovaj projekat je podržan od strane Ministarstva za nauku i zaštitu životne sredine, Vlade Republike Srbije i od strane CPS CAD Professional systems.

LITERATURA

- [1] *Milutinović, D., Čović, N., Glavonjić, M.*, Functional simulator of 3D parallel kinematic milling machine, 27. JUPITER konferencija, 23. simpozijum NU - Roboti - FTS, Zbornik radova, str. 3.1-3.6, Mašinski fakultet, Beograd, 2001.
- [2] *Živanović, S.*, Tehnološki modul sa paralelnim mehanizmom, Magistarska teza, Mašinski fakultet Beograd, 24. 7. 2000.
- [3] *Čović, N., Živanović, S., Glavonjić, M.*, Osnovna koncepcija jednog prototipa troosne mašine sa paralelnom kinematikom, 28. Savetovanje proizvodnog mašinstva Jugoslavije, Zbornik radova, str. 6.7-6.13, Mašinski fakultet Kraljevo, Mataruška banja, 2000.
- [4] *Glavonjić M., Milutinović D., Živanović S.*, Troosne paralelne mašine, Elaborati (01,2,3)-03-2003, Mašinski fakultet Beograd, 2003.
- [5] *Milutinović, D., Glavonjić, M., Živanović, S.*, Razvoj uređaja sa paralelnom kinematikom za integraciju sa troosnim obradnim centrom za višeosne procese obrade rezanjem, EUREKA projekat E!3239, Izveštaj za 2005. godinu (III i IV faza projekta), Mašinski fakultet Beograd, 2005.
- [6] *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, pp.351-361, Kassandra-Chalkidiki, Greece, october, 2005.
- [7] *K. H. Borowski*, Sistem sastavnih elemenata u tehnici, Grafičko preduzeće Sloboda, Vršac, 1995.