

M. Glavonjić, S. Živanović, D. Milutinović, Z. Dimić<sup>1)</sup>

## EDUKACIONA TROOSNA MAŠINA SA PARALELNO KINEMATIKOM <sup>2)</sup>

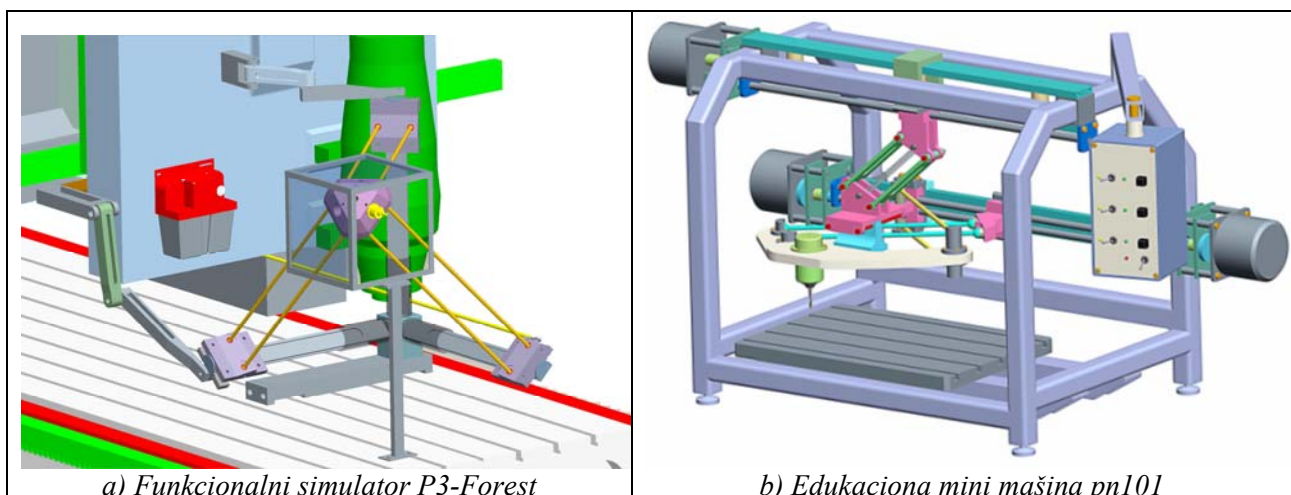
### Rezime

Mašine sa paralelnom kinematikom su značajan istraživački pravac mnogih naučno istraživačkih centara u svetu. Na žalost nemaju sve laboratorije mašinu sa paralelnom kinematikom i mogućnost da je upravljaju, programiraju i na njoj vrše obradu u cilju edukacije i istraživanja. Mini edukaciona troosna mašina sa paralelnom kinematikom je konfigurisana i razvijena sopstvenim resursima, na osnovu, patenta paralelnog mehanizma pn101. Ova mini edukaciona mašina, ima svoje pogone i upravljanje na bazi EMC sistemskog softvera, koji radi na PC Linux platformi. U radu je opisan mehanizam, modeliranje, kinematika, upravljački algoritmi i softver za upravljanje.

**Ključne reči:** mašina sa paralelnom kinematikom, modeliranje, upravljanje.

## 1. UVOD

Mašine sa paralelnom kinematikom predstavljaju izazov za većinu naučno istraživačkih centara. Do danas postoji veliki broj realizovanih različitih konfiguracija, od kojih su neke na nivou prototipova, mada postoje i razvijena komercijalna rešenja. Ovo je značajan istraživački pravac, za koji je eksperimentalan rad na mašinama u pogledu upravljanja, programiranja i obrade vrlo bitan. Međutim, nemaju sve laboratorije mašine a paralelnom kinematikom, a samim tim i mogućnosti koje se time stvaraju. Ovaj nedostatak se može prevazići na dva načina. Prvi način je gradnja funkcionalnih simulatora sa paralelnom kinematikom, kao uređaja koji se, kao moduli, postavljaju na bazne mašine sa serijskom kinematikom, koristeći njene pogone i upravljanje, slika 1a)[1]. Drugi način podrazumeva gradnju mini edukacionih stonih mašina sa paralelnom kinematikom, sa sopstvenim pogonima i upravljanjem na bazi softvera otvorene arhitekture, na PC Linux platformi, slika 1b) [5,6]. Na taj način bi se efikasno i uz minimalna ulaganja, dobio jedan vredan edukacioni resurs, koji bi mogao da se koristi za istraživanja, obuku u rukovanju i programiranju, za obradu delova i za verifikaciju upravljanja i programiranja takvih mašina.



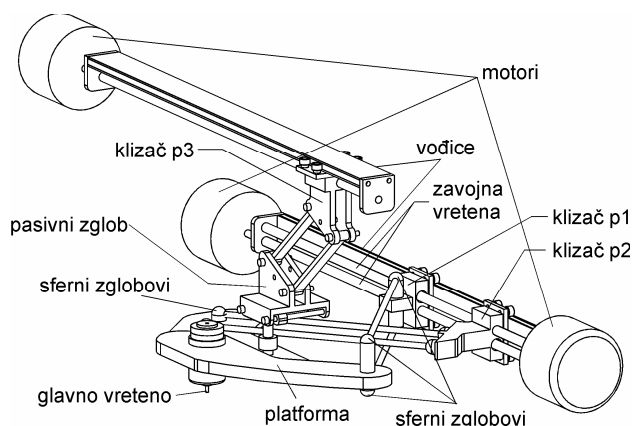
**Slika 1.** Načini realizacije edukacionih mašina sa paralelnom kinematikom

<sup>1)</sup> dr Miloš Glavonjić, vanredni profesor ([mglavonjic@mas.bg.ac.yu](mailto:mglavonjic@mas.bg.ac.yu)), mr Saša Živanović, asistent ([szivanovic@mas.bg.ac.yu](mailto:szivanovic@mas.bg.ac.yu)), dr Dragan Milutinović, redovni profesor ([dmilutinovic@mas.bg.ac.yu](mailto:dmilutinovic@mas.bg.ac.yu)), Mašinski fakultet, Beograd, Zoran Dimić, dipl. inž, LOLA Institut, ([zoran.dimic@sbb.co.yu](mailto:zoran.dimic@sbb.co.yu)).

<sup>2)</sup> Radeno u okviru projekta: MIS.3.02.0101.B Troosne paralelne mašine, projekta TR6309B Petoosne paralelne mašine, i u okviru priprema za prijavu projekata: Razvoj tehnologija višeosne obrade složenih alata za potrebe domaće industrije (evidencioni broj 14034).

Konfigurisanje ove edukacione mini mašine sa paralelnom kinematikom realizovano je u okviru projekta Troosne paralelne mašine [2,3]. Namera je bila da se naprave: fizički model, srazmeran sa napravljenom mašinom i edukaciona mašina alatka sa paralelnom kinematikom, kao učilo. U ispitivanju ovog fizičkog modela planirani su provera mehanizma u radu i njegovog ponašanja blizu singularnih pozicija i mogućnost obrade mekih materijala. Od početka je planirano da se na modelu osnaže pogoni na osama pomoćnog kretanja, ali i na glavnom vretenu. Pored istraživačkih ciljeva, u okviru projekta, primena ovog modela je istovremeno planirana i u edukacione svrhe. Na Mašinskom fakultetu u Beogradu, na Katedri za proizvodno mašinstvo, već postoji višegodišnja tradicija održavanja laboratorijskih vežbi sa temom mašina sa paralelnom kinematikom. Do sada su ove vežbe bile u okviru predmeta Mašine alatke, a ubuduće će se izvoditi u okviru predmeta Mašine alatke i roboti nove generacije. Laboratorijske vežbe se stalno osavremenjuju novim učilima, modelima mašina, uređajima, simulatorima i edukacionim mašinama.

## 2. MODELIRANJE KINEMATIKE EDUKACIONE MAŠINE pn101

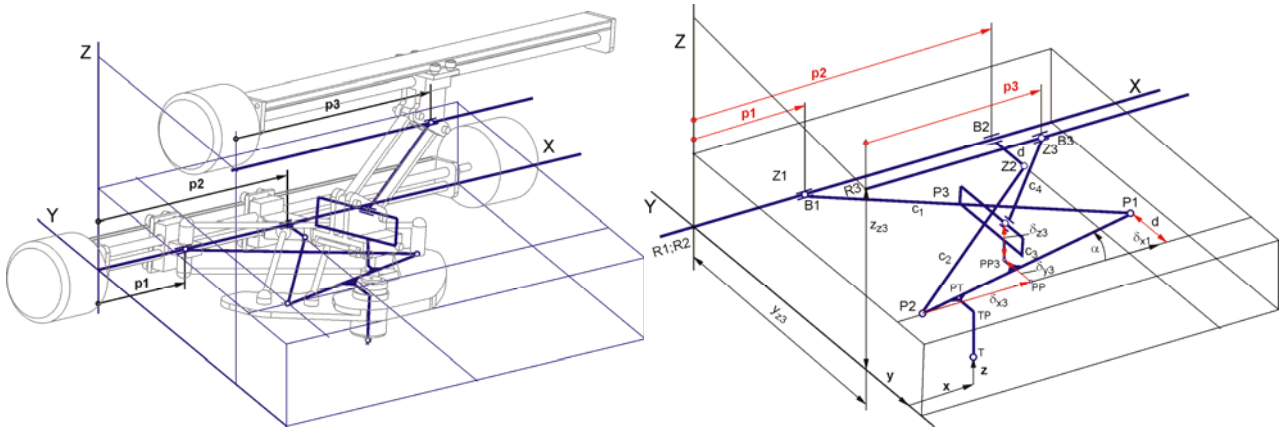


**Slika 2.** Model paralelnog mehanizma pn101[4]

ručnim okretanjem zavojnih vretena, radi početnih provera stabilnosti i rada paralelnog mehanizma. Zatim su dodati i motori za ove tri translatorne ose. I ovde su provere vršene za dve varijante. U prvoj su upotrebljena tri motora jednosmerne struje. Sa njima je izvršen eksperiment obrade konture radnog prostora, slika 2. Zatim su upotrebljena tri elektrokoračna motora (EKM), koji su bili pogodni za upravljanje pomoću sistema na PC platformi i komunikacije preko paralelnog porta, a primenom softvera EMC. Motor glavnog vretena je ugrađen u čauru glavnog vretena, koja je vezana za pokretanu platformu. Ona je pomoću dva para spojki sfernim zglobovima vezana za klizače p1 i p2. Sa trećim klizačem (p3) platforma je vezana pomoću pasivnog translatorno obrtnog zgloba, slika 2. Komponente modela pretežno su napravljene od aluminijuma (vođice, klizači, čaura glavnog vretena), da bi bile što lakše. Platforma je napravljena od plastike. Zavojna vretena su kupljena, dok je noseća struktura napravljena kao zavarena konstrukcija od šipkastog i cevastog materijala kvadratnog poprečnog preseka. U realizaciji ovog modela posebnu pažnju zaslužuju sferni zglobovi, jer su napravljeni pomoću magneta. Naime, zglobovi su napravljeni pomoću kugli prečnika 12 mm iz kugličnih ležaja, koje su zalepljene za spojke paralelnog mehanizma. Te kugle na krajevima spojki drže se priljubljene uz konusne upuste na platformi i pogonskim osama pomoću magneta.

### 2.1 Kinematika paralelnog mehanizma pn101

Geometrijski model sa slike 2 je, za potrebe konkretnih izračunavanja i dobijanja ekvivalentnog kinematičkog modela, uprošćen na jednostavniji žičani kinematički model, prikazan na slici 3. Svaki par spojki je zamenjen srednjom spojkom, a platforma linijom između tako osrednjenih zglobova, koji su obeleženi sa P1 i P2, slika 3. Translatorsno obrtni zglob takođe je zamenjen linijama i klizačem. Kinematički model sa parametrima za rešavanje inverzne i direktne kinematike dat je na slici 3. Taj model je osnovni i ima zglobove na bazi Z1, Z2 i Z3 i zglobove na platformi P1, P2 i P3. Klizači translatorsnih pogonskih osa su B1, B2 i B3. Koordinate tih karakterističnih tačaka mehanizma na bazi su: B1(p1; 0; 0); B2(p2; 0; 0); B3(p3; y<sub>z3</sub>; z<sub>z3</sub>); Z1≡B1; Z2(p2;-d;0); Z3≡B3. Na pokretanoj platformi karakteristične tačke su: P1(x<sub>p2</sub> + δ<sub>x1</sub>; y<sub>p2</sub> + d; z<sub>p1</sub>); P2(x<sub>p2</sub>; y<sub>p2</sub>; z<sub>p2</sub>); P3(x<sub>p2</sub> + δ<sub>x3</sub>; y<sub>p2</sub> + δ<sub>y3</sub>; z<sub>p2</sub> + δ<sub>z3</sub>), gde je podešeno da bude d = c<sub>3</sub> sin α i z<sub>p1</sub> = z<sub>p2</sub>, što bitno uprošćavaju rešavanje inverznog i direktnog kinematičkog problema. Koordinatni sistem mašine postavljen je po standardu za vertikalne glodalice. Još je odabrano da osa X bude duž pogonskih osa p1 i p2, a da koordinatni početak bude u krajnjoj levoj poziciji pogonske ose p1.



**Slika 3.** Kinematički modeli polazne koncepcije paralelnog mehanizma pn101, sa parametrima [4]

Na osnovu kinematičkog modela mogu se uspostaviti sledeće geometrijske jednačine:

$$c_4^2 = (p_3 - x_{p3})^2 + (z_{z3} - z_{p3})^2 ; c_2^2 = (p_2 - x_{p2})^2 + (y_{p2} + d)^2 + z_{p2}^2 ; c_1^2 = (x_{p1} - p_1)^2 + (y_{p2} + d)^2 + z_{p1}^2 \quad (1)$$

Rešenje **inverznog kinematičkog problema** dobijeno je na osnovu kinematičkog modela i polaznih jednačina (1):

$$p_3 = x_{p3} + \sqrt{c_4^2 - (z_{z3} - z_{p3})^2}, p_2 = x_{p2} + \sqrt{c_2^2 - ((y_{p2} + d)^2 + z_{p2}^2)}, p_1 = x_{p1} - \sqrt{c_1^2 - ((y_{p2} + d)^2 + z_{p1}^2)} \quad (2)$$

Sva izračunavanja se vrše za repernu tačku P2. Od nje se lako može preračunati položaj vrha alata T(x,y,z), kao  $x = x_{p2} + \delta_{xTP}$ ,  $y = y_{p2} + \delta_{yTP}$ ,  $z = z_{p2} - h$ , gde je  $h$  prepust sklopa glavnog vretena i alata.

Glavni parametri ove mašine su:  $c_1, c_2, c_3, c_4, \alpha$  i  $d$ . Parametri mehanizma su:  $\delta_{x1}, \delta_{y1}, \delta_{z1}, \delta_{x3}, \delta_{y3}, \delta_{z3}$ , gde su, na primer,  $\delta_{x1} = c_3 \cos \alpha$ ,  $\delta_{y1} = d = c_3 \sin \alpha$ ,  $\delta_{z1} = 0$  itd. Ključni parametri na realizovanoj edukacionoj mašini pn101 sa paralelnom kinematikom su:  $c_1=200.63$  mm,  $c_2=205.18$  mm,  $c_3=203.8$  mm,  $c_4=100$  mm.

Rešavanje **direktnog kinematičkog problema** (DKP) podrazumeva određivanje spoljašnjih koordinata, odnosno, pozicije vrha alata T(x, y, z) za zadate vrednosti unutrašnjih koordinata, odnosno, translatornih pomeranja ( $p_1, p_2, p_3$ ) pogonskih osa. Rešenje DKP-a se izvodi polazeći od jednačina (1) i prvo se rešava za tačku P2 na platformi sa koordinatama ( $x_{p2}, y_{p2}, z_{p2}$ ). Pomoću nje lako se može izračunati i pozicija vrha alata T. DKP se rešava prvo po  $x_{p2}$ . Oduzime se druga od treće jednačine u sistemu (1) i uvrsti uslov  $z_{p1} = z_{p2}$ . Tako se dobija sledeća jednačina:

$$c_1^2 - c_2^2 = (x_{p1} - p_1)^2 - (p_2 - x_{p2})^2 \quad (3)$$

U jednačinu (3) uvrsti se još i uslov  $x_{p1} = x_{p2} + c_3 \cos \alpha$ , pa se ona reši po  $x_{p2}$ . Rezultat je:

$$x_{p2} = \frac{s_2 - s_1^2 + p_2^2}{2(s_1 + p_2)} \quad \text{Smene su:} \quad s_1 = c_3 \cos \alpha - p_1, \quad s_2 = c_1^2 - c_2^2 \quad (4)$$

Rešenje po  $z_{p2}$  dobija se iz prve jednačine sistema (1) uz uslove  $z_{p3} = z_{p2} + \delta_{z3}$  i  $x_{p3} = x_{p2} + \delta_{x3}$ :

$$(z_{z3} - z_{p3})^2 = c_4^2 - (p_3 - x_{p3})^2 \Rightarrow (z_{z3} - z_{p2} - \delta_{z3}) = \sqrt{c_4^2 - (p_3 - x_{p2} - \delta_{x3})^2} \Rightarrow z_{p2} = z_{z3} - \delta_{z3} \pm \sqrt{c_4^2 - (p_3 - x_{p2} - \delta_{x3})^2} \quad (5)$$

Rešenje po  $y_{p2}$  dobija se iz druge jednačine u sistemu (1):

$$c_2^2 = (p_2 - x_{p2})^2 + (y_{p2} + d)^2 + z_{p2}^2 \Rightarrow (y_{p2} + d)^2 = c_2^2 - (p_2 - x_{p2})^2 - z_{p2}^2 \Rightarrow y_{p2} = -d \pm \sqrt{c_2^2 - z_{p2}^2 - (x_{p2} - p_2)^2} \quad (6)$$

Rešenje direktnog kinematičkog problema za mehanizam pn101, sa konfiguracijom sa slike 3, glasi:

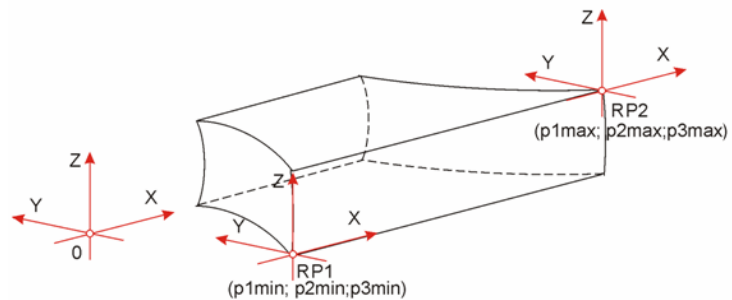
$$\begin{aligned} x_{p2} &= \frac{s_2 - s_1^2 + p_2^2}{2(s_1 + p_2)}, s_1 = c_3 \cos \alpha - p_1, s_2 = c_1^2 - c_2^2 \\ z_{p2} &= z_{z3} - \delta_{z3} - \sqrt{c_4^2 - (p_3 - x_{p2} - \delta_{x3})^2} \\ y_{p2} &= -d - \sqrt{c_2^2 - z_{p2}^2 - (x_{p2} - p_2)^2} \end{aligned} \quad (7)$$

Dobijena rešenja inverznog i direktnog kinematičkog problema ugrađuju su u softver EMC za upravljanje. Za ovu edukacionu troosnom mašinu pn101 sa paralelnom kinematikom korišćeno je samo rešenje inverznog kinematičkog problema jer su za pogone odabrani i instalisani elektrokoračni motori [6].

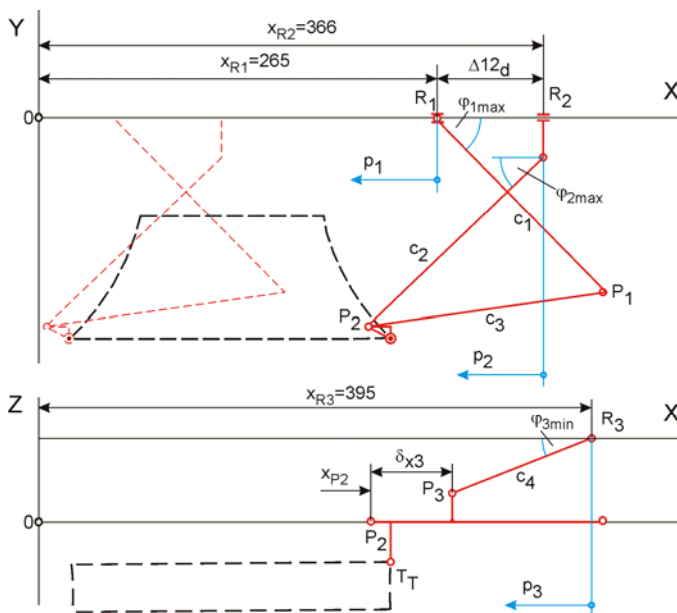
### 3. RADNI PROSTOR

Radni prostor mašina sa paralelnom kinematikom je uobičajeno mali i nepravilnog oblika. Međutim, ovaj paralelni mehanizma ima značajno povoljniji oblik i dobru veličinu radnog prostora u odnosu na radne prostore sličnih mašina. Radni prostor je približniji pravilnom paralelepipedu od radnih prostora drugih sličnih poznatih mašina. Na taj način se objedinjuju dobre osobine paralelnih i serijskih mašina, s obzirom da je pravilan paralelepiped uobičajeni radni prostor mašina sa serijskom kinematikom.

Osnova paralelepipeda je trapezna sa zakrivljenim stranama trapeza. Pravilnost po osi Z ovog mehanizma potiče od translatorno-obrtnog pasivnog zgloba. Primarni uticaj na oblik i mere radnog prostora imaju dužine zglobnih paralelograma  $c_1, c_2, c_3$ , položaji zglobova na pokretnoj platformi, odnosno mera  $c_4$  platforme, kao i položaj vodice za osu  $p_3$ , odnosno njena koordinata po osi Z. Radni prostor ove mašine je izdužen po dominantnoj osi X. Može se još povećati po toj osi i to onoliko koliko se dugim mogu napraviti vodice po ovoj osi.



Slika 4. Moguće referentne pozicije za model mašine pn101



Slika 5. Pozicije referentnih tačaka za izabranu referentnu poziciju RP2 edukacione mašine pn101

Kao referentna tačka mehanizma odabrana je RP2. Sva pomeranja, koja mašina izvodi po osama X i Z tokom obrade su negativna, a po Y osi pozitivna. Referentna tačka RP2 je istovremeno i nulta tačka G54 mašine, koja je aktivna odmah po njenom uključivanju. Položaj paralelnog mehanizma u referentnoj tački

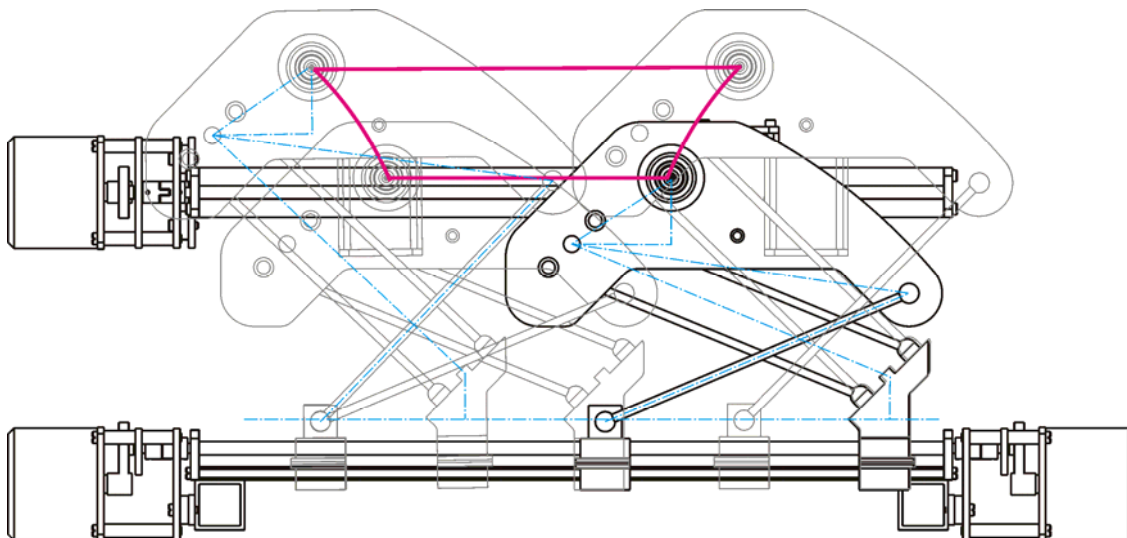
Moguće referentne pozicije za model edukacione troosne mašine sa paralelnom kinematikom pn101 su RP1, kada su sva pomeranja po  $p_1, p_2$  i  $p_3$  minimalna, slika 3, ili RP2, kada su ova pomeranja maksimalna, što je pokazano na slici 4. Osobine ovih pozicija su:

Mašina tipa **RP1**( $p_{1min}, p_{2min}, p_{3min}$ ) ima nepovoljniji ulazak u ovu poziciju jer platforma ide u krajnju donju prednju levu poziciju. Za radni prostor ovakve referentne pozicije bi važno da je  $x_{RP} \geq 0$ ,  $y_{RP} \geq 0$  i  $z_{RP} \geq 0$ .

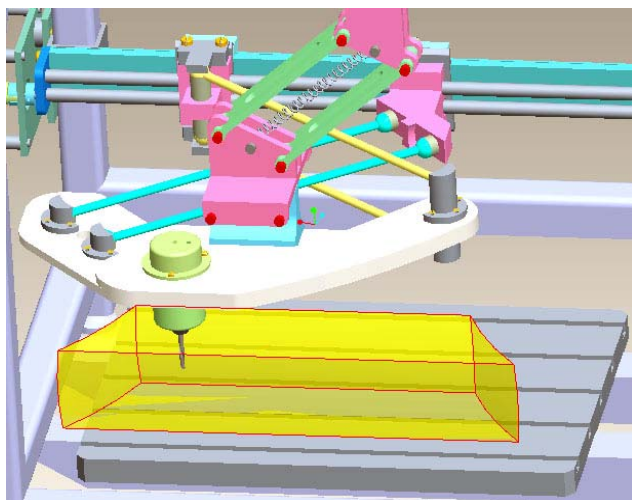
Mašina tipa **RP2**( $p_{1max}, p_{2max}, p_{3max}$ ) ima povoljniji ulazak u ovu poziciju jer platforma ide u krajnju gornju prednju desnu poziciju. Za radni prostor ovakve referentne pozicije bi važno da je  $x_{RP} \leq 0$ ,  $y_{RP} \geq 0$  i  $z_{RP} \leq 0$ .

pokazan je na slici 5, gde su R1, R2 i R3 - referentne tačke pogonskih osa p1, p2 i p3. Na slici 6 pokazana su i četiri karakteristična položaja paralelnog mehanizma i to na konturama njegovog radnog prostora. Ove konfiguracije mehanizma dobijene su tokom simulacije kinematike ovog mehanizma u okruženju Pro/Engineer. Sam radni prostor može da se omeđi njegovim planskim pretraživanjem iznutra, ili spolja i geometrijski. Ovde su iskorišćeni sledeći uslovi za pozicije pogonskih osa prilikom crtanja radnog prostora edukacione mašine pn 101:

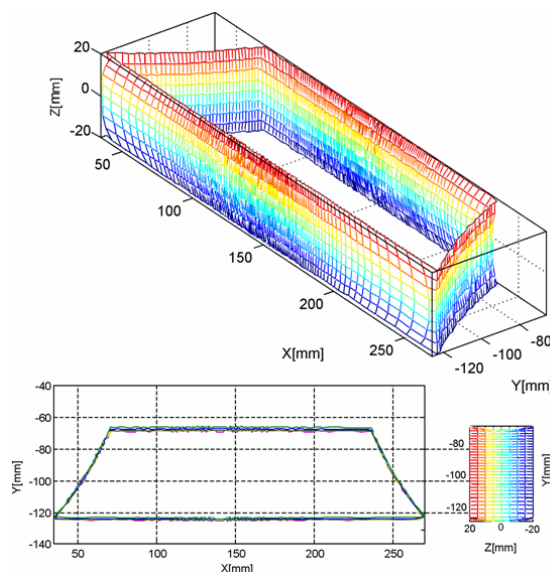
$$\begin{aligned}
 & \bullet p_1 \in [0; x_{R1}] & \bullet p_2 \in [0; x_{R2} - \Delta 12d] \\
 & \bullet p_1 - p_2 \in [0; \Delta 12g - \Delta 12d] & \bullet x_{R3} - p_3 - x_{p2} - \delta_{x3} \in [c_4 \cos \varphi_{3\max}; c_4 \cos \varphi_{3\min}]
 \end{aligned} \quad (8)$$



**Slika 6.** Konture radnog prostora sa prikazom krajnjih položaja mehanizma pn101, pogled odozdo



a) Model radnog prostora kao CAD model



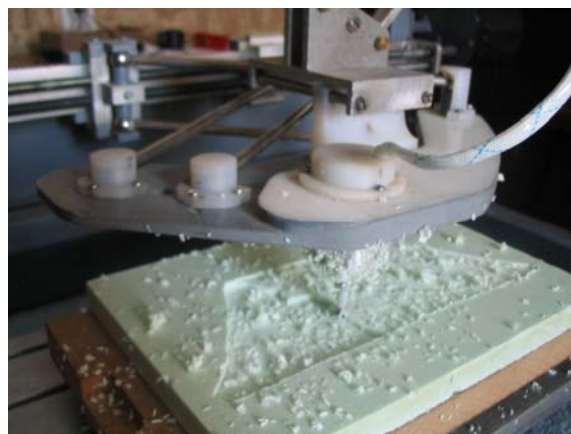
b) Računski model radnog prostora dobijen u okruženju Matlab

**Slika 7.** Radni prostor edukacione troosne mašine pn101 sa paralelnom kinematikom

Konfiguracija mehanizma pn101 bila je polazna pri usvajanju parametara paralelnog mehanizma fizičkog modela, koji je napravljen u razmeri 1:5 u odnosu na projektovane mere realizovanog industrijskog prototipa LOLA pn101\_4 V1 [2,3,4]. Neke od mera na fizičkom modelu su neznatno korigovane u odnosu na izabranu razmeru i to pri detaljnom projektovanju fizičkog modela. Dužine vođica su zavisile od raspoloživih komponenata, pa je radni prostor fizičkog modela sa više izraženim izduženjem X ose, slika 7a). Razmera ključnih parametara paralelnog mehanizma je zadržana. Kriterijumi (8) za kontrolu programa pomoću pozicija pogonskih osa iskorišćeni su i prilikom crtanja radnog prostora u Matlab okruženju primenom IKP i proverom ostvarivosti pozicija po zadatim kriterijumima, slika 7b).



Radni prostor ima trapezni presek u osnovi u koji se dobrim delom može upisati pravougaonik širine 55 mm i dužine 200 mm. I preostali delovi površina radnog prostora oblika dva pravouglata trougla sa zakrivljenom hipotenuzom, mogu se korisno upotrebiti. Na primer desni, može da se koristi za odlazak alata u poziciju za izmenu alata, a levi za potrebe uzimanja korekcija alata.



**Slika 8.** Obrada kontura radnog prostora

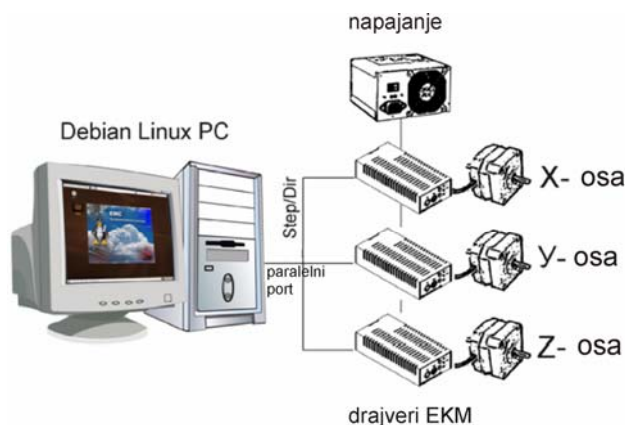
Obrada radnog prostora na modelu mašine je ostvarena u mekanom materijalu (poliuretanu) i pokazana je na slici 8. Prvi eksperiment, sa približnom obradom radnog prostora, ostvaren je u ranoj fazi, dok motori još nisu bili postavljeni, osim motora za glavno kretanje. Zadavanje kretanja je ostvarivano ručno. Drugi eksperiment je ostvaren sa pogonom na osama  $p_1$ ,  $p_2$  i  $p_3$  i ugrađenim motorima jednosmerne struje. Zadavanje kretanja pojedinih osa sa željenim smerom kretanja zadavan je sa upravljačkog pulta. U konačnoj verziji modela postavljeni su elektrokoračni motori za ose  $p_1$ ,  $p_2$  i  $p_3$  i sa njima je realizovano upravljanje edukacione mašine na bazi softvera EMC.

#### 4. UPRAVLJANJE EDUKACIONE MAŠINE pn101 NA BAZI EMC

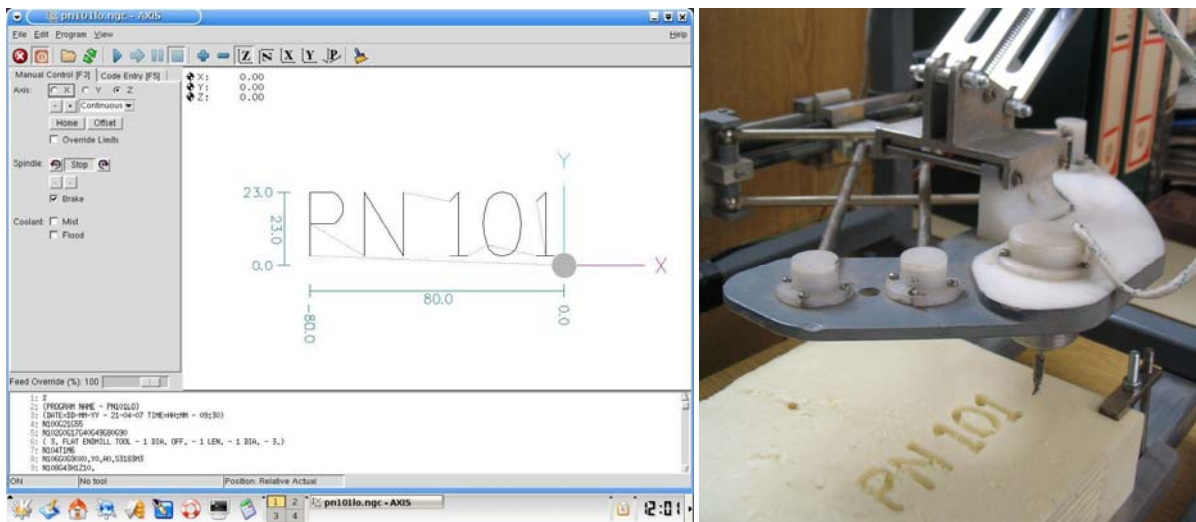
Edukaciona troosna mašina sa paralelnom kinematikom pn101 iskorišćena je za testiranje i verifikaciju upravljanja na bazi EMC (*Enhanced Machine Control*) softvera, koji radi pod operativnim sistemom Linux, slika 9. U slučaju kada se upravlja konkretnim sistemom, tada je neophodno da EMC radi pod verzijom Linux-a koja radi u realnom vremenu i koji obezbeđuje odgovarajući determinizam prilikom izvršavanja programa (tipično 200 ms). U našoj instalaciji je korišćen BDI 4.49, baziran na Debian Linux operativnom sistemu sa *real-time* ekstenzijom. Ovo daje sistemu determinističku upravljivost do oko 100 milisekundi. EMC je izrađen na osnovi NIST-ove RSC (*Real-time Control System*) metodologije i programiran je korišćenjem NIST-ove RCS biblioteke. Za upravljanja fizičkog modela troosne mašine pn101 iskorišćena je sada već prevaziđjena verzija EMC 1 [6,7].

Sistemski softver EMC predstavlja univerzalan *open-source* softverski paket, te je kao takav izuzetno pogodan za konfigurisanje upravljanja, ne samo mašina sa trivijalnom kinematikom, već i specifičnih mašina sa paralelnom kinematikom, kao i robota, za čije upravljanje je neophodna implementacija funkcija inverzne i direktne kinematike, što je ovde bio slučaj. Performanse ovog softvera daju mogućnost da se on upotrebi i za upravljanje petoosnom hibridnom mašinom tipa glodalice, čije je konfigurisanje takođe realizovano [8].

EMC sistemski softver ima mogućnost korišćenja različitih grafičkih interfejsa, kao što su: *Axis*, *Mini*, *TkEmc* i drugi. Najviše je korišćeno prvo okruženje, koje je vrlo intuitivno, sa prepoznatljivim ikonicama, koje olakšavaju prepoznavanje komandi, slika 10.



**Slika 9.** Radno okruženje za edukacionu troosnu mašinu sa paralelnom kinematikom pn101



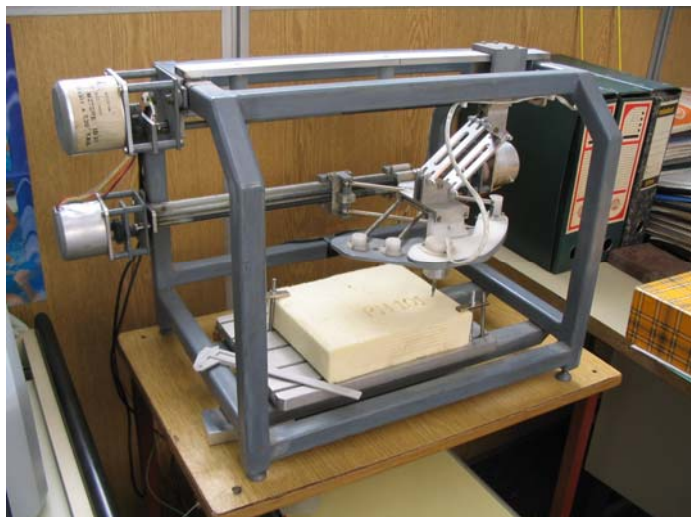
*Slika 10. Simulacija putanje alata u EMC okruženju i obrada na mašini*

Za programiranje su odabrani resursi kojima se programiraju mašine alatke sa serijskom kinematikom. Postprocesiranje se vrši kao za jednu posebnu troosnu glodalicu. Za programiranje treba odabrati proceduru i pripremiti više okruženja za programiranje pn101. Format programa, koji koristi EMC, zasniva se na G kôdu po standardu RS-274. Odabrana je verzija koja je slična formatu programa koje koriste CNC sistemi Fanuc. Za programiranje edukacione troosne mašine sa paralelnom kinematikom pn101 koristi se rešenje inverznog kinematičkog problema, koje je iskorišćeno prilikom konfigurisanja upravljanja pomoću softvera EMC 1. Na taj način programiranje se vrši kao za konvencionalnu serijsku troosnu glodalicu, a sva potrebna preračunavanja se vrše u okruženju EMC 1 u koje je implementirano rešenje IKP. Ovakvo programiranje ima dobru osobinu da ne menja navike programera, koji programiranje ove edukacione mašine vrši kao da je ona mašina sa serijskom kinematikom. Takođe se ne menjaju i navike rukovaoca mašine, što olakšava i rukovanje ovakvim mašinama.

## 5. ZAKLJUČAK

Na primeru gradacije sistema od funkcionalnog simulatora, preko fizičkog modela, do prototipa mašine sa paralelnom kinematikom, pokazan je mogući metod sticanja znanja o jednoj klasi novih mašina alatki i robota. On se zasniva na postepenom uključivanju svih raspoloživih resursa u pravljenje mašine nove generacije. Na primeru konfigurisanja sistema za upravljanje ovako razvijene serije mašina sa paralelnom kinematikom na bazi sistema otvorene arhitekture, stavljenog na raspolaganje bez naknade zainteresovanim inženjerima, pokazano je kako je moguće rešiti najveći problem u razvoju ovih mašina, njihovo upravljanje i programiranje.

U pogledu edukacije inženjera, koji bi radili sa novim mašinama, korisno bi bilo oformiti edukacione centre, koji će u svom sastavu imati mašinu sa paralelnom kinematikom. Međutim, kupiti novu mašinu sa paralelnom kinematikom nije ni malo jeftino. Prvo rešenje je da se pristupi konfigurisanju različitih varijanti pogodnih funkcionalnih simulatora, koji se mogu ugrađivati kao tehnološki moduli na mašine sa serijskim ortogonalnim osama. Drugi način je konfigurisanje edukacionih mini mašina sa paralelnom kinematikom sa sopstvenim pogonima i upravljanjem. Oba ova rešenja podrazumevaju značajno nižu cenu u odnosu na kupovinu jedne nove mašine, a omogućili bi uspešno testiranje upravljanja ovakvim mašinama, obučavanje za rukovanje i programiranje, kao i za izvođenje nastave na predmetima iz ove oblasti, kako je to i urađeno na Katedri za proizvodno mašinstvo Mašinskog fakulteta u Beogradu. Kada dođe vreme novog koncepta numeričkog upravljanja i ovaj pristup će biti podvrgnut reinženjeringu.



*Slika 11. Edukaciona troosna mašina sa paralelnom kinematikom pn101[6]*

Na ovaj način su sticani znanja i iskustvo u upravljanju novim mašinama, potrebni za dalja istraživanja i u pogledu šire implementacije upravljanja na bazi softvera EMC i programiranja obradnih sistema raspoloživim CAD/CAM sistemima. Za formatizovanje programa ostaje klasičan standard RS-274 za G kôd, a u okruženju softvera EMC postoji interpreter tog formata programa. To može biti od značaja i za revitalizaciju upravljanja postojećih mašina alatki i robota. Tako je u pripremi projekat koji se bavi konfigurisanjem rekonfigurabilnog multifunkcionalnog višeosnog obradnog sistema za obradu mekših materijala, na bazi raspoloživog šestoosnog robota domaće proizvodnje, LOLA 50, sa velikim radnim prostorom i nosivošću od 50 kg. Za upravljanje tog sistema planirano je korišćenje nove verzije softvera. To je EMC 2. Potrebno je ostvariti konfigurisanje jednog ovakvog obradnog sistema s obzirom na njegovu kinematiku i radni prostor i analizirati vrste i raspored pomoćnih dopunskih translatorskih i obrtnih osa u cilju kompletne obrade delova velikih gabarita i izuzetno složenih površina. Ovaj obradni sistem će se koristiti u istraživanjima tehnologije višeosne obrade, kao i za edukacionu namenu, u okviru predmeta Mašine alatke i roboti nove generacije.

## 6. LITERATURA

- [1] 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 2<sup>nd</sup> International Conference on Manufacturing Engineering ICMEN and EUREKA Brokerage Event, pp.351-361, Kassandra-Chalkidiki, Greece, october, 2005.
- [2] Glavonjić, M., Živanović, S., Milutinović, D., Troosna paralelna mašina pn101, 31. JUPITER konferencija, 27. simpozijum NU - Roboti - FTS, Zbornik radova, ISBN 86-7083-508-8, str.3.1-3.5, Mašinski fakultet, Beograd, Zlatibor, april 2005.
- [3] D. Milutinovic, M. Glavonjic, V. Kvirgic, S. Zivanovic, A New 3-DOF Spatial Parallel Mechanism for Milling Machines with Long X Travel, pp. 345-348, Annals of the Vol54/1, CIRP 2005.
- [4] Glavonjić, M., Milutinović, D. i Kvirgić, V.: Troosni prostorni paralelni mehanizam, mašina alatka i industrijski robot sa tim mehanizmom, Objava prijave patenta broj 645/04, Glasnik intelektualne svojine, № 5, str. 1095-1096, Zavod za intelektualnu svojinu, Beograd, 2006, ISBN 1542-2144.
- [5] Živanović, S., Konfigurisanje jedne troosne mašine sa paralelnom kinematikom, 30. Jubilarno savetovanje proizvodnog mašinstva SCG sa međunarodnim učešćem, Zbornik radova, ISBN 86-7776-009-1, str.119-124, Tehnički fakultet i Viša Tehnička škola Čačak, Vrnjačka banja, septembar 2005.
- [6] 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, ISBN 978-86-7083-592-4, str.3.19-3.24, Mašinski fakultet, Beograd-Zlatibor, maj 2007.
- [7] EMC - Enhanced Machine controller, web site - [www.linuxcnc.org](http://www.linuxcnc.org).
- [8] Glavonjić, M., Milutinović, D., Živanović, S., Dimić, Z., Konfiguracija jedne hibridne petoosne mašine, 33. JUPITER konferencija, 29. simpozijum NU-Roboti-FTS, ISBN 978-86-7083-592-4, str.3.19-3.6, Mašinski fakultet, Beograd-Zlatibor, maj 2007.
- [9] Milutinović, D., Glavonjić, M., Živanović, S., Mašine sa paralelnom kinematikom, VIII.Međunarodni naučno-stručni skup o dostignućima elektrotehnike, mašinstva informatike DEMI 2007, Zbornik radova, str.3-14, Univerzitet u Banja Luci, Mašinski fakultet, Banja Luka, maj, 2007.
- [10] Živanović, S. Konfigurisanje novih mašina alatki, doktorska disertacija u pripremi, Mašinski fakultet, Beograd, 2008.

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

### EDUCATIONAL 3-AXIS PARALLEL KINEMATIC MACHINE

#### Summary

*Parallel kinematic machines (PKM) are still R&D topic in many laboratories although many of them unfortunately, have no PKM at all. Therefore the use of a low cost mini educational 3-axis parallel kinematic milling machine is suggested as a help in the process of acquiring basic experiences in the field of PKM. The developed mini educational 3-axis parallel kinematic milling machine is based on a newly developed 3-DOF spatial parallel mechanism. This paper describes the structure of machine, modelling approach, control algorithms and software based on PC Linux platform.*

**Key words:** *Parallel kinematic machine, modeling, control.*