



KONFIGURISANJE JEDNE TROOSNE MAŠINE SA PARALELNOG KINEMATIKOM

Mr Saša T. Živanović

¹ Mašinski fakultet, Katedra za proizvodno mašinstvo, Beograd, Srbija i Crna Gora, szivanovic@mas.bg.ac.yu

Rezime: U radu je predstavljeno konfigurisanje jednog fizičkog modela troosne mašine sa paralelnom kinematikom (MPK), koja je bazirana na paralelnom mehanizmu pn101. Ovaj model je realizovan još u početnoj fazi istraživanja radi provere polaznih postavki razmatranog paralelnog mehanizma. Kompletan inkubacija ovog modela je ostvarena u CAD/CAM/CAE okruženju, što je doprinelo lakoj zamenljivosti komponentata i promenama pojedinih parametara mehanizma. Rad u ovom okruženju je omogućio i bržu fizičku realizaciju i montažu konačnog fizičkog modela. Fizički model se realizuje sa pogonom tako da je predviđen da može da ostvari kretanja i obradu mekih materijala.

Glavne reči: konfigurisanje mašina, paralelni mehanizam, mašina sa paralelnom kinematikom (MPK)

Configuring of a Three-Axis Parallel Kinematics Machine

Summary: This paper presents configuring of one physical model of three-axis parallel kinematics machine tool (PKM), which is based on pn101 parallel mechanism. This model is realized in the first stage of research for the review of start postulates considering this parallel mechanism. Complete incubation of this model is carried out using CAD/CAM/CAE environment, which lead to the easy replacement of components and change of certain mechanism parameters. This environment enabled a faster physical realization and assembly of final physical model, as well. Physical model is realized with drives and it can make movements and machining of soft materials.

Key words: Machines configuring, parallel mechanism, parallel kinematics machine (PKM)

1. UVOD

Predmet rada je primer konfigurisanja jednog modela mašine sa paralelnom kinematikom. Na ovom primeru se razmatra moguća metodologija za konfigurisanje mašina alatki [1,3]. U opštem slučaju to može biti bilo koja mašina i/ili industrijski robot. U ovom slučaju razmotren je fizički model mašine alatke sa paralelnom kinematikom. Ove mašine u današnje vreme predstavljaju izazov za većinu naučno istraživačkih centara. Do danas postoji veliki broj realizovanih različitih konfiguracija, koje su uglavnom na nivou prototipova. Na taj način ova generacija novih mašina alatki, traži svoje mesto pod suncem za neke buduće poslenike kao korisnike ili graditelje. One su morale da sačekaju razvoj kompjutera, da bi doživele svoja prva komercijalna rešenja, dok su danas realnost i atrakcija na sajmovima tehnike širom sveta.

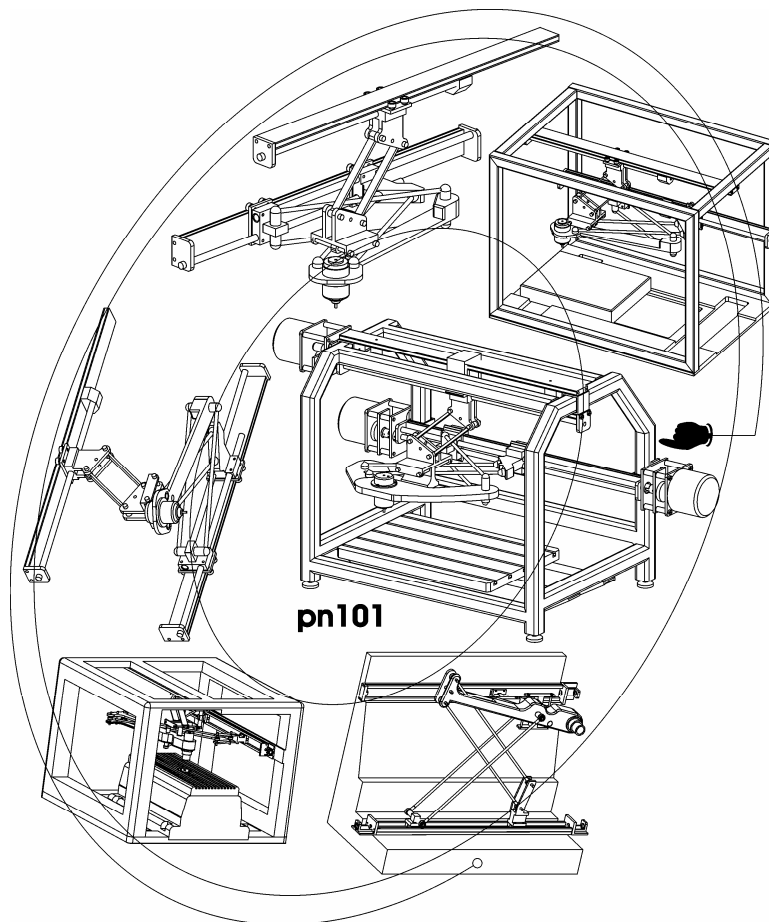
Konfigurisanje ovog modela je započeto u početnoj fazi realizacije projekta Troosne paralelne mašine [4-7]. Namera je bila da se napravi fizički model srazmeran u odnosu na parametre realne mašine. Ispitivanjem ovog fizičkog modela planirana je provera ponašanja i rada mehanizma, singularnih pozicija, mogućnost obrade mekih materijala. Od početka je rođena ideja je da se na modelu osnaže pogoni na osama pomoćnog kretanja i na glavnom vretenu. Realizacijom ovog modela je proveravana mogućnost rada u CAD/CAM/CAE okruženju.

Pored istraživačkih ciljeva, primena ovog modela je planirana i u edukacione svrhe. Na Mašinskom fakultetu u Beogradu već postoji višegodišnja tradicija održavanja laboratorijskih vežbi sa temom mašina sa paralelnom kinematikom, iz predmeta Mašine alatke. Vežbe na ovom predmetu se stalno osavremenjuju, novim učilima, modelima mašina, uređajima i simulatorima mašina sa paralelnom kinematikom.

Poslednjih godina, pokazan je značajan interes istraživanjima na temu paralelnih mašina alatki. Ova popularnost potiče od činjenice da paralelne mašine alatke poseduju neke specifične prednosti u odnosu na njihove serijske konkurente, kao što su veća krutost i sposobnost opterećenja, bolje dinamičke performanse i vrlo jednostavna inverzna kinematika. Da bi se ove pogodnosti ispoljile, parametre mašine treba pažljivo podesiti još u fazi konfigurisanja.

2. EVOLUCIJA FIZIČKOG MODELA TROOSNE PARALELNE MAŠINE pn101

Početa istraživanja su vršena na proračunskim modelima pn101_1 do pn101_4. Da bi konačni parametri za mašinu bili usvojeni za verziju modela pod rednim brojem 4. Inicijalni modeli mašine za prve dve konfiguracije, su bile sa horizontalnim glavnim vretenom, da bi se u daljim istraživanjima usvojila konfiguracija sa vertikalnim glavnim vretenom. Primer ove evolucije pokazan je na slici 1. U početnoj fazi istraživanja razmotrena je i realizovana mogućnost provere rada paralelnog mehanizma kroz gradnju fizičkog modela.

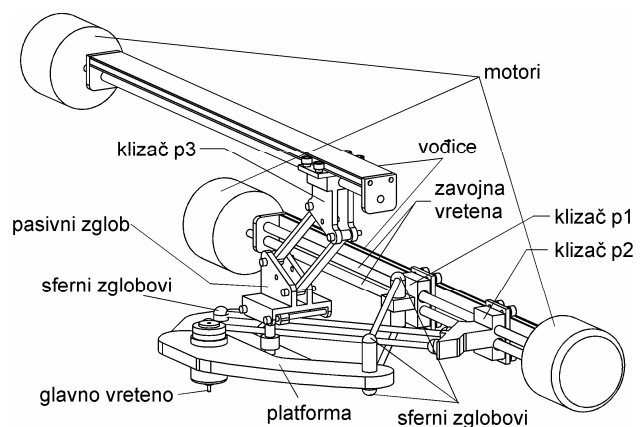


Slika 1. Evolucija modela troosne paralelne mašine pn101

čime bi bilo moguće ostvariti obradu pene (stiropora). Predviđeno je da se na taj način omogući približna obrada udubljenja koje odgovara obliku i veličini radnog prostora. Za početna istraživanja mehanizma, ovo je bilo sasvim dovoljno. U nastavku je predviđeno da se i sve tri ose pomoćnog kretanja, osnaže elektrokoračnim motorima, ili motorima jednosmerne struje, s namerom zadavanja nekih kontrolnih test putanja, koje bi ostvario vrh alata.

2.1 Konfigurisanje paralelnog mehanizma pn101

Kompletna struktura modela mašine je konfigurisana u obliku solid modela u programskom okruženju Pro/Engineer, što je tokom rada omogućilo laku zamenljivost, kombinaciju kao i naknadne dorade modela, do konačnog usvojenog rešenja. Osnovna struktura modela ovog paralelnog mehanizma prikazna na je slici 2. Ovaj paralelni mehanizam je detaljno opisan u [5,6,7]. Prilikom realizacije ovog modela, pošlo se od raspoloživih komponenata, što je istovremeno bio i ograničavajući faktor, koji je uslovio konačan dizajn modela. Prve probe translatornih osa su vršene na klizačima sa točkicama (kotrljajna verzija). Zbog malih dimenzija modela i teškoće

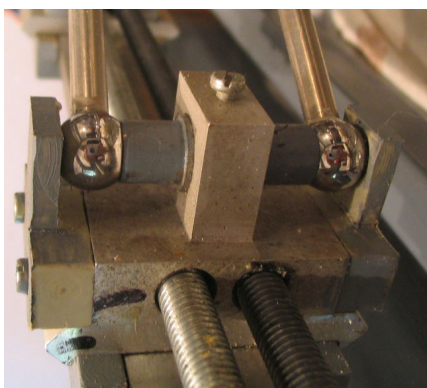
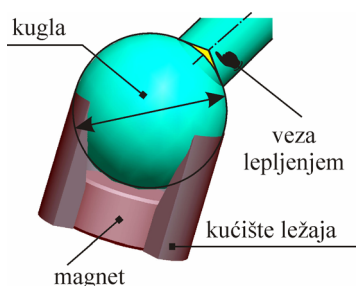


Slika 2. Model paralelnog mehanizma troosne paralelne mašine pn101

Fizički model je konfigurisan u umanjenoj razmeri (1:5) u odnosu na originalni model i parametre koji su dobijeni proračunima. S obzirom da se ideja o ovakvoj troosnoj paralelnoj mašini pokazala izvodljivom, pristupilo se modeliranju mašine kao digitalnog CAD modela. Zbog specifičnosti samog mehanizma dobro je da se pre pristupa gradnji industrijskog prototipa, sve još jednom proveriti na umanjenom fizičkom modelu. Ovaj model je istovremeno i edukaciona mašina alatka, koja može da se postavi na školsku klupu. Ima kretanja po tri translatorne ose i glavno obrtno kretanje, kao što je i planirano. U početku je zbog postojećih ograničenja u resursima, model realizovan sa ručnim pomeranjem translatornih osa, pomoću zavojnih vretena koje pomeraju klizače po vodičima. Pogon glavnog vretena koristi mali elektromotor koji je ugrađen u šupljinu pokretne platforme. Jedna od početnih ideja je bila da se u glavno vreteno postavi odgovarajući alat, dok bi se pomoćno kretanje zadavalo ručno,

realizacije kotrljajnih elemenata samostalnom gradnjom, za konačne verziju su usvojeni klizači kao klizni elementi. Pogon na ove translatorne ose se dovodi pomoću zavojnih vretena. Prve probe su vršene 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 montirana 3 elektrokoračna motora (EKM), koji su se pokazali da imaju malu snagu za pokretanje ovih osa, pa su umesto njih ugrađena tri motora jednosmerne struje. Motor glavnog vretena je ugrađen u šupljinu glavnog vretena, koje je vezano 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, da bi bile što lakše, su pretežno napravljene od aluminijuma (vodice, klizači, poklopac GV). Platforma je napravljena od plastike. Zavojna vretena su kupljena, dok je noseća struktura napravljena kao zavarena konstrukcija od šipkastog cevastog materijala kvadratnog poprečnog preseka. U realizaciji ovog modela posebnu pažnju zaslužuju sferni zglobovi, jer je iskorišćena ideja magnetnih zglobova. Naime zglobovi su napravljeni pomoću kugli iz kugličnih ležaja prečnika 12 mm, koje su zalepljene lepkom za merne trake za spojke paralelnog mehanizma. Zglobovi na spojka su kugle koje se drže priljubljene na konusne upuste pomoću magnet. Jaki magnet se nalazi u kućištu, sa konusnim udubljenjem na koji naleže privučena metalna kugla, dajući fini sferni zglob malih dimenzija, idealan za potrebe ovako malog paralelnog mehanizma. Na taj način se ostvaruje dovoljno jaka veza bez zazora, što je vrlo važno za ispravan rad paralelnog mehanizma. Realizacija zglobova je pokazana na slici 3. Kasnije su na ove zglobove dodati i odgovarajući poklopci i držači radi dodatne sigurnosti.

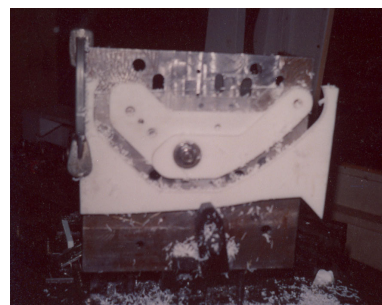
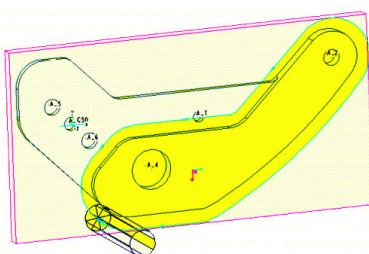
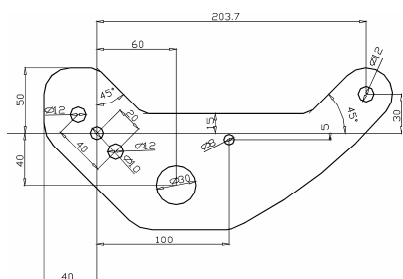


Slika 3. Zglobovi paralelnog mehanizma na bazi stalnih magnet

Alat se navlači na glavno vreteno, direktno ili pomoću reducir čaure. S obzirom da otpori rezanja pene nisu veliki, naleganje između alata i vretena je dovoljno da prenese obrtanje na alat bez proklizavanja. Kao alat za probnu obradu koristi se specijalno malo vretenasto glodalo sa dva zuba. Iz ranijih iskustava pri gradnji modela ovakvih mini mašina [2], kao alati mogu se koristiti i zubarska glodala. Za njihovu primenu zbog malog prečnika potrebno je napraviti i odgovarajuću reducir čauru, radi prilagođavanja prečnika za postavljanje na glavno vreteno.

Zahvaljujući primeni Pro/Enginner-a u procesu modeliranja komponenata mašine, prilikom izrade dokumentacije za obradu pojedinih delova, crteži su generisani automatski, a onda su prema potrebama doradivani. Sve naknadne izmene modela su automatski bile vidljive u već generisanim crtežima. Obrada komponenata za ovaj model je ostvorena primenom CAD/CAM sistema, slika 4.

Vrlo važna pozicija je platforma paralelnog mehanizma. Na njoj se nalaze otvori koji se koriste pri montaži zglobova i spojki mehanizma. Ove otvore je trebalo objediniti jedinstvenom platformom, skladnog oblika i funkcionalnog dizajna. Naime treba imati u vidu da se na platformi nalaze glavno vreteno, zglobovi i nosač za translatorno obrtni zglob. Sve pozicije na platformi su važni parametri mašine, od esencijalnog značaja za rad paralelnog mehanizma. Dizajn i oblik platforme je pretrpeo dosta izmena tokom konfigurisanja. Konačni dizajn i etape u realizaciji platforme, od crteža do obrade, pokazane su na slici 4.



a) Radionički crtež

b) Simulacija obrade okruženju

c) Obrade platforme na HMC500

Slika 4. Pokretana platforma od crteža do obrade na mašini

Provera montaže komponenata u sklopove je vršena još u fazi modeliranja. Za potrebe sklapanja svih podsklopova i delova paralelnog mehanizma korišćen je kinematički model, za koji je potrebno bilo rešenje inverznog kinematičkog problema, koje je dato u narednom poglavlju. Po ostvarenoj simulaciji montaže, generisana je tehnička dokumentacija i pristupilo se izradi komponenata.

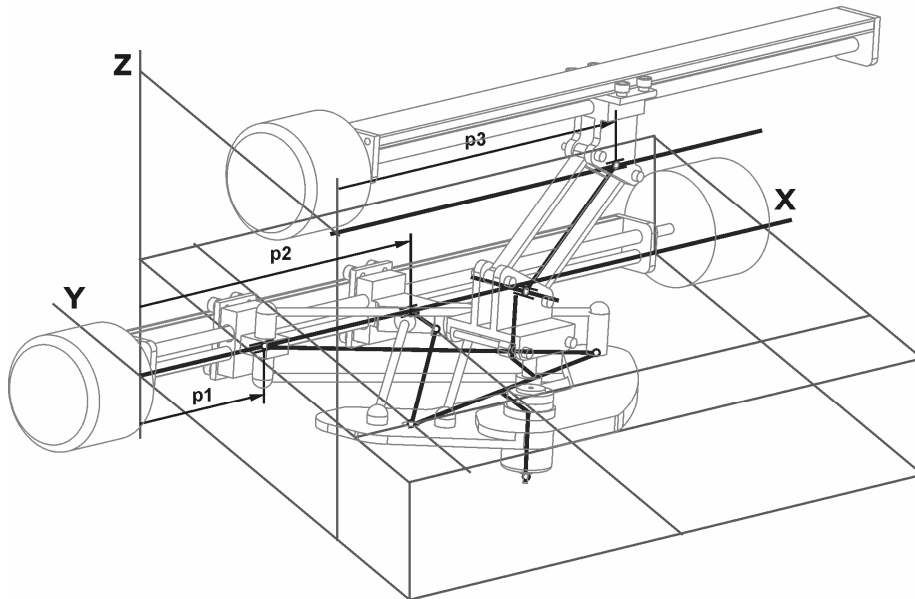
2.2 Kinematički model

Geometrijski model sa slike 2 se za potrebe konkretnih izračunavanja i dobijanja ekvivalentnog kinematičkog modela, uprošćava na jednostavniji žičani kinematički model, prikazan na slikama 5 i 6. Svaki par spojki se zamenjuje srednjom spojkom, a platforma linijom između tako osrednjenih zglobova, koji su obeleženi sa P1 i P2, slika 6. Translatorsno obrtni zglob je takođe zamenjen linijama i klizačem. Kinematički model sa parametrima za rešavanje inverzne i direktne kinematike dat je na slici 6. Koordinate karakterističnih tačaka mehanizma na bazi su : B1(p1; 0; 0); B2(p2; 0; 0); B3(p3; y_{z3}; z_{z3}); Z1=B1; Z2 (p2; -d; 0); Z3 = B3 ; Na pokretanoj platformi karakteristične tačke su: P1 (x_{p2} + δ_{x1}; y_{p2} + d; z_{p2}); P2 (x_{p2} + δ_{x3}; y_{p2} + δ_{y3}; z_{p2} + δ_{z3}), gde je $d = c_3 \sin \alpha$. Na osnovu kinematičkog modela mogu se uspostaviti sledeće geometrijske jednačine:

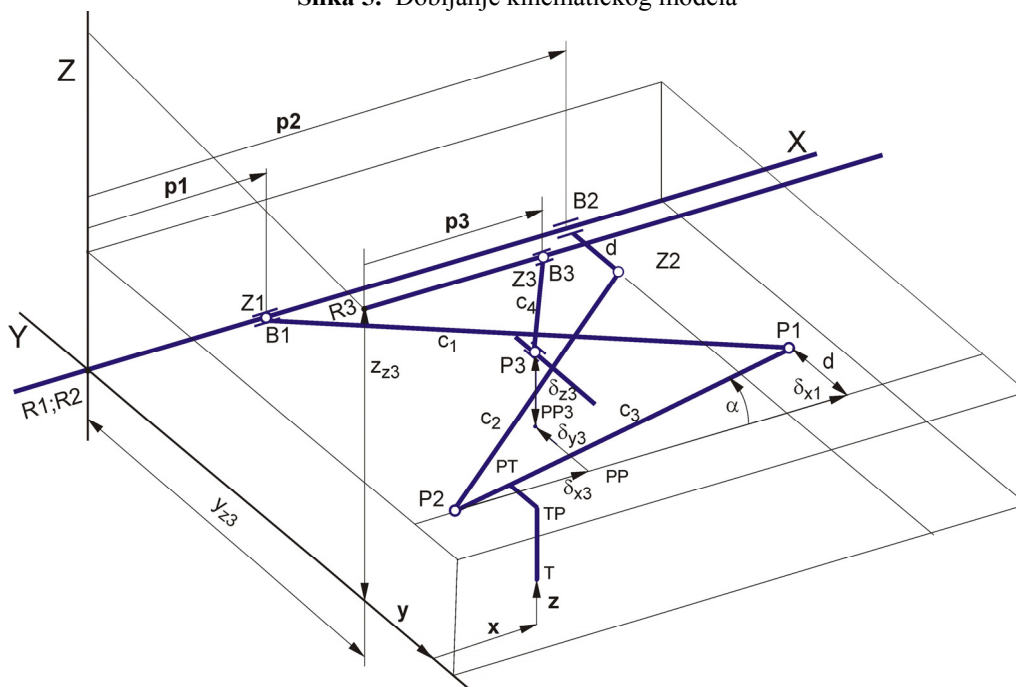
$$c_4^2 = (p_3 - x_{p3})^2 + (z_{z3} - z_{p3})^2; c_2^2 = (p_2 - x_{p2})^2 + (y_{p2} + d)^2 + z_{p2}^2; c_1^2 = (x_{p1} - p_1)^2 + (y_{p2} + d)^2 + z_{p1}^2 \quad (1)$$

Rešenje inverznog kinematičkog problema dobijeno je na osnovu kinematičkog modela i polaznih jednačina :

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



Slika 5. Dobijanje kinematičkog modela



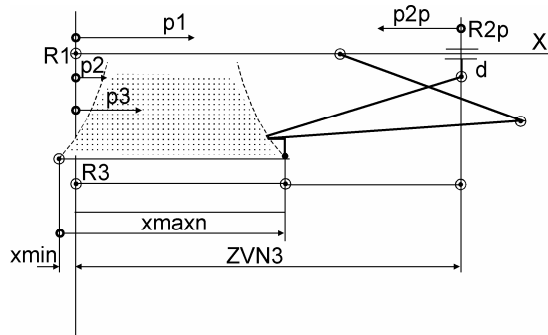
Slika 6. Kinematički model sa parametrima [5]

Sva izračunavanja se vrše prema repernoj tački P2, od koje se lako može preračunati položaj vrha alata. Zadaje se: $c_1, c_2, c_3, c_4, (\alpha, d)$. Računa se sa (x_{p2}, y_{p2}, z_{p2}) , ili sa (p_1, p_2, p_3) . Neki od parametara mehanizma su: $\delta_{x1}, \delta_{x3}, \delta_{y3}, \delta_{z3}$, gde su $(\delta_{x1} = c_3 \cos \alpha)$; $(\delta_{y1} = d = c_3 \sin \alpha)$. Osnovni parametri realne mašine kao industrijskog prototipa su: $c_1=1003\text{mm}$, $c_2=1026\text{mm}$, $c_3=1019\text{mm}$, $c_4=500\text{mm}$. Odgovarajući parametri na realizovanom fizičkom modelu ove mašine su pet puta manji, odnosno: $c_1=200.63\text{mm}$, $c_2=205.18\text{mm}$, $c_3=203.8\text{mm}$, $c_4=100\text{mm}$.

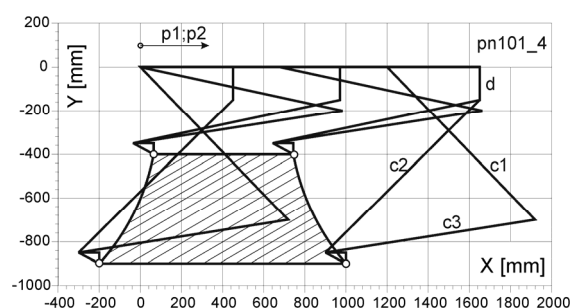
2.3 Radni prostor

Za izabranu varijantu paralelnog mehanizma konfigurisano je pet kombinacija, variranjem parametara mehanizama za mašinu pn101. To su konfiguracije pn101p_1 do pn101p_5. Intuitivno je zaključeno da bi konfiguracija pn101p_4 bila najbolja za potrebe ove mašine. Ova konfiguracija je bila polazna pri usvajanju parametara paralelnog mehanizma fizičkog modela, koji je napravljen u razmeri 1:5. Neke od dimenzija na fizičkom modelu su neznatno korigovane u odnosu na izabranu razmeru pri detaljnom projektovanju fizičkog modela. Međutim, razmera ključnih parametara paralelnog mehanizma je ispoštovana.

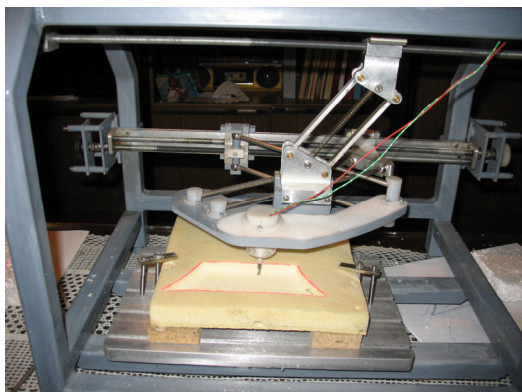
Radni prostor mašina sa paralelnom kinematikom je uobičajeno mali i nepravilnog oblika. Osobina ovog paralelnog mehanizma je značajno povoljniji oblik i veličina radnog prostora u odnosu na radne prostore sličnih mašina. Radni prostor je približniji pravilnom paralelopipedu od radnih prostora drugih sličnih poznatih MPK. Na taj način se objedinjuju dobre osobine paralelnih i serijskih mašina, s obzirom da je pravilan paralelopiped uobičajeni radni prostor mašina sa serijskom kinematikom. Osnova paralelopipeda je trapezna sa zakrivljenim stranama trapeza. Pravilnost po Z osi ovog mehanizma potiče od translatorno-obrtnog pasivnog zgloba. Na dimenzije radnog prostora od primarnog uticaja su, kao što se vidi sa slike 6, odnosno u jednačinama (1) do (3) dužine zglobnih paralelograma c_1, c_2, c_3 , položaji zglobova na pokretnoj platformi odnosno dimenzija c_4 platforme, kao i položaj vođice za osu p_3 odnosno njena koordinata po Z osi. Radni prostor ove mašine je izdužen po dominantnoj X osi. Može se još povećati po X osi i to onoliko koliko se dugim mogu napraviti vođice po ovoj osi. Crtež radnog prostora sa referentnim tačkama na pogonskim osama p_1, p_2 i p_3 , pokazan je na slici 7a, gde su: R1 i R3 - referentne tačke pogonskih osa p_1 i p_3 , x_{min} - pozicija krajnje leve tačke na konturi radnog prostora u ravni (XY), R2p - referentna tačka pogonske ose p_2 , d - ispust baze Z2 na pogonskoj osi p_2/p_2p . Četiri karakteristična položaja paralelnog mehanizma (u originalnoj razmeri), na konturi šrafiranog radnog prostora pokazani su na slici 7b. Obrada radnog prostora na modelu mašine je ostvorena u mekanom materijalu (pur pena) i pokazana je na slikama 7c i 7d.



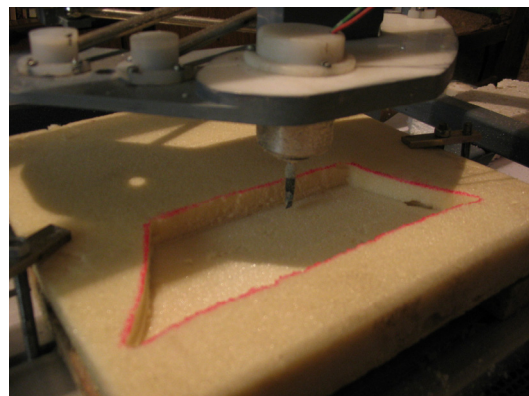
a) Radni prostor sa referentnim tačkama pogonskih osa



b) Kontura radnog prostora sa konfiguracijom mehanizma pn101_4 u karakterističnim pozicijama



c) Obrađeni radni prostor na modelu mašine



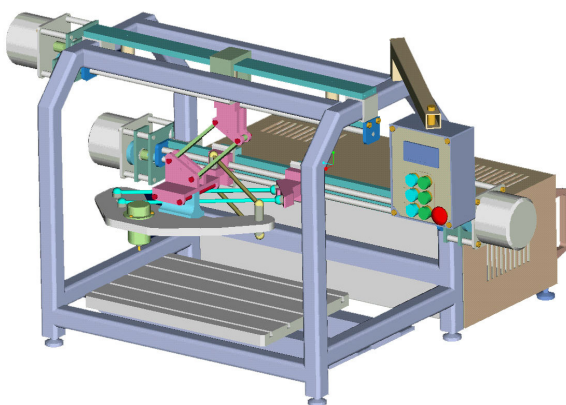
d) Obrađeni radni prostor

Slika 7. Radni prostor pn101

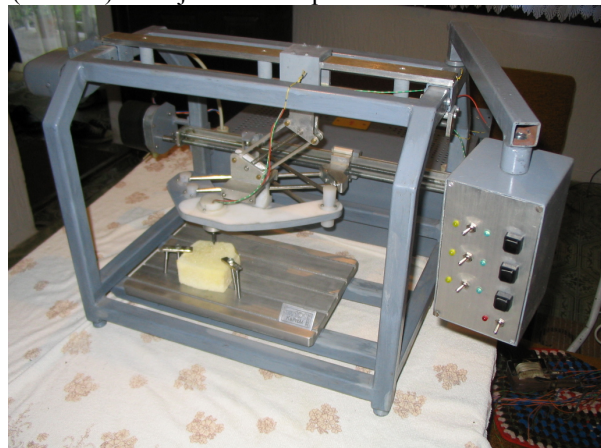
Radni prostor ima trapezni presek u osnovi u koji se dobrim delom može upisati pravougaonik širine 500 mm (posmatrano u odnosu na original, razmera 1:1). I preostali delovi površina radnog prostora oblika dva pravouglata trougla sa zakrivljenom hipotenuzom, mogu se korisno upotrebiti. Na primer desni, može da se koristi za odlazak alata u poziciju za automatsku izmenu, a levi za potrebe uzimanja korekcija alata.

3. ZAKLJUČAK

Na osnovu uvida u postojeća dostignuća u pogledu realizacije mašina alatki i sopstvenih istraživanja, u radu se prava znanja planiraju ostvariti metodom nedovršene koncepcije, koji bi se mogao iskazati kao pristup po kome je bolje samostalno koncipirati i u gradnji odmaći dovoljno daleko na svojoj koncepciji, umesto da se kupi tuđi nedovršeni proizvod. Radi toga je i planirano ostvariti konfigurisanje mašine, kroz odgovarajuću metodologiju, do realizacije prototipa. Cilj je objediniti primenjene metode koje nudi računarska oprema za simultano projektovanje i sazrevanje konfigurisanog rešenja kroz digitalni prototip na kome treba izvršiti različite analize i simulacije, pre izgradnje konačnog proizvoda. Na taj način se period inkubacije digitalnog proizvoda (slika 8a) značajno smanjuje, dok se preslikavanje u fizički model (slika 8b) obavlja sa većom pouzdanošću.



a) CAD solid model (Pro Engineer)



b) Fizički model

Slika 8. Model troosne mašine sa paralelnom kinematikom pn101

4. LITERATURA

- [1] L. Molinari Tosatti, G. Bianchi, I. Fassi, C.R. Boer(2), An Integrated Methodology for the Design of parallel Kinematic Machines (PKM), Annals of the CIRP vol. 46/2/1997, pp.341-345
- [2] Živanović, S., Jedan model tehnološkog modula sa paralelnim mehanizmom, VII Međunarodna konferencija Fleksibilne tehnologije mma 2000 Zbornik radova str. 81-82, Novi Sad, 08. jun 2000.
- [3] S. Živanović, Moguća metodologija konfigurisanja mašina alatki sa paralelnom kinematikom, VIII Međunarodna konferencija Fleksibilne tehnologije mma 2003 Zbornik radova str. 61-62, Novi Sad, jun 2003.
- [4] Glavonjić M., Milutinović D., Živanović S., Troosne paralelne mašine, Elaborati (01,2,3)-03-2003, Mašinski fakultet Beograd, 2003.
- [5] Glavonjić, M., Milutinović, D., Živanović, S., Kvirgić, V., Višnjic, 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.
- [6] 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.
- [7] D. Milutinovic, M. Glavonjic, V. Kvirgic, S. Zivanovic, A New 3-DOF Spatial Parallel Mechanism for Milling Machines with Long X Travel, 2005., Annals of the CIRP