

## **SIMULACIJA KINEMATIKE TROOSNE PARALELNE MAŠINE SA TRANSLATORNO POKRETNIM AKTUATORIMA DUŽ X OSE**

**Saša Živanović<sup>1</sup>, Radomir Ivanović<sup>2</sup>**

**Rezime:** U radu se razmatra simulacija kinematike jedne troosne paralelne mašine. Poznato je da su oblik i veličina radnog prostora slabost većine mašina sa paralelnom kinematikom (MPK). U radu se razmatra razvijeni paralelni mehanizam koji ima povoljniji oblik radnog prostora u poređenju sa sličnim paralelnim mehanizmima. Opisana je struktura paralelnog mehanizma i postavljen kinematički model za sprovedene simulacije kinematike jedne troosne paralelne mašine. Savremeni trend razvoja novih mašina alatki zahteva i novi pristup projektovanju, koji zahteva od konstruktora da njegov dizajn bude detaljno analiziran i pre same materijalizacije, što podrazumeva detaljne simulacije rada mašine u početnoj fazi konfigurisanja.

**Ključne reči:** simulacija, mašine sa paralelnom kinematikom

### **SIMULATION OF KINEMATICS OF THREE AXES PARALLEL KINEMATICS MACHINE TOOL WITH LINEAR ACTUATORS ALONG X AXIS**

**Abstract:** This paper presents simulation of kinematics of a three axes parallel kinematics machine. As it is well known, the shape and the size of work area are the weaknesses of the most of the parallel kinematics machine tools (PKM). This paper considers developed parallel kinematics mechanism, which has better shape of work area than similar parallel mechanisms. For one three axes machine tool, the structure of parallel mechanism is described and kinematical model for different analysis and kinematics simulations is given. New trends in development of new machine tools demand a new approach to machine design, which requires from designer that his design is analyzed in detail before it is materialized, which means that the work of machine is simulated in detail in the start phase of new machine design.

**Key words:** simulation, parallel kinematics machines

---

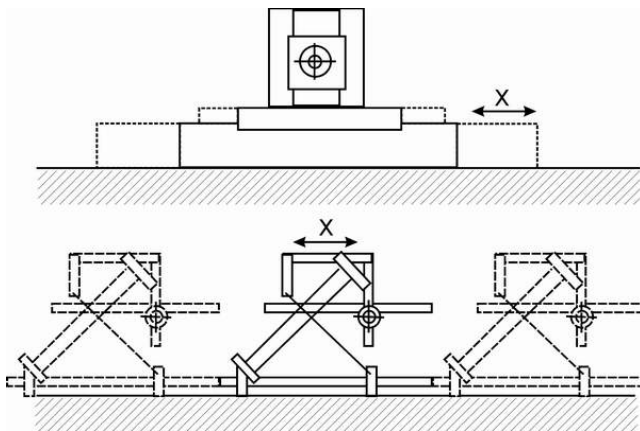
<sup>1</sup> mr Saša Živanović, asistent, Mirilovac, Mašinski fakultet Beograd, KaProM, (szivanovic@mas.bg.ac.yu)

<sup>2</sup> mr Radomir Ivanović, dipl. maš. inž., asistent, B.Grahovo, Mašinski fakultet Beograd, KaProM, (rivanovic@mas.bg.ac.yu )

## 1. UVOD

Funkcionalnost novih proizvoda proverava se na izrađenim prototipovima i/ili primenom softvera za najrazličitije simulacije i analize, koje omogućavaju testiranje pojedinih funkcija novog proizvoda i pre izrade prototipa. Usled toga računari postaju svojevrsni procesori modela, gde se vrši konfigurisanje proizvoda. Model proizvoda se podvrgava najrazličitijim transformacijama, da bi se na izlazu dobio virtuelni (digitalni) prototip, koji se može smatrati dovoljno pouzdanim, da se odmah može krenuti u lansiranje nulte serije. Osnovni predmet istraživanja predstavljen u ovom radu je nova mašina alatka po osnovu svoje konfiguracije, metoda kojima je konfigurisana, metoda za simulacije i analize, za ispitivanje, verifikaciju i optimizaciju. Jedan od veoma značajnih pravaca razvoja tehnologije danas predstavlja razvoj mašina alatki, robota i opreme, na bazi paralelnih mehanizama.

Mogućnost simulacije koja odgovara stvarnim realnim uslovima je vrlo značajna za inženjersko projektovanje posebno kod novih mašina radi identifikacije svih kritičnih mesta na koncepciji u ranoj fazi konfigurisanja. Zbog većeg broja pokretnih elemenata i složenosti paralelnog mehanizma i putanja koje se ostvaruju, kod mašina alatki i robota sa paralelnom kinematikom, potrebno je izvršiti simulacije, provere kretanja, singulariteta, određivanje sila u zglobovima, sila trenja i slično. U ovom radu se razmatra simulacija pomoćnog kretanja jedne troosne paralelne mašine, detaljno opisane u [1,2], koja ima translatorno pokretne aktuatorne duž ose X.



Sl.1 Poređenje duge X ose kod serijske i paralelne mašine alatke

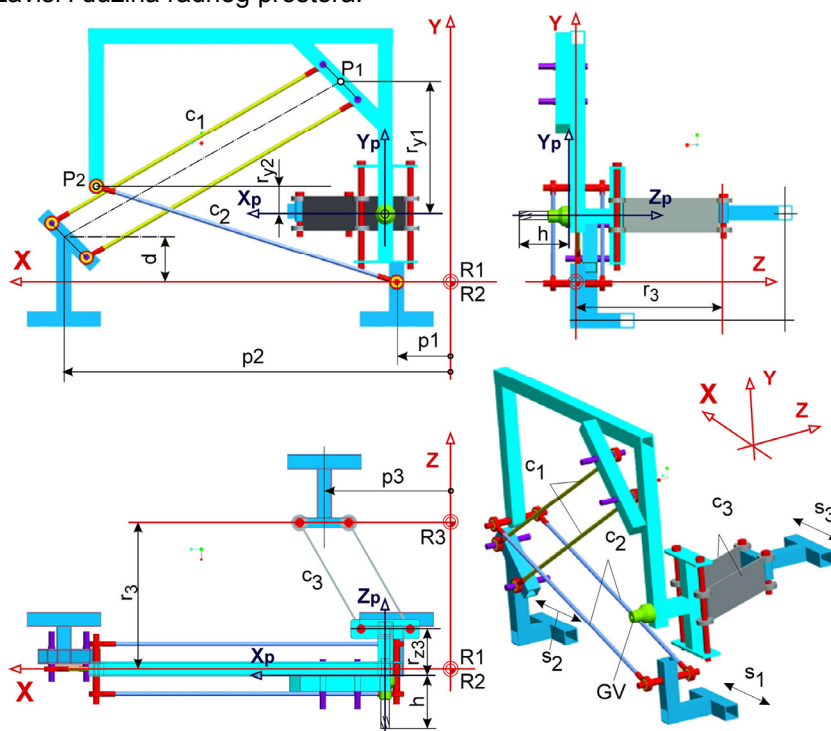
Mašine sa paralelnom kinematikom kao što su Triaglide i Hexaglide, imaju mogućnost izduživanja X ose, koja može biti dugačka onoliko koliko i napravljena vođica po toj osi. To je u poređenju sa tradicionalnim serijskim mašinama mnogo povoljnije nego da serijska mašina ima tako dugu osu. Primer poređenja za ovo tvrđenje dato je na sl.1. Pogodnost mašine sa paralelnom kinematikom ogleda se u mnogo manjoj pokretnoj masi u odnosu na masu stuba obradnog

centra kod serijske mašine. Pomenute paralelne mašine Triaglide i Hexaglide se izvode sa vertikalnim položajem glavnog vretena. U ovom radu se predstavlja paralelni mehanizam na kome je bazirana koncepcija troosne paralelne horizontalne glodalice sa dugačkom X osom u odnosu na Y i Z osu.

S obzirom na poznate karakteristike malog i nepravilnog radnog prostora za mašine sa paralelnom kinematikom, razmatrani troosni prostorni paralelni mehanizam za horizontalnu mašinu sa dominantnim hodom po X osi, ima pogodnosti u pogledu veličine i oblika radnog prostora, koji je pravilan i izdužen u pravcu ose X, što je uobičajeno za mašine sa serijskom kinematikom.

## 2. MODEL TROOSNE PARALELNE MAŠINE

Za potrebe simulacija kinematike realizovan je CAD model u Pro/Engineer okruženju. Zbog specifičnosti samog mehanizma, prve provere su vršene na fizičkom modelu, na osnovu koga je i napravljen CAD model pokazan na sl. 2. Ovaj paralelni mehanizam ima veliki hod po X osi, s obzirom da se pokretni deo mehanizma može istovremeno pomerati po odgovarajućim paralelnim vođicama, tako da od njihove dužine zavisi i dužina radnog prostora.



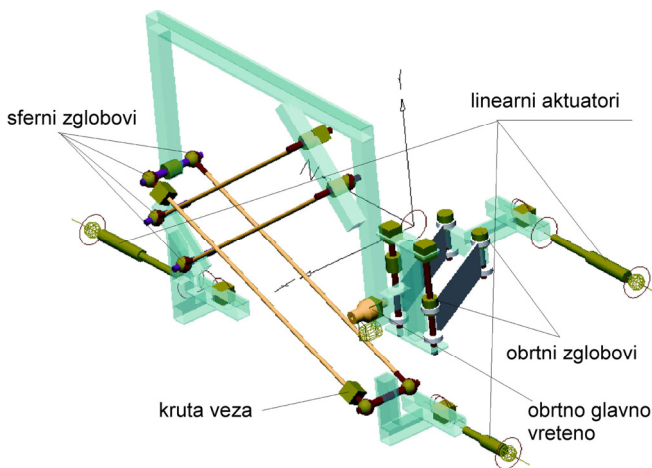
Sl.2 CAD model jedne troosne mašine sa paralelnom kinematikom sa dugom X osom

Kao što se može videti sa sl.2 mehanizam se sastoji od pokretne platforme, ramne konstrukcije na kojoj se nalazi glavno vreteno (GV), tri zglobna paralelograma  $c_1$ ,  $c_2$  i  $c_3$  i tri klizača koji ostvaruju pomeranja  $s_1$ ,  $s_2$  i  $s_3$ . Ovi klizači se kreću po dvema paralelnim vođicama. Dva ukrštena zglobna paralelograma  $c_1$  i  $c_2$ , sa sfernim i/ili univerzalnim odnosno kardanskim zglobovima, su jednim svojim krajevima vezani za pokretnu platformu dok su drugim svojim krajevima vezani za nezavisne klizače  $s_1$  i  $s_2$  koji sa jednom zajedničkom vođicom na bazi čine dva osnažena i upravljana translatorna zgloba. Treći zglobni paralelogram  $c_3$  je jednim svojim krajem, preko pasivnih translatorno-obrtnih zglobova sa 2 stepena slobode, vezan za pokretnu platformu. Svojim drugim krajem je obrtnim zglobovima vezan za klizač  $s_3$  koji sa vođicom na bazi čini treći osnaženi i upravljani translatorni zglob. Pokretanjem klizača  $s_1$ ,  $s_2$  i  $s_3$  se obezbeđuju 3 stepena slobode, tako da platforma pri kretanju u prostoru ostaje paralelna samoj sebi. Referentne pozicije klizača  $s_1$ ,  $s_2$  i  $s_3$  su obeležene tačkama R1, R2 i R3, respektivno. Neki od parametara inicijalne prve verzije

paralelnog mehanizma pn101\_1 su obeleženi na sl.2 i iznose:  $d_0=76.55141$ ;  $r_3=290$ ;  $c_1=699.1733$ ;  $c_2=651.0949$ ;  $c_3=255$ ;  $r_{y1}=231.48423$ ;  $r_{y2}=0$ ;  $r_{z3}=290$ ;  $h=200$ .

### 3. DEFINISANJE KINEMATIČKOG MODELA

Analizi kinematike kretanja u CAE okruženju, prethodi definisanje kinematičkih veza između pojedinih delova, da bi mogla uslediti i analiza kretanja za zadati model. Kompletna geometrijska struktura iz Pro/Engineera se preko formata STEP može učitati u program za analizu kretanja kao što je visual Nastran.



Sl.3 Model za simulaciju troosne paralelne mašine

Kinematički model za analizu pokazan je na sl. 3. Prvo su grupisani svi nepokretni delovi u podsklopove i povezani su krutom vezom (Rigid body). Kretanje klizača  $s_1$ ,  $s_2$  i  $s_3$  definiše se uz kinematička ograničenja njihovog kretanja, samo po pravoj liniji duž X ose (Rigid Joint on Slot). Za definisanje kinematičkih veza korišćeni su: obrtni zglobovi (revolute joint) i sferni zglobovi (spherical joint), kao osnovni tipovi spojeva. Zglobni paralelogrami  $c_1$  i  $c_2$  su za platformu i klizače

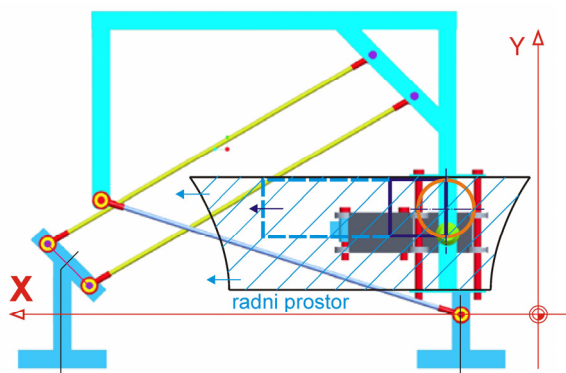
$s_1$  i  $s_2$  vezani sfernim zglobovima, dok je zglobni paralelogram  $c_3$  vezan za klizač obrtnim zglobovom, a za pokretnu platformu pasivnim translatorno obrtnim zglobovom.

Za definisanje aktuatora postoji mogućnost definisanja linearnih i obrtnih aktuatora (Linear Actuator, Revolute Motor). Na modelu su linearni aktuatori iskorišćeni za pogon tri translatorna klizača  $s_1$ ,  $s_2$  i  $s_3$  duž X ose, dok je obrtni motor postavljen u osi GV.

Simulacijama se mogu dobiti: analize kretanja pojedinih aktuatora, veličine i oblika radnog prostora, linearne, kružne interpolacije i slično. Za kretanja po sve tri ose ove paralelne mašine, vršene su analize različitim kombinacijama pomeranja njenih osa, uz posmatranje i analizu položaja glavnog vretena. Pri zadavanju kretanja korišćene su mogućnosti definisanja kretanja preko pomeraja, dok je to moguće uraditi i brzinama aktuatora, ili silama na aktuatorima. Takođe postoji još i mogućnost zadavanja kretanja definišući ubrzanje na aktuatorima.

### 4. ANALIZE ZA DATI MODEL

Za posmatrani model urađene su sledeće analize: analize kretanja pojedinih aktuatora, analiza veličine i oblika radnog prostora (sl.4), analiza linearne i kružne interpolacije, analiza zadavanja kretanja kao funkcionalne zavisnosti i sl. Simulacijom kinematike troosne paralelne mašine, može se doći do informacija o: brzinama i ubrzanjima u pojedinim segmentima, singularitetima paralelnog mehanizma, veličini i obliku radnog prostora, kolizijama koje se dešavaju između pojedinih delova mašine.



Sl.4 Primeri putanja simulacije kretanja u radnom prostoru

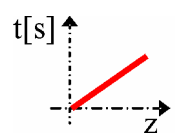
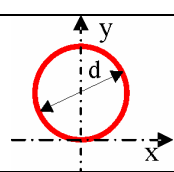
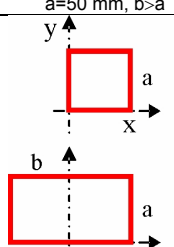
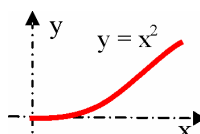
Primeri pomenutih analiza, način zadavanja kretanja i oblik putanje kretanja glavnog vretena je dat u tablici 1. Vršena je simulacija kretanja svake ose (X,Y i Z) ponaosob, kao i kombinovana kretanja kroz različite vrste interpolacija. Pri zadavanju kretanja korišćene su mogućnosti zadavanja kretanja preko pomeraja, brzine aktuatora, i sile na aktuatorima, inače postoji još mogućnost zadavanja kretanja definišući ubrzanje na aktuatorima. Analizirajući kretanja po pojedinim aktuatorima

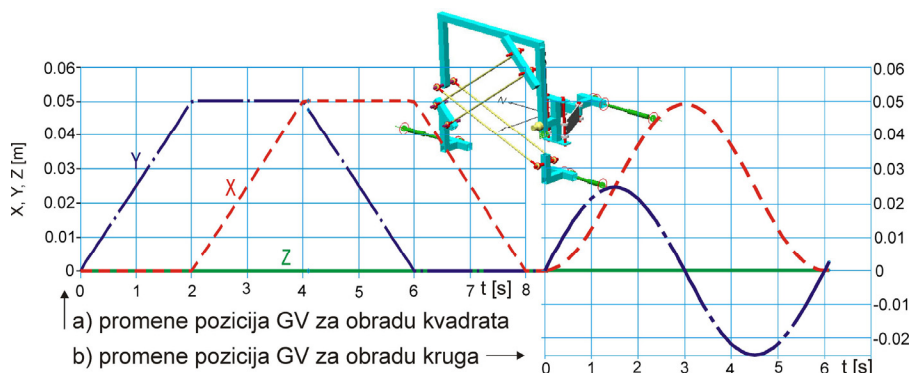
program detektuje sve moguće kolizije između elemenata nakon čega se javlja automatska poruka o ostvarenom kontaktu i da se na dalje usled kontakta na pojedinim delovima očekuju izuzetno velike sile. Ukoliko se zadaju kretanja koja mehanizam ne može da ostvari takođe program generiše poruku o grešci, što su bitne informacije u fazi konfigurisanja mašine.

Radni prostor ovog paralelnog mehanizma je bitno pravilnijeg oblika i podseća na modifikovanu prizmu, osnove oblika trapeza sa zakrivljenim krakovima. Ovakav oblik je posledica prirode samog mehanizma i njegove mere se mogu podešavati promenom parametara paralelnog mehanizma. Ovaj radni prostor se može izdužiti u pravcu X ose i zavisi od dužine translatorsnih aktuatora. Ovakav radni prostor je povoljniji u odnosu na radne prostore sličnih mašina sa paralelnom kinematikom.

Analiza kružne i linearne interpolacija vršene su zadavanjem kretanja glavnog vretena preko funkcija i tablično, što je pokazano u tablici 1. Ostvarena je simulacija kretanja pri bušenju, kružna interpolacija, linearna interpolacija na primeru kvadrata i izduženog pravougaonika, kvadratna interpolacija na primeru parabole.

Tablica 1. Primeri razmatranih putanja glavnog vretena pri simulaciji [4]

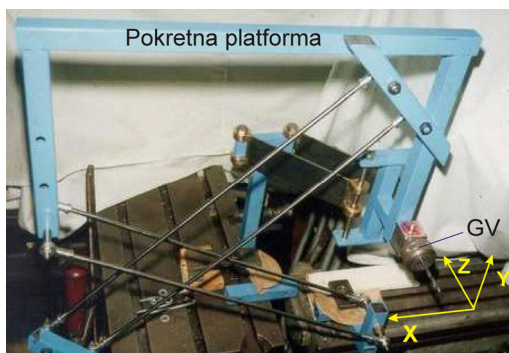
analiza	Primer bušenja kretanje ose Z napred - nazad	Kružna interpolacija primer kruga d=50 mm	Linearna interpolacija primer kvadrata (pravougaonika) a=50 mm, b>a	Kvadratna interpolacija primer parabole $y = x^2$
Kretanje GV				
Zadavanje kretanja	Koristeći funkcije zadavanja kretanja preko formule $z = \text{time} * 0.01 \text{ m/s}$	Koristeći funkcije zadavanja kretanja preko formule $x = 0.025 \text{ m} - 0.025 * \cos(60 * \pi * \text{time} / 180) \text{ m}$ $y = 0.025 * \sin(60 * \pi * \text{time} / 180) \text{ m}$	Koristeći funkcije zadavanja kretanja preko tabele	Kombinovanjem funkcija zadavanja kretanja preko formule i tabele $x = \text{time} * 0.01 \text{ m/s}$ $y$ preko vrednosti u tabeli uz uslov $y = x^2$



Sl.5 Dijagram promene pozicija GV pri simulaciji linearnog i kružnog kretanja

## 5. ZAKLJUČAK

Mašine sa paralelnom kinematikom, kao složeni paralelni mehanizmi, zbog većeg broja pokretnih elemenata i složenosti struktura i putanja zahtevaju složene analize, simulacije i provere kretanja. Na primeru analize kretanja jednog paralelnog mehanizma, dobijeni rezultati su iskorišćeni za potvrdu teorijskih analiza, a uočeni nedostaci su iskorišćeni za poboljšanje kroz rekonstrukciju samog modela, pre gradnje prototipa.



Sl.6 Fizički model troosne paralelne mašine

## LITERATURA

- [1] 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.
- [2] D. Milutinovic, M. Glavonjic, V. Kvrđić, S. Zivanovic, A NEW 3-DOF SPATIAL PARALLEL MECHANISM FOR MILLING MACHINES WITH LONG X TRAVEL, 2005., Annals of the CIRP
- [3] S. Živanović, Modeliranje i simulacije 2D tenoloških modula sa paralelnim mehanizmom, JAHORINA-IRMES 2002, Zbornik radova 2/2, str.445-450, Univerzitet u Srpskom Sarajevu, Mašinski fakultet, Jahorina, 2002.
- [4] R. Ivanović, Analiza softvera za simulaciju kretanja robota i mogućnosti integracije softvera za simulaciju sa komercijalnim CAD softverima na primeru troosnog prostornog paralelnog mehanizma za horizontalnu mašinu sa dugim hodom po x osi, seminarski rad, Mašinski fakultet Beograd, 2002.
- [5] Živanović, S., Ivanović, R., Simulacije kinematike troosne paralelne mašine, 6.Međunarodno savjetovanje o dostignućima elektro i mašinske industrije DEMI 2003, Zbornik radova, str.85-90, Univerzitet u Banja Luci, Mašinski fakultet, Banja Luka, 2003.