



## SIMULACIJE KINEMATIKE TROOSNE PARALELNE MAŠINE

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

**Rezime:** U radu se razmatra simulacija kinematike mašina sa paralelnom kinematikom, na primeru razvijenog fizičkog modela mašine. Kompletna mašina je izmodelirana u Pro/Engineer okruženju, i na bazi takvog modela su vršene razne simulacije kinematike. Simulacija kretanja ne samo da nam omogućava da efektno vidimo model u pokretu, već služi i za složene kinematičke i dinamičke analize. Mogu se uočiti eventualne kolizije u toku kretanja, kao i ponašanje u singularnim pozicijama. Savremeni trend razvoja i plasmana proizvoda zahteva i novi pristup projektovanju. Taj pristup zahteva od konstruktora da njegov dizajn bude detaljno analiziran i pre same materijalizacije. Ovo se postiže korišćenjem CAD paketa za 3D modeliranje, a zatim analizom modela kroz različite softvere za simulacije.

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

### KINEMATIC SIMULATION OF 3DOF PARALLEL MACHINE TOOL

**Abstract:** This paper considers simulation of parallel kinematics machines kinematics on example of developed machine physical model. Complete machine is modeled in Pro/Engineer, and, based on such a model, different kinematics simulations are carried out. Motion simulation provides not only effective visualization of model in motion, but it is also used for complex kinematical and dynamical analyses. Possible collisions during motion, as well as the behavior in singular positions can be noticed. Contemporary product development and placement demands a new design approach as well. This approach demands of design to be detailed analyzed before its materialization. This is achieved by using CAD software for 3D modeling, and by analyzing model, using different simulation software, afterwards.

**Keywords:** simulation, parallel kinematic machine

### 1. UVOD

Savremeni trend razvoja u mašinskom industrijskom kompleksu, karakterišu male serije, česta promena proizvoda, težnja ka povećanju produktivnosti i skraćenju vremena izrade. Pri tome se rapidno skraćuje i period inkubacije i starenja prizvoda, da bi se isti što pre našao na tržištu. Stoga je projektovanje primenom računara, vrlo interesantno, i gotovo neophodno, s obzirom na zahteve tržišta i tempo razvoja računarske opreme. Rašunari koji danas stoje na raspolaganju inženjerima - projektantima su u toj meri sofisticirani da, objektivno ne predstavljaju ograničenje i za najsloženije zahvate, dok sistemi za podršku projektovanju daju takve rezultate da se, čak, ozbiljno razmišlja o eliminaciji potrebe za fizičkom realizacijom prototipova. Veći deo kompanija funkcionalnost svojih novih proizvoda proverava na izrađenim

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

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

prototipovima, softveri za analizu omogućavaju testiranje pojedinih funkcija mehanizama pre izrade prototipa. Usled toga računari postaju svojevrsni procesori modela, gde bi model proizvoda i njegovog procesa rada, bio podvrgnut najrazličitijim transformacijama, da bi na izlazu dobili virtuelni (digitalni) prototip, koji se može smatrati dovoljno pouzdanim.

Rezultati dobijen analizom modela značajno smanjuju troškove i vreme izrade novih proizvoda. Pored toga izvršene analize mogu poslužiti za predviđanje kvaliteta i funkcionalnosti proizvoda što smanjuje rizik i predstavlja dragocene informacije u ranoj fazi procesa projektovanja novog proizvoda. S druge strane za projektanta je veoma značajno da imaju uvid u ponašanje modela u realnim uslovima. Mogućnost simulacije koja odgovara stvarnim realnim uslovima je od prevashodnog značaja za inženjersko projektovanje posebno kod modela sa pokretnim delovima tako da se mogu identifikovati sve kritične tačke u samim modelima ili u procesima kretanja odozgo dole modela sa okolinom. Zbog većeg broja pokretnih elemenata i složenosti mehanizama i putanja, kod mašina alatki i robota sa paralelnom kinematikom, potrebno je izvršiti simulacije, provere kretanja, određivanje sila u zglobovima ili sila trenja i slično. U ovom radu se razmatra kinematička analiza jednog modela troosne paralelne mašine.

## 2. CAD/CAE SOFTVERI I NJIHOVA INTEGRACIJA

Za sve proizvođače CAD/CAM/CAE (CAD Computer Aided Design, CAM Computer Aided Manufacturing, CAE Computer Aided Engineering) softvera danas, zajedničko je da svi pokušavaju da u svom softverskom paketu, koji nude korisnicima, obuhvate sve module potrebne korisniku. Zbog toga značajnije kompanije integrišu u svoje softverske proizvode specijalizovane module za pojedine funkcije drugih firmi ili čak razvijaju i svoje sopstvene softvere. Usled toga imamo da svi softveri za CAE (softveri za simulacije i analize raznih vidova) imaju u sebi sadržane CAD module za geometrijsko modeliranje modela za analizu, dok s druge strane većina CAD softvera ima module za CAE, ali generalna karakteristika svih je da je svako dobar u svom poslu, odnosno CAE modeleri su za modeliranje složenijih kao i realnijih modela neupotrebljivi, a CAD sistemi mogu da se koriste za jednostavnije analize i proračune. Svi značajniji CAD/CAM/CAE softveri su ustvari zasnovani na tzv. otvorenoj arhitekturi koja omogućuje njihovu međusobnu integraciju preko direktne veze ili generisanja fajlova standardnih industrijskih formata koji su zajednički za sve.

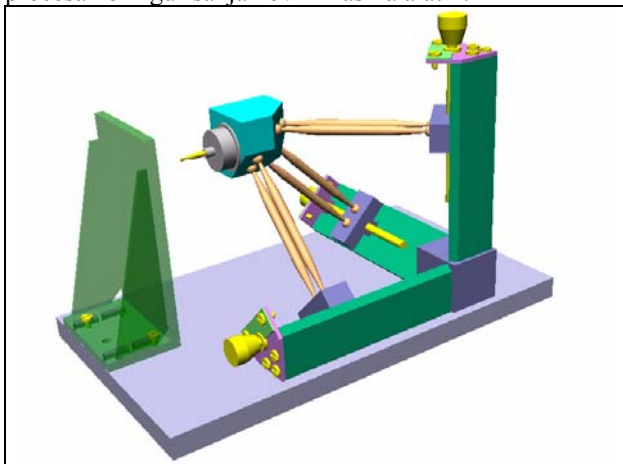
Softver za potrebe ostvarivanja funkcionalnih simulacija modela predstavlja inženjerski alat za konstruisanje i analizu modela sa pokretnim delovima. Osnovne karakteristike takvog softvera su sledeće:

- Integracija sa zapravo svakim 3D CAD sistemom.
- Nelinearna kretanja i nelinearne simulacije (zadavanje harmonijskih kretanja kao i kretanja definisanih posebnim funkcijama uz detektovanje kolizija i kontakta između pojedinih delova modela).
- Integracija sa standardnim inženjerskim i office alatima (Matlab, Simulink, Microsoft Excel, Word, Powerpoint, MathCAD, Visual Basic) .
- Generisanje realnih slika i animacija u boji (mogućnost generisanja izlaznih fajlova u različitim formatima AVI, BMP, JPG, TIFF) .
- Mogućnost uporedne analize kretanja i analize napona (motion and stress analysis) u okviru jedne funkcionalne celine itd.

Mogućnosti integracije CAD/CAM/CAE sistema ustvari sastavlja najbolje karakteristike različitih softvera. Dobija se najbolje iz tri sveta: komfor za modeliranje u favorizovanom CAD sistemu, mogućnosti efikasne simulacije i analize u CAE okruženju, radi eventualne dorade i rekonstrukcije polaznog modela, a sve u cilju da se i u CAM okruženju dobije i putanja alata za obradu gotovog dela .

### 3. MODEL TROOSNE PARALELNE MAŠINE ALATKE

Prve ideje za razvoj mašina alatki na bazi paralelnog mehanizma potiče od 60-ih godina prošlog veka. Bilo je potrebno 30-ak godina za prve uspešne realizacije (sajam IMTS94 Čikago). Danas su ovakve mašine sa paralelnom kinematikom realnost. One su predmet intenzivnih istraživanja vodećih Univerziteta i Istraživačkih centara u svetu. I ovaj rad je deo istraživanja u okviru projekta Troosne paralelne mašine. Postavke ovog rada imaju za cilj ispitivanje mogućnosti primene kinematičkih simulacija paralelnih mehanizama u početnoj fazi procesa konfigurisanja novih mašina alatki.



Sl. 1 Osnovni modeli jedne troosne mašine sa paralelnom kinematikom

Model troosne mašine koji se posmatra u ovom radu ima pokretanu platformu koja je pomoću tri para nogu i sfernih zglobova povezana sa tri translatorno pokretna klizača. Mehanizam za fiksne pozicije klizača ima fiksnu poziciju platforme. Pošto su noge mehanizma grupisane po dve i sve su jednake dužine, to pomeranje klizača, dovodi samo do promene pozicije (ne i orijentacije) glavnog vretena na platformi, što odgovara troosnoj obradi. Ovde je predstavljen model, koji će simulirati rad jedne takve konfiguracije mašine.

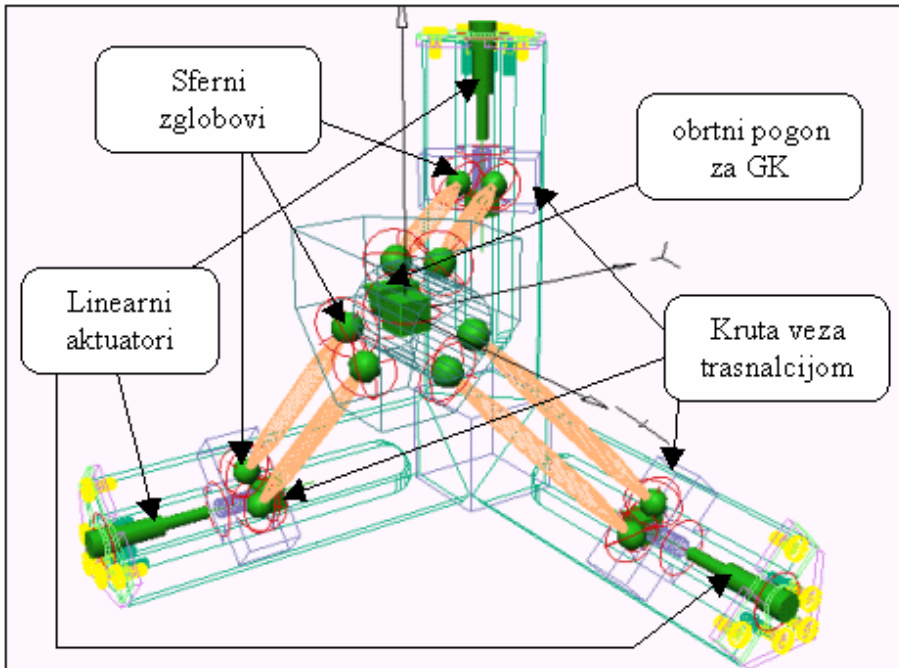
Kompletna struktura mašine je modelirana u Pro/Engineer okruženju, što je u radu omogućilo laku zamenljivost, kombinaciju kao i naknadne dorade modela, sve do konačnog rešenja. Osnovna struktura prikazna na slici 1 i ona može egzistirati kao tehnološki modul sa horizontalnim ili vertikalnim glavnim vretenom.

### 4. SIMULACIJE KINEMATIKE MODELA

CAE softveri imaju i svoj sopstveni CAD modeler sa mogućnošću modeliranja kombinacijom osnovnih geometrijskih oblika kao što su (prizme, sfere, cilindri i drugi). Međutim, mogućnosti modeliranja složenih geometrijskih oblika su ograničene, odnosno neuporedive sa mogućnostima komercijalnih CAD softvera. Zbog toga je solid model napravljen u CAD okruženju Pro/Engineera.

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 visualNastran. Međutim, neophodno je dodatno grupisati nepokretne delove u podsklopove i povezati ih čvrstom vezom (Rigid body). Pojedini pokretnim delovima treba ponaosob dodeliti kinematička ograničenja njihovog međusobnog kretanja. Za definisanje kinematičkih veza može se koristiti jedna od sledećih vrsta spojeva: čvrsta veza, cilindrični zglob, sferni zglob kao osnovni tipovi spojeva, kao i različite varijante ove tri osnovne veze, naprimer čvrsti spoj sa translacijom duž jedne ili dve ravni (Rigid Joint on Slot ili Rigid Joint on Plane), cilindrični zglob sa translacijom duž jedne ili dve ravni (Revolute Joint on Slot ili Revolute Joint on Plane), sferni zglob sa translacijom duž jedne ili dve ravni (Spherical Joint on Slot ili Spherical Joint on Plane). Za definisanje aktuatora postoji mogućnost definisanja linearnih i obrtnih aktuatora (Linear Actuator, Revolute Motor). Pored navedenih

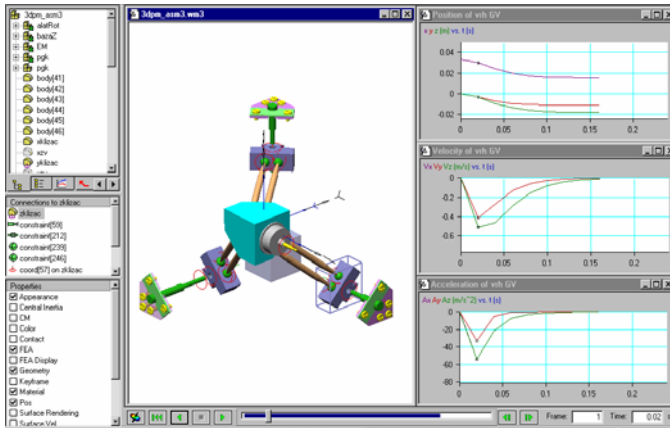
spojeva postoji mogućnost i definisanja niza drugih veza npr. opruge, uža, štapovi kao i generisnje posebnih ograničenja. Treba napomenuti da dejstvo pre svega aktuatora ili i pojedinih spojeva ne mora da bude kontinualno već se može predvideti različite funkcije promenljivih kretanja što je posebno značajno za aktuatore gde se mogu s obzirom da su za spojeve ređe promene tipa ili vrste spoja u toku vremena. Model troosne paralelne mašine sa prikazanim kinematičkim vezama dat je na slici 2.



Sl. 2 Model sa definisanim pokretnim spojevima

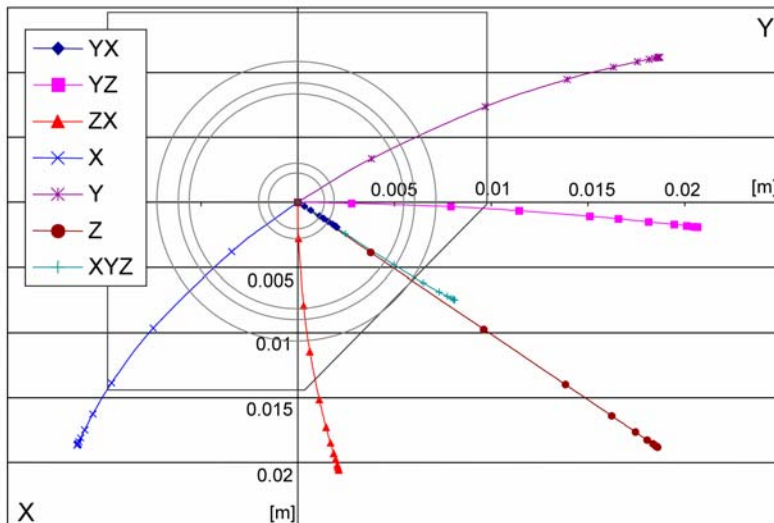
Za identifikovanje međusobnih kontakata između dva ili više delova mehanizma postoje sledeće funkcije: collide, penetrate, penetrate all. "Collide" funkcija se koristi između dva dela koji se dodiruju bez međusobnog prodiranja jednog u telo drugog. Ova veza između dva objekta se koristi za detekciju kontakta i kolizija između dva dela mehanizma. S druge strane funkcijama penetrate, penetrate all koja je osnovna za sve elemente ukoliko se ne promeni, dozvoljava se kretanje objekata bez obzira na druge objekte u okolini tako da se može desiti da delovi mehanizma dolaze u međusobne kolizije koje program u ovom slučaju ne identifikuje. 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. Tako je postoji još i mogućnost zadavanja kretanja definišući ubrzanje na aktuatorima. Na slici 3. dat je primer mogućih izlaznih rezultata u posmatranoj tački na glavnom vretenu. Promene pozicija po osama i na glavnom vretenu su snimane i na osnovu njih dobijani su dijagrami zavisnosti u jedinici vremena, kao i međusobne zavisnosti po koordinatnim osama (X, Y i Z), koji su korišćeni za donošenje zaključaka.



Sl. 3 Simulacija kinematike 3DPMA

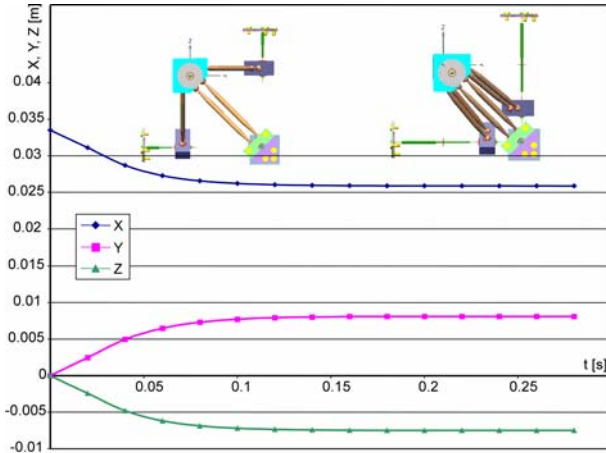
Analiza je urađena prvo sa ravnomernim kretanjem sve tri ose, zatim je blokirana po jedna osa, dok su po dve bile pokretne, i na kraju su pod dve ose bile blokirane, dok je pokretna bila preostala slobodna osa. Na taj način dobijene su putanje alata za granična kretanja od minimalnih do maksimalnih pomeranja klizača, što odgovara delovima kontura granica radnog prostora (slika 4). Ovom analizom se može uočiti oblast maksimalnog dostizivog radnog prostora, ali i uža oblast funkcionalnog radnog prostora, ili tzv. radnog prostora veštine. Analiza radnog prostora se uobičajeno vrši uz primenu rešenja direktnog ili indirektnog kinematičkog problema, što je takođe u dosadašnjim istraživanjima proveravano [1]. Ovde se proverava mogućnost da se do oblika i granica radnog prostora dođe na posredan načina uz upotrebu simulacija.



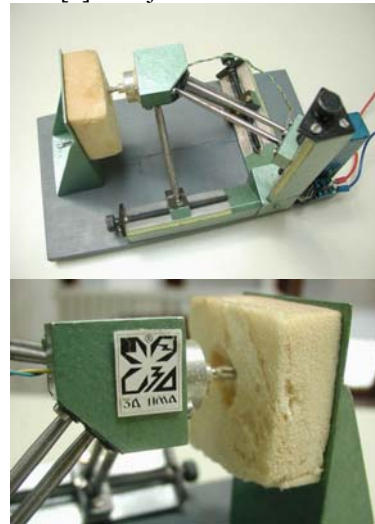
Sl. 4 Analiza putanje alata, za različita kretanja pogonskih osa X, Y i Z

Na slici 5. je pokazan jedan od mogućih izlaznih rezultata i to promena položaja koordinata po X, Y i Z pravcu u jedinici vremena za ravnomerno skupljanje paralelnog mehanizma od početnog maksimalnog položaja u kojima su noge upravne, na ose klizanja (koordinatne ose) do

minimalnog, što odgovara položaju klizača najbliže nuli mašine (mašina nikad ne ostvaruje apsolutnu nulu). Tokom iscertavanja kontura sa slike 4. za sve posmatrane kombinacije snimani su i analizirani dijagrami promena pozicija po osama, brzina i ubrzanja. Primer ovakvih izlaznih rezultata dat je na slici 5. Fizička realizacija razmatranog modela [3] data je na slici 6.



Sl.5 Promena položaja X,Y i Z koordinate u jedinici vremena



Sl.6 Jedan fizički model troosne paralelne mašine

## 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. Generalan zaključak da se integracija CAD/CAE gotovo uvek može ostvariti, bilo direktno učitavanjem CAD modela u CAE softver ili indirektno preko nekog od standardnih ili neutralnih industrijskih formata. U zavisnosti od složenosti modela kao i složenosti potrebnih analiza integracija indirektnim putem ne daje u svakom slučaju modele istog kvaliteta. Na primeru analize kretanja jednog pokazanog mehanizma, dobijeni rezultati mogu da se iskoriste za potvrdu teorijskih analiza, a uočeni nedostaci same konstrukcije mogu se iskoristiti za poboljšanje kroz rekonstrukciju samog modela, pre gradnje prototipa.

## LITERATURA

- [1] S. Živanović, Tehnološki modul sa paralelnim mehanizmom, magistarska teza, Mašinski fakultet Beograd, 2000.
- [2] S. Živanović, Parallel Kinematic Machines, International Journal of Production Engineering and Computers, Volume 3, Number 3, pp.49-54, 2000.
- [3] S. Živanović, Jedan model tehnološkog modula sa paralelnim mehanizmom, VII Međunarodna konferencija Fleksibilne tehnologije mma 2000 Zbornik radova str. 81-82, Novi Sad, 08. jun 2000.
- [4] S. Živanović, Modeliranje i simulacije 2D tehnoloških modula sa paralelnim mehanizmom, JAHORINA-IRMES 2002, Zbornik radova 2/2, str.445-450, Univerzitet u Srpskom Sarajevu, Mašinski fakultet, Jahorina, 2002.