



Vasilić, G., Živanović, S.¹⁾

ANALIZA RADNOG PROSTORA REKONFIGURABILNOG DVOOSNOG PARALELNOG MEHANIZMA MOMA²⁾

Rezime

U ovom radu je analiziran radni prostor dvoosnog paralelnog mehanizam MOMA. Razmatrani mehanizam je rekonfigurabilan, a u samom radu su prikazane neke od mogućih konfiguracija mehanizma koje je moguće realizovati. Za mehanizam MOMA su izvedene jednačine koje predstavljaju rešenja geometrijskih problema. Jednačine su generalizovane i važe za svaku moguću konfiguraciju paralelnog mehanizma MOMA. Dobijene jednačine se koriste za dalje analize paralelnog mehanizma. U okviru ovoga rada, jednačine su korišćene za analizu radnog prostora različitih konfiguracija paralelnog mehanizma i to primenom jednačina inverznog geometrijskog problema i primenom jednačina direktnog geometrijskog problema.

Ključne reči: Paralelni mehanizam, rekonfigurabilni mehanizam, inverzni i direktni geometrijski problem, radni prostor

1. UVOD

Mašine alatke postoje da bi se koristile za neku transformaciju kretanja primenjenog mehanizma radi obavljanja nekog planiranog zadatka obrade. Svaka mašina alatka sadrži i mehanizam koji je u ovom radu sa paralelnom kinematikom. Kada mehanizam mašine ima paralelnu kinematiku, tada su oblik i veličina radnog prostora slabost većine takvih mašina, pa je analiza i određivanje radnog prostora ovakvih mašina vrlo bitan projektni zadatak, što je i predmet ovog rada. Oblik radnog prostora posledica su koncepcije mehanizma, a njegove mere mogu biti naknadno podešavane pomoću parametara mehanizma, a da se ne otvara posebno problem generalne sinteze paralelnog mehanizma. Mehanizmi sa paralelnom kinematikom su iskazali niz prednosti u odnosu na serijske mehanizme te su predmet mnogih istraživanja [1-6]. Kod mašina alatki sa paralelnim mehanizmom, geometrija mehanizma utiče na: oblik i veličinu radnog prostora, postojanje singulariteta, krutost mehanizma, pokretljivost mehanizma, itd. Promenom geometrije paralelnog mehanizma se značajno utiče na navedene karakteristike.

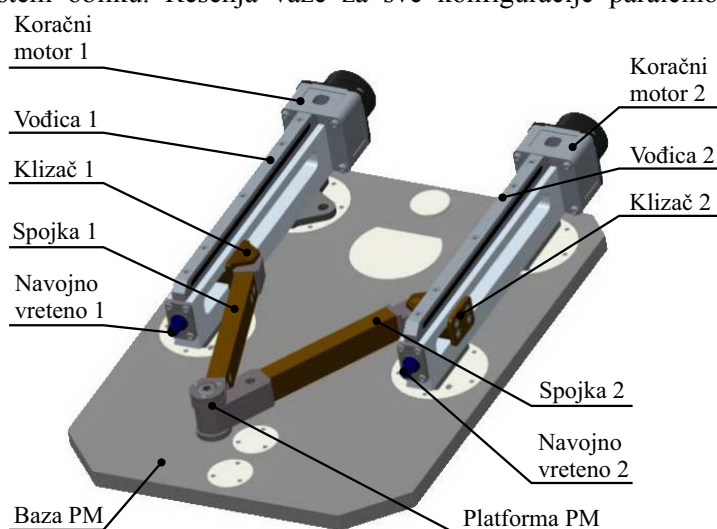
Posebnu grupu mehanizama čine rekonfigurabilni mehanizmi kojima se lako, brzo i bez dodatnih troškova može promeniti konfiguracija [7]. Karakteristika rekonfigurabilnih sistema je mogućnost prilagođavanja trenutnim potrebama na ekonomski prihvatljiv način [8]. U ovu grupu mehanizama se svrstava i dvoosni paralelni mehanizam MOMA (Modularna Mašina Alatka) otvorene arhitekture upravljanja, koja je predmet razmatranja u ovom radu. Mašina MOMA je rekonfigurabilna i omogućava rekonfigurisanje i hardverskog i softverskog sistema. Razmatrani rekonfigurabilni dvoosni paralelni mehanizam MOMA (slika1) se može prepoznati u sledećim primerima: (i) horizontalnom obradnom centru Trijoint[1] koji sadrži dvoosni paralelni mehanizam; (ii) paralelnom mehanizmu sa dva paralelograma [2]; (iii) mašini za troosnu obradu sa dvoosnim paralelnim mehanizmom i dodatom serijskom osom [3]; (iv) redundantnom paralelnom ravanskom mehanizmu sa tri stepena slobode [4]. Razmatrani mehanizam je nastao uopštavanjem paralelnog mehanizma 2D TeMoPaM (Tehnološki Modul sa Paralelnim Mehanizmom) koji je pokazan u radovima [5] i [6].

U okviru rada je dat opis rekonfigurabilnog dvoosnog paralelnog mehanizma MOMA i postavljen opšti geometrijski model na osnovu koga su rešeni inverzni geometrijski problem (IGP) i direktni geometrijski

¹⁾ Vasilić Goran, dipl.maš.inž, student doktorskih studija, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (goran.v.vasilic@gmail.com), prof dr Saša Živanović, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (szivanovic@mas.bg.ac.rs)

²⁾ U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja su realizovana na projektu koji finansijski podržava Ministarstvo za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj Vlade Republike Srbije.

problem (DGP), čija su rešenja data u opštem obliku. Rešenja važe za sve konfiguracije paralelnog mehanizma koje se mogu realizovati po uspostavljenom programu gradnje [9] i uz odgovarajuće parametre koji definišu geometriju paralelnog mehanizma. Izvedene jednačine se koriste za konfigurisanje upravljačkog softvera otvorene arhitekture na PC Linux platformi i EMC2 softveru [10,11]. Osim za konfigurisanje upravljanja za paralelni mehanizam, izvedene opšte jednačine IGP-a i DGP-a se koriste za analizu paralelnog mehanizma, a u ovom radu su iskorišćene za analizu radnog prostora različitih konfiguracija paralelnog mehanizma MOMA. Takođe, izvedene jednačine se koriste i za druge analize prema kojima se na osnovu nekog od kriterijuma dobija optimalna konfiguracija za postavljene zahteve, na primer optimalna dužina spojki paralelnog mehanizma [12].



Slika 1. CAD model jedne konfiguracije rekonfigurabilnog dvoosnog paralelnog mehanizma MOMA

2. OPIS REKONFIGURABILNOG DVOOSNOG PARALELNOG MEHANIZMA MOMA

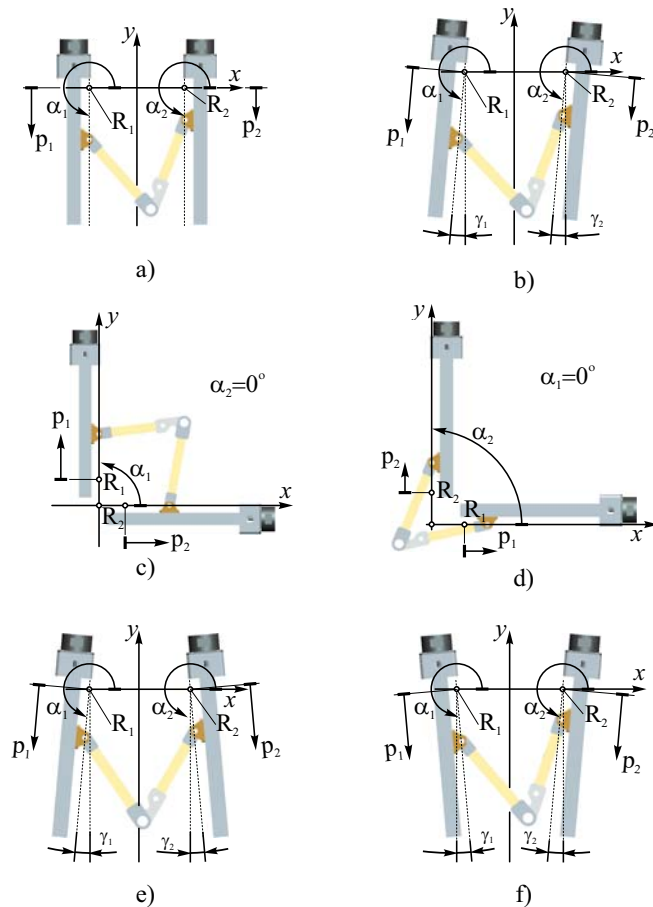
Rekonfigurabilni paralelni mehanizam MOMA je ravanski paralelni mehanizam sa dva stepena slobode. CAD model rekonfigurabilnog paralelnog mehanizma MOMA je prikazan na slici 1. Pogonske ose paralelnog mehanizma su translatorne i svaku od osa čine po jedan koračni motor, zavojno vreteno i vodica. Pogonske ose obezbeđuju translatorno kretanje klizača duž vodica. Za svaki od klizača je vezana po jedna spojka konstantne dužine pomoću obrtnog zgloba. Spojke paralelnog mehanizma su takođe međusobno povezane obrtnim zglobovom. Zglobna veza između spojki predstavlja platformu paralelnog mehanizma čije se kretanje ostvaruje pomeranjem dva klizača duž vodica.

Paralelni mehanizam MOMA je modularnog tipa i svaki od modula predstavlja jedan podsklop celokupnog sklopa mehanizma. Moduli od kojih je sačinjen paralelni mehanizam su: baza paralelnog mehanizma; sklopovi pogonskih osa koju čine koračni motori, vodice i zavojna vretena i sklopovi spojki sa obrtnim zglobovima. Ovakav način gradnje omogućava brzo i jednostavno rekonfigurisanje, odnosno zamenu pojedinih modula kao i promenu geometrije paralelnog mehanizma promenom položaja jednog modula paralelnog mehanizma u odnosu na bazu. U ovome se ogleda hardverska rekonfigurabilnost dvoosnog paralelnog mehanizma MOMA te se konfiguracija mehanizma može prilagoditi različitim potrebama.

Konfiguracije paralelnog mehanizma MOMA se međusobno razlikuju po orijentaciji vodica određenih uglovima α_1 i α_2 prikazanih na slici 2 i po dužinama spojki l_1 i l_2 . Uglovi orijentacija spojki su definisani preko pomoćnih uglova γ_i i iznose $\alpha_i = 3\pi/2 + \gamma_i$ pri čemu uglovi γ_i mogu imati vrednosti $\gamma_i = 0^\circ$, $\gamma_i = +5^\circ$ i $\gamma_i = -5^\circ$. Rekonfigurisanjem paralelnog mehanizma promenom orijentacije pogonskih osa, cela pogonska osa sa svojim sastavnim elementima rotira oko referentne tačke R_i (slika 2) za ugao γ_i . Po ovom principu se realizuju konfiguracije sa slike 2a, b, e i f. Promenom baze paralelnog mehanizma realizuju se konfiguracije sa slike 2c i d. Dužine spojki paralelnog mehanizma mogu imati vrednosti $l_i = 180$ [mm], $l_i = 195$ [mm] i $l_i = 250$ [mm]. Programom gradnje je definisana svaka moguća konfiguracija paralelnog mehanizma, a konfiguracije su prema geometriji mehanizma podeljene u pet tipova i to:

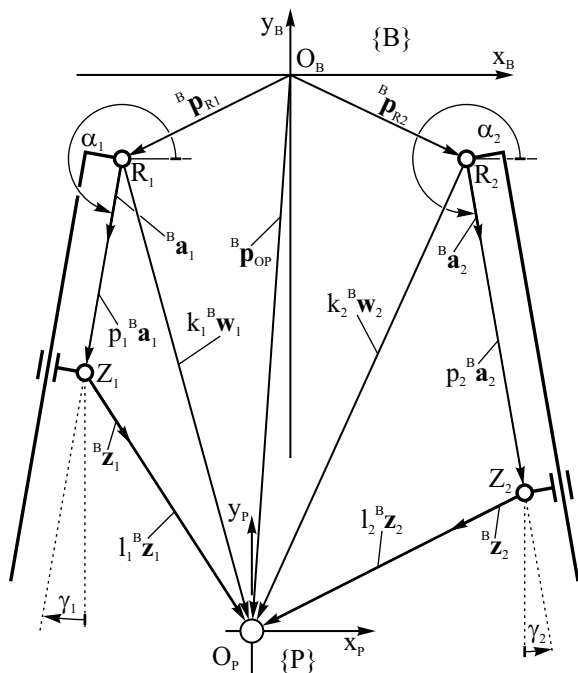
- MOMA M1 – Pogonske ose su međusobno paralelne a pomoćni uglovi orijentacije osa mogu imati vrednosti $\gamma_1 = \gamma_2 = 0^\circ$ (slika 2a), $\gamma_1 = \gamma_2 = -5^\circ$ (slika 2b) i $\gamma_1 = \gamma_2 = +5^\circ$;
- MOMA M2 – Pogonske ose su paralelne osama koordinatnog sistema Oxy pri čemu se platforma paralelnog mehanizma nalazi u I kvadrantu koordinatnog sistema Oxy (slika 2c);
- MOMA M3 – Pogonske ose su paralelne osama koordinatnog sistema Oxy pri čemu se platforma paralelnog mehanizma nalazi u III kvadrantu koordinatnog sistema Oxy (slika 2d);
- MOMA M4 – Konfiguracija kod koje se pogonske ose razilaze (slika 2e). Mehanizam se može konfigurisati u tri varijante i to: i) $\gamma_1 = -5^\circ$ $\gamma_2 = +5^\circ$, ii) $\gamma_1 = 0^\circ$ $\gamma_2 = +5^\circ$, iii) $\gamma_1 = -5^\circ$ $\gamma_2 = 0^\circ$;

- MOMA M5 – Konfiguracija kod koje se pogonske ose sučeljavaju (slika 2f). Mehanizam se može konfigurirati u tri varijante i to: i) $\gamma_1 = +5^\circ$ $\gamma_2 = -5^\circ$, ii) $\gamma_1 = 0^\circ$ $\gamma_2 = -5^\circ$, iii) $\gamma_1 = +5^\circ$ $\gamma_2 = 0^\circ$;



Slika 2. Osnovne konfiguracije rekonfigurabilnog dvoosnog paralelnog mehanizma MOMA

3. GEOMETRIJSKI MODEL I REŠAVANJE GEOMETRIJSKIH PROBLEMA DVOOSNOG PARALELNOG MEHANIZMA MOMA



Slika 3. Geometrijski model rekonfigurabilnog dvoosnog paralelnog mehanizma MOMA

Kako je dvoosni paralelni mehanizam MOMA rekonfigurabilan, od značaja je formirati opšti geometrijski model kojim se može opisati bilo koja konfiguracija paralelnog mehanizma uz odgovarajuće vrednosti određenih geometrijskih veličina. Na osnovu uopštenog geometrijskog modela dobijaju se i opšta rešenja geometrijskih problema (inverznog i direktnog) paralelnog mehanizma. Dobijena opšta rešenja geometrijskih problema uz određene vrednosti geometrijskih veličina se koriste za analizu radnog prostora bilo koje konfiguracije ali i za formiranje upravljanja paralelnog mehanizma [11]. Opšti geometrijski model rekonfigurabilnog paralelnog mehanizma MOMA je prikazan na slici 3.

Prema slici 3, za geometrijski model rekonfigurabilnog paralelnog mehanizma MOMA je definisan nepokretni koordinatni sistem $\{B\}$ vezan za bazu mehanizma kao i pokretni koordinatni sistem $\{P\}$ vezan za platformu mehanizma. Uvedene veličine prikazane na slici 3 su:

- ${}^B \mathbf{p}_{R_i} = [x_{R_i} \ y_{R_i}]^T$ – vektori položaja referentnih tačaka R_i u odnosu na nepokretni koordinatni sistem $\{B\}$;
- ${}^B \mathbf{p}_{OP} = [x_P \ y_P]^T$ – vektori položaja platforme paralelnog P u odnosu na nepokretni koordinatni sistem $\{B\}$;
- ${}^B \mathbf{a}_i = [a_{x_i} \ a_{y_i}]^T$ – jedinični vektori koji određuju orijentaciju vođica paralelnog mehanizma;
- $p_i {}^B \mathbf{a}_i$ – vektori unutrašnjih koordinata, dok je p_i skalarna veličina kontrolisana aktuatorima;
- $l_i {}^B \mathbf{z}_i$ – vektori određeni pozicijom, orijentacijom i dužinom spojki. Vektori \mathbf{z}_i su jedinični vektori i određeni su orijentacijom spojki;
- $k_i {}^B \mathbf{w}_i$ – vektori koji definišu poziciju platforme paralelnog mehanizma u odnosu na referentne tačke R_i .

Za dalju analizu a prema geometrijskom modelu sa slike 3 formiraju se sledeće vektorske jednačine:

$$k_i {}^B \mathbf{w}_i = {}^B \mathbf{p}_{OP} - {}^B \mathbf{p}_{R_i} \quad (1)$$

$$l_i {}^B \mathbf{z}_i = k_i {}^B \mathbf{w}_i - p_i \mathbf{a}_i \quad (2)$$

Kvadriranjem jednačine (2) se potom od tako dobijene jednačine formira implicitna jednačina koja je oblika:

$$p_i^2 - 2p_i ({}^B \mathbf{a}_i k_i {}^B \mathbf{w}_i) + (k_i {}^B \mathbf{w}_i)^2 - l_i^2 = 0 \quad (3)$$

2.1 Rešenje inverznog geometrijskog problema

Rešavanjem kvadratne jednačine (3) po unutrašnjim koordinatama p_i , dobija se sledeća jednačina:

$$p_i = ({}^B \mathbf{a}_i k_i {}^B \mathbf{w}_i) \pm \sqrt{({}^B \mathbf{a}_i k_i {}^B \mathbf{w}_i)^2 - (k_i {}^B \mathbf{w}_i)^2 + l_i^2} \quad (4)$$

na osnovu koje se nakon zamene poznatih veličina dobija:

$$p_i = B_i - \sqrt{B_i^2 - C_i}, \quad (i = 1, 2), \quad (5)$$

pri čemu su uvedene sledeće smene:

$$\begin{aligned} B_i &= a_{x_i} (x_P - x_{R_i}) + a_{y_i} (y_P - y_{R_i}) \\ C_i &= (x_P - x_{R_i})^2 + (y_P - y_{R_i})^2 - l_i^2, \end{aligned} \quad (i = 1, 2), \quad (6)$$

Koristeći jednačinu (5) na osnovu poznate geometrije dvoosnog paralelnog mehanizma MOMA, za zadate vrednosti spoljašnjih koordinata x_P i y_P se izračunavaju vrednosti unutrašnjih koordinata p_1 i p_2 , pa samim time jednačina (5) predstavlja rešenje inverznog geometrijskog problema za svaku konfiguraciju rekonfigurabilnog dvoosnog paralelnog mehanizma MOMA.

2.2 Rešenje direktnog geometrijskog problema

Zamenom parametara paralelnog mehanizma u jednačinu (3), dobijaju se sledeće jednačine:

$$\begin{aligned} p_1^2 - 2p_1 [a_{x_1} (x_P - x_{R_1}) + a_{y_1} (y_P - y_{R_1})] + \\ + (x_P - x_{R_1})^2 + (y_P - y_{R_1})^2 - l_1^2 = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} p_2^2 - 2p_2 [a_{x_2} (x_P - x_{R_2}) + a_{y_2} (y_P - y_{R_2})] + \\ + (x_P - x_{R_2})^2 + (y_P - y_{R_2})^2 - l_2^2 = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

Rešavanjem sistema jednačina (7) i (8) po spoljašnjim koordinatama x_P i y_P se dobijaju jednačine (9) i (10). U jednačinama (9) i (10) figurišu veličine koje opisuju geometriju paralelnog mehanizma ali i unutrašnje koordinate p_i ($i=1,2$). Samim time se na osnovu poznatih unutrašnjih koordinata p_i mogu izračunati vrednosti spoljašnjih koordinata x_P i y_P pa izvedene jednačine (9) i (10) predstavljaju rešenja direktnog geometrijskog problema rekonfigurabilnog dvoosnog paralelnog mehanizma MOMA.

$$x_p = v_7 + y_p v_8 \quad (9)$$

$$y_p = \frac{-v_{10} \pm \sqrt{v_{10}^2 - 4v_9 v_{11}}}{2v_9} \quad (10)$$

U jednačini (10) umesto dvoznaka "±" koristi se znak "+" za konfiguraciju paralelnog mehanizma sa slike 2c, dok se znak "-" koristi za sve ostale konfiguracije sa slike 2. Smene koje figurišu u jednačinama koje predstavljaju rešenje direktnog geometrijskog problema su date grupom jednačina (11) i (12).

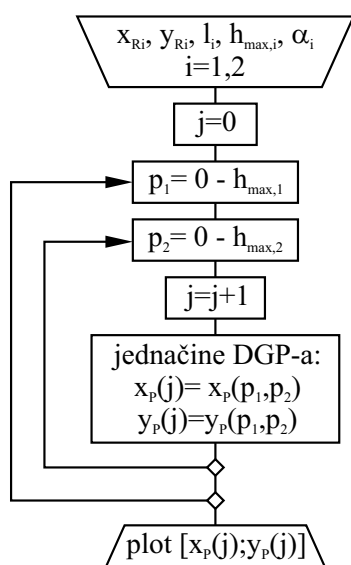
$$\begin{aligned} v_1 &= 2(p_1 a_{x1} + x_{R1}) \\ v_2 &= 2(p_1 a_{y1} + y_{R1}) \\ v_3 &= p_1^2 + 2p_1(a_{x1} x_{R1} + a_{y1} y_{R1}) - l_1^2 + x_{R1}^2 + y_{R1}^2 \\ v_4 &= 2(p_2 a_{x2} + x_{R2}) \\ v_5 &= 2(p_2 a_{y2} + y_{R2}) \\ v_6 &= p_2^2 + 2p_2(a_{x2} x_{R2} + a_{y2} y_{R2}) - l_2^2 + x_{R2}^2 + y_{R2}^2 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} v_7 &= (v_6 - v_3)/(v_4 - v_1) \\ v_8 &= (v_2 - v_5)/(v_4 - v_1) \\ v_9 &= 1 + v_8^2 \\ v_{10} &= 2v_7 v_8 - v_1 v_8 - v_2 \\ v_{11} &= v_7^2 - v_1 v_7 + v_3 \end{aligned} \quad (12)$$

4. ANALIZA RADNOG PROSTORA DVOOSNOG PARALELNOG MEHANIZMA MOMA

Prethodno izvedene jednačine se koriste za sve analize paralelnog mehanizma pa samim time i za analizu radnog prostora. Pri analizi radnog prostora, koriste se ili jednačine koje predstavljaju rešenje direktnog geometrijskog problema ili jednačine koje predstavljaju rešenje inverznog geometrijskog problema. I jedan i drugi pristup imaju svoje prednosti i mane a za različite konfiguracije dvoosnog paralelnog mehanizma MOMA će biti primenjena oba pristupa.

4.1 Analiza radnog prostora primenom jednačina direktnog geometrijskog problema

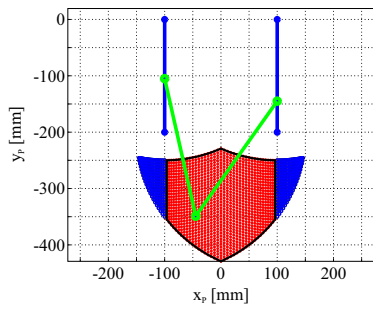


Slika 4. Algoritam za određivanje radnog prostora paralelnog mehanizma koristeći jednačine DGP-a

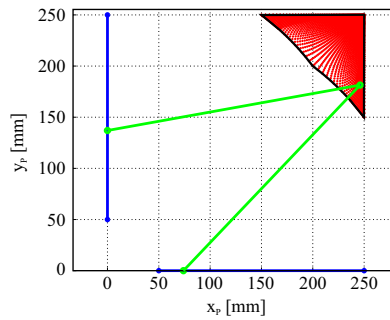
Koristeći jednačine (9) i (10) sa odgovarajućim smenama (11)-(12) i parametrima koji definišu geometriju paralelnog mehanizma, izračunava se pozicija platforme mehanizma u koordinatnom sistemu {B} za sve vrednosti unutrašnjih koordinata p_i. Skup tačaka koje imaju koordinate (x_{Pj}, y_{Pj}) predstavlja dostizivi radni prostor mehanizma. Algoritam kojim se određuje radni prostor na osnovu jednačina direktnog geometrijskog problema je prikazan na slici 4.

Ova metoda nije iterativna tako da se sa njom ne vrše prekomerna i bespotrebna izračunavanja pa se u ovome i ogleda njena prednost. Bitan nedostatak ove metode je taj što se kod složenijih mehanizama ne može doći do analitičkog rešenja direktnog geometrijskog problema pa određivanje radnog prostora ovim pristupom postaje znatno složenije. Koristeći ovu metodu određeni su radni prostori za konfiguracije paralelnog mehanizma sa slike 2a, c i d. Za sve tri konfiguracije, maksimalni hod pogonskih osa iznosi h_{max}=200 [mm], dužine spojki su l₁=l₂=250 [mm]. Ostali geometrijski parametri za navedene konfiguracije su: α₁=α₂=3π/2, y_{R1}=y_{R2}=0 [mm], x_{R1}=-100[mm] i x_{R2}=100 [mm] za konfiguraciju sa slike 2a; α₁=π/2, α₂=0, x_{R1}=y_{R2}=50 [mm],

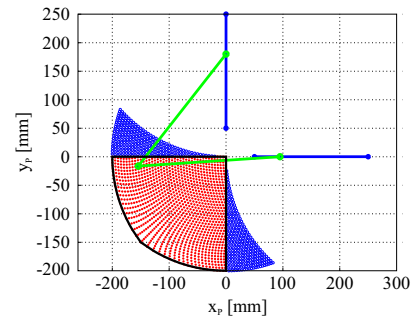
y_{R1}=x_{R2}=0 [mm] za konfiguraciju sa slike 2c; α₁=0, α₂=π/2, x_{R1}=y_{R2}=50 [mm], y_{R1}=x_{R2}=0 [mm] za konfiguraciju sa slike 2d. Radni prostori dvoosnog paralelnog mehanizma MOMA određeni ovom metodom su prikazani na slikama 5, 6 i 7 i to za konfiguracije mehanizma MOMA M1, MOMA M2 i MOMA M3, respektivno.



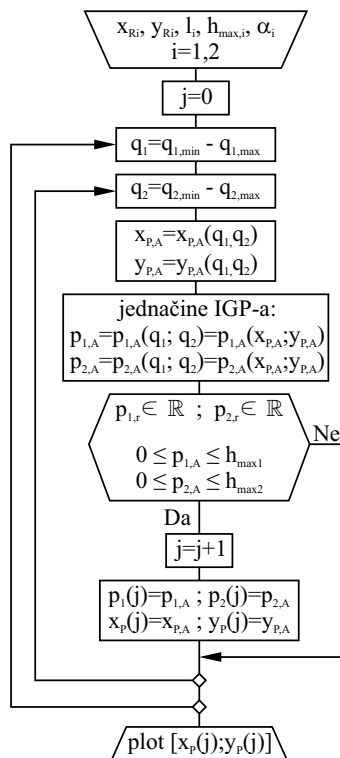
Slika 5. Radni prostor dvoosnog paralelnog mehanizma konfiguracije MOMA M1



Slika 6. Radni prostor dvoosnog paralelnog mehanizma konfiguracije MOMA M2

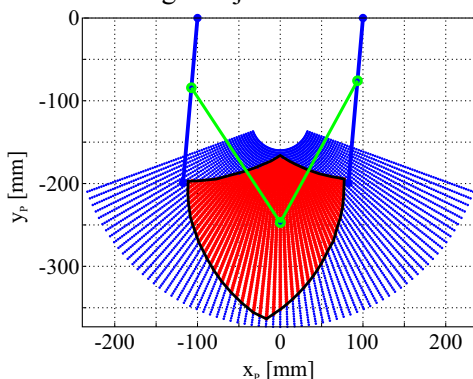


Slika 7. Radni prostor dvoosnog paralelnog mehanizma konfiguracije MOMA M3

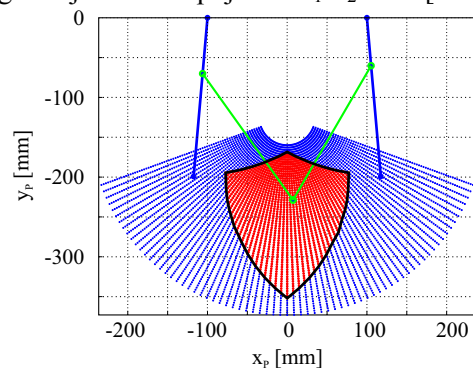


Slika 8. Algoritam za određivanje radnog prostora primenom izvedenih jednačina inverznog geometrijskog problema

$\alpha_1 = \alpha_2 = 3\pi/2 - 5^\circ$ za konfiguraciju M1; $\alpha_1 = 3\pi/2 - 5^\circ$ i $\alpha_2 = 3\pi/2 + 5^\circ$ za konfiguraciju M4; $\alpha_1 = 3\pi/2 + 5^\circ$ i $\alpha_2 = 3\pi/2 - 5^\circ$ za konfiguraciju M5. Za sve tri analizirane konfiguracije dužine spojki su $l_1 = l_2 = 195$ [mm].



Slika 9. Radni prostor dvoosnog paralelnog mehanizma konfiguracije MOMA M4



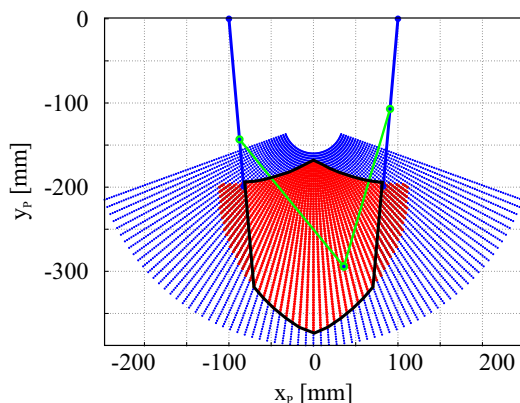
Slika 10. Radni prostor dvoosnog paralelnog mehanizma konfiguracije MOMA M5

4.2 Analiza radnog prostora primenom jednačina inverznog geometrijskog problema

Analiza radnog prostora paralelnog mehanizma MOMA primenom jednačina inverznog geometrijskog problema je iterativna metoda. Za svaku tačku dela ispitivanog prostora se izračunavaju vrednosti unutrašnjih koordinata na osnovu jednačine (5) i odgovarajućih smena (6). Ukoliko za određenu tačku postoje realna rešenja za obe unutrašnje koordinate p_i , pri čemu je ispunjen uslov $0 \leq p_i \leq h_{maxi}$, tačka je deo dostizivog radnog prostora paralelnog mehanizma. U suprotnom, tačka ne pripada radnom prostoru paralelnog mehanizma. Na slici 8 je prikazan algoritam po kome se određuje radni prostor po opisanoj metodi. Prema algoritmu, koordinate tačaka $x_{P,A}$ i $y_{P,A}$ u nepokretnom koordinatnom sistemu $\{B\}$ su određene koordinatama q_1 i q_2 koje mogu biti ili Dekartove ili polarne koordinate. Za analizu radnog prostora paralelnog mehanizma MOMA su korišćene i polarne koordinate, slike 9, 10 i 11a i Dekartove koordinate, slika 11b.

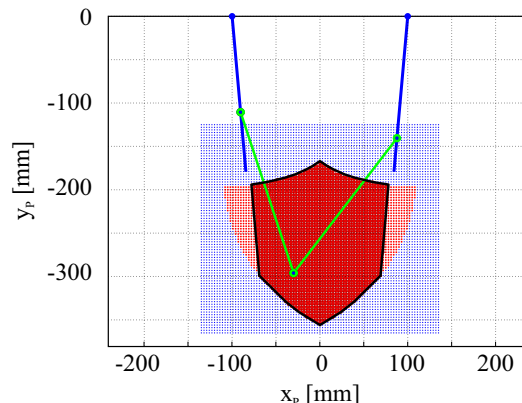
Na slikama 9, 10 i 11 su prikazani radni prostori dvoosnog paralelnog mehanizma MOMA određeni ovom metodom i to za konfiguracije MOMA M1, MOMA M4 i MOMA M5, respektivno. Geometrijski parametri koji definišu navedene konfiguracije su: $x_{R1} = -100$ [mm], $x_{R2} = 100$ [mm], $y_{R1} = y_{R2} = 0$ [mm] za sve tri konfiguracije paralelnog mehanizma; $\alpha_1 = \alpha_2 = 3\pi/2 - 5^\circ$ za konfiguraciju M1; $\alpha_1 = 3\pi/2 - 5^\circ$ i $\alpha_2 = 3\pi/2 + 5^\circ$ za konfiguraciju M4; $\alpha_1 = 3\pi/2 + 5^\circ$ i $\alpha_2 = 3\pi/2 - 5^\circ$ za konfiguraciju M5. Za sve tri analizirane konfiguracije dužine spojki su $l_1 = l_2 = 195$ [mm].

mehanizma konfiguracije MOMA M1



a) *Određivanje radnog prostora primenom polarnih koordinata*

mehanizma konfiguracije MOMA M4



b) *Određivanje radnog prostora primenom Dekartovih koordinata*

Slika 11. *Radni prostor dvoosnog paralelnog mehanizma konfiguracije MOMA M5*

Za određivanje radnog prostora različitih konfiguracija dvoosnog paralelnog mehanizma MOMA prema algoritmima prikazanim na slikama 4 i 8, korišćen je Matlab® programski paket. Na slikama 5 do 7, i slikama 9 do 11, crvenom bojom je označen računski dobijen radni prostor paralelnog mehanizma. Međutim zbog geometrije mehanizma i konačnih vrednosti dimenzija sastavnih delova mehanizma, platforma se ne može naći u svakoj tački dostizivog radnog prostora. Iz tog razloga se za pojedine konfiguracije realni dostizivi radni prostor razlikuje od proračunskog radnog prostora. Realni radni prostor je na svim slikama uokviren crnom bojom, a na slikama 5, 7 i 11 se primećuje razlika između proračunskog i realnog radnog prostora.

Kako je u radu i pokazano, opšte jednačine IGP-a i DGP-a su uz opisane metode korišćene za analizu radnog prostora pojedinih konfiguracija paralelnog mehanizma. Osim oblika i veličine radnog prostora, na osnovu grafički prikazanih rezultata se donosi zaključak kako se uz određene vrednosti parametara paralelnog mehanizma fizički eliminišu određeni delovi radnog prostora. Kombinacijom analize radnog prostora sa drugim analizama (određivanje Jakobijan matrice, određivanje singulariteta, optimizacija paralelnog mehanizma...) dolazi se do optimalne konfiguracije koja treba da ispunjava postavljene zahteve, što je već razmatrano u prethodnim radovima [12, 13].

5. ZAKLJUČAK

Cilj ovoga rada je bio da prikaže neke od mogućih analitičkih načina za određivanje radnog prostora dvoosnog rekonfigurabilnog paralelnog mehanizma MOMA primenom rešenja DGP i IGP, iako je za razmatrane mehanizme radni prostor moguće jednostavnije odrediti i geometrijski. Za razmatrani rekonfigurabilni paralelni mehanizam postoji veliki broj mogućih konfiguracija za koje je pripremljeno opšte rešenje IGP i DGP, pa se na bazi opštih modela dobijaju i adekvatni radni prostori jednostavnom promenom parametara mehanizma, čime se njihovo određivanje maksimalno pojednostavljuje i automatizuje.

U daljoj realizaciji ove teme planira se konceptijsko projektovanje jedne klase kompleksnih mašina alatki sa osobinama rekonfigurabilnosti i multifunkcionalnosti, u cilju dobijanja stone edukacione mašine alatke za rad sa studentima, koja bi bila korišćena za edukaciju u: konfigurisanju mašina, konfigurisanju upravljanja, i programiranju. Planira se razvoj stonih mašina sa paralelnom i/ili hibridnom kinematikom, a koje u sebi sadrže bar jedan dvoosni rekonfigurabilni paralelni mehanizam MOMA, kao i nadogradnja ovog mehanizma na troosni mehanizam dodavanjem jedne ili više serijskih osa.

6. LITERATURA

- [1] Šika Z., Hamrle V., Valášek M., Beneš P.: *Calibrability as additional design criterion of parallel kinematic machines*, Mechanism and Machine Theory, Vol. 50, p.48-63, 2012.
- [2] Jinson W., Tiemin L., Liping W.: *Dynamic analysis of the 2-DOF planar parallel manipulator of a heavy duty hybrid machine tool*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 34, p. 413-420, 2007.

- [3] Hanrath G., Stengele B.: *Machine tool for triaxial machining of workpieces*. United States Patent. Patent number: 6,328,510. Date of Patent: dec. 11. 2001.
- [4] Jun W., Jinson W., Liping W.: *Optimal Kinematic Design and Application of a Redudantly Actuated 3DOF planar Parallel Manipulator*, Journal of Mechanical design, Vol 13, 2008.
- [5] Živanović S., Glavonjić M.: *Edukaciona 2D paralelna mašina alatka kao tehnološki modul*, 26. JUPITER konferencija, 22. simpozijum NU - Roboti - FTS, Zbornik radova, str. 3.247-3.254, Mašinski fakultet, Beograd, 2000.
- [6] Živanović S.: *Parallel Kinematic Machines*, International Journal of Production Engineering and Computers, Vol. 3, No. 3, p.49-54, 2000.
- [7] Mehrabi M.G., Ulsoy A.G., Koren Y.: *Reconfigurable Manufacturing Systems and Their Enabling Technologies*, Int.J.of Manufacturing Technology and Management, Vol.1, No.1 pp.114-131, 2000.
- [8] Landers G., Mid K., Koren Y.: *Reconfigurable Machine Tools*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 50, No.1, pp. 269-274, 2001.
- [9] Živanović S., Vasilic G., *Variants of configuring the 2-axis reconfigurable parallel mechanism - MOMA*, Proceedings of 2nd International Scientific Conference Conference on Mechanical Engineering Technologies and Applications COMETA 2014, pp.33-40, University of East Sarajevo, Faculty of Mechanical Engineering, Jahorina, B&H, Republic of Srpska, 2-5. December 2014.
- [10] LinuxCNC, EMC's webpage, <http://www.linuxcnc.org/>, april, 2015.
- [11] Živanović S., Glavonjić M., Kokotović B., Dimić Z.: *Stona dvoosna rekonfigurabilna mašina sa paralelnom kinematikom – MOMA*, Tehničko rešenje (Novi laboratorijski proizvod, M82), Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 2014.
- [12] Vasilic G., Živanović S., Kokotović B., Glavonjić M.: *Optimizacija dužina spojki dvoosnog rekonfigurabilnog paralelnog mehanizma - MOMA*, 39. JUPITER konferencija, 35. simpozijum NU-Roboti-FTS, Zbornik radova, ISBN 978-86-7083-838-3, str. 3.28-3.35, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, oktobar 2014.
- [13] Vasilic G., Živanović S.: *Modeliranje i analiza rekonfigurabilnog dvoosnog paralelnog mehanizma MOMA sa osnaženim translatorskim zglobovima*, TEHNIKA: Časopis saveza inženjera i tehničara Srbije, Tehnika-Mašinstvo, Broj 1, str. 57-63, 2016.

Vasilic, G., Zivanovic, S.

WORKSPACE ANALYSIS OF RECONFIGURABLE 2-DOF PARALLEL MECHANISM MOMA

Abstract: *This paper analyzes the workspace of 2 DOF parallel mechanism MOMA. The mechanism can be reconfigured, and the paper shows some of the possible configurations of the mechanism that can be implemented. For mechanism MOMA presents the equations that represent the solution of geometric problems. The equations are generalized and can be used to every possible configuration of parallel mechanism MOMA. The governing equations are used for further analysis of parallel mechanisms. In this paper, equations were used for the analysis of working space for different configurations of parallel mechanisms and applying the equation of inverse geometric problems and applying equations using direct geometrical problem.*

Key words: *parallel mechanism, reconfigurable mechanism, inverse and direct geometric problem, workspace*