

Modeliranje i analiza rekonfigurabilnog dvoosnog paralelnog mehanizma MOMA sa osnaženim translatorskim zglobovima

GORAN V. VASILI , Univerzitet u Beogradu,
Mašinski fakultet, Beograd
SAŠA T. ŽIVANOVI , Univerzitet u Beogradu,
Mašinski fakultet, Beograd

Originalni nau ni rad
UDC: 621.9
DOI: 10.5937/tehnika1601057V

U ovom radu je prikazano modeliranje i analiza jednog rekonfigurabilnog dvoosnog paralelnog mehanizma. Predstavljen je generalizovani model za rešavanje inverznog i direktnog kinemati kog problema. Izvedene su uopštene jedna ine koje predstavljaju rešenje kinemati kih problema paralelnog mehanizma koje važe za bilo koju konfiguraciju rekonfigurabilnog dvoosnog paralelnog mehanizma. Kao primeri realizacije pokazane su izdvojene karakteristi ne konfiguracije mehanizma. Za izdvojene konfiguracije odre en je radni prostor i analizirani su mogu i singularni položaji mehanizma.

Ključne reči: rekonfigurabilni dvoosni paralelni mehanizam, inverzni i direktni kinemati ki problem, radni prostor, singulariteti

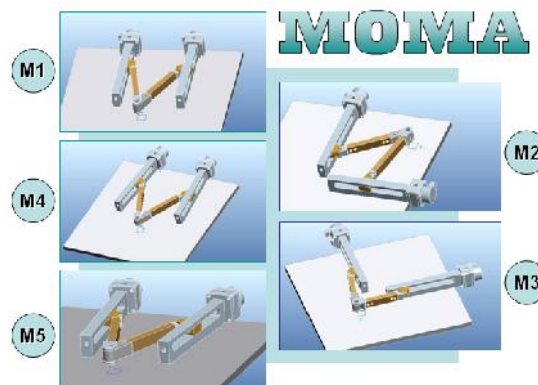
1. UVOD

Rekonfigurabilni dvoosni paralelni mehanizam - MOMA, pripada generaciji rekonfigurabilnih tehnoloških modula [1], koji može egzistirati samostalno ili u kombinaciji sa drugim mehanizmima, grade i nove mašine alatke. Akronim MOMA predstavlja Modularnu mašinu alatku otvorene arhitekture upravljanja, na bazi rekonfigurabilnog dvoosnog paralelnog mehanizma sa osnaženim translatorskim zglobovima i spojka konstantne dužine.

MOMA je uspostavljena kao sistem sastavnih elemenata (modularni sistem), na osnovu koga se može vršiti rekonfigurisanje i hardverskog i softverskog dela sistema [2]. U ovom radu se razmatra samo deo koji se odnosi na uspostavljanje generalizovanog modela za rešavanje inverznog i direktnog kinemati kog problema, analizu radnog prostora i singulariteta za izdvojene karakteristi ne konfiguracije rekonfigurabilnog paralelnog mehanizma, prikazane na slici 1.

Paralelni mehanizam razmatran u ovom radu je nastao uopštavanjem paralelnog mehanizma 2D TeMoPaM (Tehnološki modul sa paralelnim mehanizmom) [3]-[5], a po uzoru na paralelne mehanizme sli ne konfiguracije i to Trijoint [6], mehanizam sa dva paralelograma [7], Specht [8] i redudantno pogonjeni-

ravanski paralelni mehanizam [9].



Slika 1 – CAD modeli osnovnih pet tipova M1-M5 dvoosnog rekonfigurabilnog paralelnog mehanizma [2]

Tako e, istraživanja posve uju posebnu pažnju rekonfigurabilnim mašinama alatkama i obradnim sistemima ija se konfiguracija lako i brzo može menjati [10]. Karakteristika rekonfigurabilnih sistema je kastomizacija odnosno prilago avanje trenutnim potrebama proizvodnje na ekonomski prihvatljiv na in [11]. Razvijeni rekonfigurabilni dvoosni paralelni mehanizam omogu ava dva pristupa rekonfigurisanju: (i) zamenom modula na mašini i (ii) koriš enje integrisanih funkcija rekonfigurabilnosti na mašini [12].

O ekivani glavni rezultat konfigurisanja je jedna, prema nekom kriterijumu izabrana, konfiguracija mašine MOMA. Do glavnog rezultata potrebno je pre i put konfigurisanja, od geometrijskih i kinemati kih

Adresa autora: Goran Vasili , Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Kraljice Marije 16

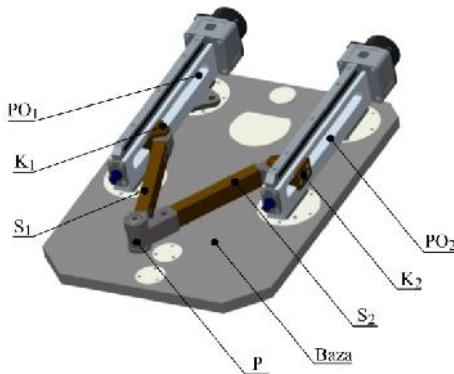
Rad primljen: 10.07.2015.

Rad prihva en: 26.10.2015.

modela, preko Jakobijana inverzne kinematike i analize singulariteta, analize radnog prostora, optimizacije nekih elementa mašine (npr. dužina spojki) [13], dobijanje virtuelnog prototipa, simulacija na virtuelnim prototipovima do konfigurisanja hardvera mašina na bazi raspoloživog fonda modula i testiranja upravljanja za kona nu verifikaciju konfigurisane nove mašine alatke [14].

2. OPIS REKONFIGURABILNOG DVOOSNOG PARALELNOG MEHANIZMA

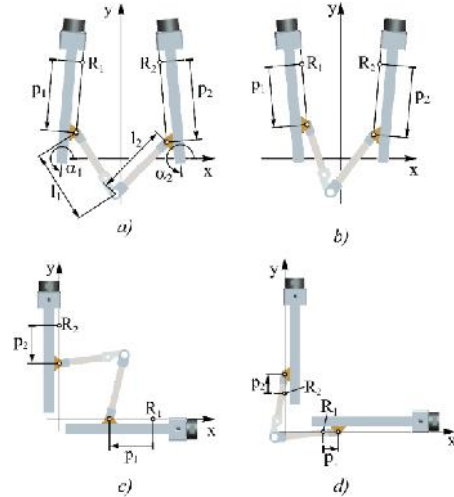
CAD model osnovne koncepcije rekonfigurabilnog dvoosnog paralelnog mehanizma, tip M1, je prikazan na slici 2. Paralelni mehanizam se sastoji od dve identične pogonske translatorne ose PO_1 i PO_2 koje obezbe uju translatorno kretanje kliza K_1 i K_2 duž voica. Maksimalan hod pogonskih osa iznosi $h=200$ mm. Za kliza e su vezane spojke S_1 i S_2 pomoću obrtnih zglobova. Tako e, spojke su i me usobno povezane obrtnim zglibom, a ova veza izme u spojki je ujedno i pokretna platforma paralelnog mehanizma P. Spojke paralelnog mehanizma su konstantne dužine.



Slika 2 – CAD model osnovne koncepcije dvoosnog rekonfigurabilnog paralelnog mehanizma, tip M1

Paralelni mehanizam je sastavljen od niza modula a rekonfigurabilnost mehanizma sa slike 2 se ogleda u tome što se me usobni položaj pojedinih modula može menjati (npr. pogonske ose) a pojedine module ini familija elemenata razli itih dimenzija (npr. spojke). Konfiguracija paralelnog mehanizma se može lako i brzo menjati prema programu gradnje [2, 14]. Programom gradnje je definisana svaka od mogu ih konfiguracija paralelnog mehanizma, dok su neke od mogu ih konfiguracija paralelnog mehanizma za dalju analizu u ovom radu prikazane na slici 3.

Konfiguracije paralelnog mehanizma se me usobno razlikuju po dužinama spojki l_i i po orijentacijama pogonskih osa definisanih uglovima α_i (slika 3a). Prilikom promene konfiguracije paralelnog mehanizma, pogonske ose PO_1 i PO_2 se rotiraju oko referentnih ta aka R_1 i R_2 .

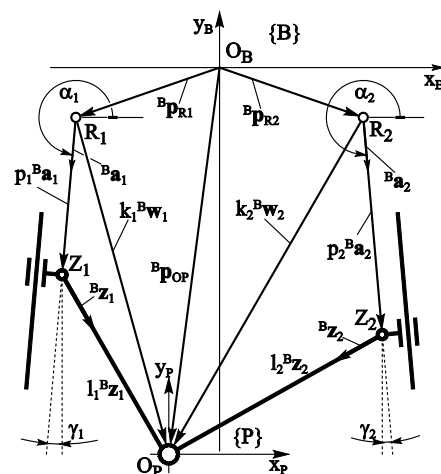


Slika 3 – Konfiguracije rekonfigurabilnog dvoosnog paralelnog mehanizma za analizu sa prikazom osnovnih parametara

Na slici 3a i 3b uglovi α_i su definisani izrazom $\alpha_i=3\pi/2+\gamma_i$. Za konfiguraciju sa slike 3a uglovi γ_i imaju vrednosti $\gamma_1=-5^\circ$ i $\gamma_2=+5^\circ$ a za konfiguraciju sa slike 3b $\gamma_1=+5^\circ$ i $\gamma_2=-5^\circ$. Za konfiguracije paralelnog mehanizma sa slike 3c i 3d menja se baza mehanizma i time se postiže da uglovi orijentacije pogonskih osa za konfiguraciju paralelnog mehanizma na slici 3c imaju vrednost $\alpha_1=\pi$ i $\alpha_2=3\pi/2$ dok za konfiguraciju na slici 3d $\alpha_1=0^\circ$ i $\alpha_2=\pi/2$. Na slici 3 su tako e prikazane i unutrašnje koordinate paralelnog mehanizma p_i kao i referentne ta ke R_i koji su bitni za dalju analizu rekonfigurabilnog paralelnog mehanizma.

3. GEOMETRIJSKI MODEL PARALELNOG MEHANIZMA I REŠAVANJE IKP I DKP

Na slici 4 je prikazan uopšten geometrijski model rekonfigurabilnog paralelnog mehanizma sa dva stepena slobode koji e se koristiti za rešavanje IKP-a i DKP-a.



Slika 4 – Uopšten geometrijski model paralelnog mehanizma MOMA

Za ovaj geometrijski model usvojena su dva koordinatna sistema i to nepokretni koordinatni sistem $\{B\}$ vezan za bazu i pokretni koordinatni sistem $\{P\}$ vezan za platformu paralelnog mehanizma.

Veli ine i vektori definisani geometrijom paralelnog mehanizma prikazani na slici 3 su:

- ${}^B\mathbf{p}_{Ri} = [x_{Ri} \ y_{Ri}]^T$ - vektor položaja referentnih ta aka R_i u odnosu na nepokretni k.s. $\{B\}$;
- ${}^B\mathbf{p}_{OP} = [x_P \ y_P]^T$ - vektor položaja platforme paralelnog P u odnosu na nepokretni k.s. $\{B\}$;
- ${}^B\mathbf{a}_i = [a_{xi} \ a_{yi}]^T$ - jedini ni vektori odre eni orijentacijom vo ica paralelnog mehanizma. Za sada je ostavljen opšti oblik jedini nih vektora ${}^B\mathbf{a}_i$ a u narednom poglavlju e biti ta no definisani u zavisnosti od konfiguracije paralelnog mehanizma;
- $p_i {}^B\mathbf{a}_i$ - vektori unutrašnjih koordinata, dok je p_i skalarna veli ina kontrolisana aktuatorima;
- $l_i {}^B\mathbf{z}_i$ - vektori odre eni pozicijom, orijentacijom i dužinom spojki. Vektori \mathbf{z}_i su jedini ni vektori i odre eni su orijentacijom spojki.

Prema geometrijskom modelu sa slike 3 mogu se napisati slede e vektorske jedna ine:

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

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

Kvadriranjem jedna ine (2) se dobija kvadratna jedna ina oblika

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

Na osnovu jedna ine (3) se može dobiti rešenje inverznog kinemati kog problema u opštem obliku

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

Zamenom parametara i poznatih veli ina paralelnog mehanizma u jedna inu (3) dobijaju se implicitne jedna ine (5) i (6) koje se dalje koriste za analizu paralelnog mehanizma

$$p_1^2 - 2p_1 [a_{x1}(x_P - x_{R1}) + a_{y1}(y_P - y_{R1})] + (x_P - x_{R1})^2 + (y_P - y_{R1})^2 - l_1^2 = 0 \quad (5)$$

$$p_2^2 - 2p_2 [a_{x2}(x_P - x_{R2}) + a_{y2}(y_P - y_{R2})] + (x_P - x_{R2})^2 + (y_P - y_{R2})^2 - l_2^2 = 0 \quad (6)$$

Za dalju analizu paralelnog mehanizma, jedna ina (5) e se posmatrati kao implicitna funkcija f_1 dok e se jedna ina (6) posmatrati kao implicitna funkcija f_2 .

Rešenje inverznog kinemati kog problema

Ako je poznat vektor ${}^B\mathbf{p}_{OP}$ odnosno koordinate platforme paralelnog mehanizma u nepokretnom koordinatnom sistemu $\{B\}$, rešavanjem jedna ina (5) i (6) po unutrašnjim koordinatama p_i dobijaju se jedna ine koje predstavljaju rešenje inverznog kinemati kog problema

$$p_1 = B_1 - \sqrt{B_1^2 - C_1} \quad (7)$$

$$p_2 = B_2 - \sqrt{B_2^2 - C_2} \quad (8)$$

pri emu je

$$B_i = a_{xi}(x_P - x_{Ri}) + a_{yi}(y_P - y_{Ri})$$

$$C_i = (x_P - x_{Ri})^2 + (y_P - y_{Ri})^2 - l_i^2 \quad (9)$$

Rešenje direktnog kinemati kog problema

Rešavanjem sistema jedna ina (5) i (6) po spoljašnjim koordinatama paralelnog mehanizma x_P i y_P dobija se rešenje direktnog kinemati kog problema. Jedna ina (10.a) važi za konfiguracije sa slike 2.a, 2.b, 2.d dok jedna ina (10.b) važi za konfiguraciju sa slike 2.c. Jedna ina (11) važi za sve konfiguracije.

$$y_P = \frac{-v_{10} - \sqrt{v_{10}^2 - 4v_9 v_{11}}}{2v_9} \quad (10.a)$$

$$y_P = \frac{-v_{10} + \sqrt{v_{10}^2 - 4v_9 v_{11}}}{2v_9} \quad (10.b)$$

$$x_P = v_7 + y_P v_8 \quad (11)$$

Uvedene smene pri rešavanju direktnog kinemati kog problema su date jedna inama (12).

$$v_1 = 2(p_1 a_{x1} + x_{R1})$$

$$v_2 = 2(p_1 a_{y1} + y_{R1})$$

$$v_3 = p_1^2 + 2p_1 (a_{x1} x_{R1} + a_{y1} y_{R1}) - l_1^2 + x_{R1}^2 + y_{R1}^2$$

$$v_4 = 2(p_2 a_{x2} + x_{R2})$$

$$v_5 = 2(p_2 a_{y2} + y_{R2})$$

$$v_6 = p_2^2 + 2p_2 (a_{x2} x_{R2} + a_{y2} y_{R2}) - l_2^2 + x_{R2}^2 + y_{R2}^2$$

$$v_7 = (v_6 - v_3) / (v_4 - v_1)$$

$$v_8 = (v_2 - v_5) / (v_4 - v_1)$$

$$v_9 = 1 + v_8^2$$

$$v_{10} = 2v_7 v_8 - v_1 v_8 - v_2$$

$$v_{11} = v_7^2 - v_1 v_7 + v_3 \quad (12)$$

4. ANALIZA RADNOG PROSTORA

Pre same analize radnog prostora, potrebno je upotpuniti izvedene jedna ine definisanjem jedini nih vektora ${}^B\mathbf{a}_i$. Prema slici 4 navedeni jedini ni vektori su

oblika ${}^B\mathbf{a}_i=[a_{xi} \ a_{yi}]^T$ ali se mogu napisati i na slede i na in

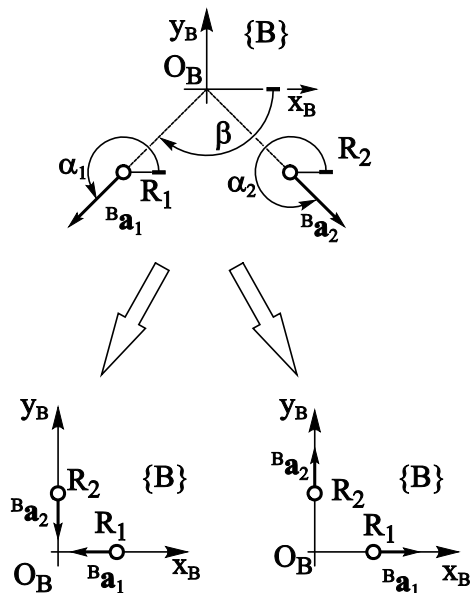
$${}^B\mathbf{a}_i = T^{-1} [\cos \gamma_1 \quad \sin \gamma_1]^T \tag{13}$$

Matrica T je matrica transformacije i uvedena je da bi se izvedene jedna ine uopštile i da bi važile za sve konfiguracije paralelnog mehanizma. Za konfiguracije paralelnog mehanizma sa slike 3a i 3b matrica transformacije je

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{14}$$

Matrica transformacije (14) je jedini na matrica i ne menja jedini ne vektore ${}^B\mathbf{a}_i$ pa je njihov oblik ${}^B\mathbf{a}_i=[\cos\alpha_i \ \sin\alpha_i]^T$.

Za konfiguracije mehanizma sa slike 3c i 3d se usvajaju uglovi $\alpha_1=225^\circ$ i $\alpha_2=315^\circ$. Ugao β je ugao za koji su jedini ni vektori zarotirani u odnosu na ose nepokretnog koordinatnog sistema $\{B\}$. Uvo enjem matrice transformacije (15) za konfiguraciju paralelnog mehanizma sa slike 3c i matrice transformacije (16) za konfiguraciju mehanizma sa slike 3d, jedini ni vektori ${}^B\mathbf{a}_i$ se transformacijom dovode u pravac osa koordinatnog sistema $\{B\}$. Opisane transformacije su prikazane na slici 5.



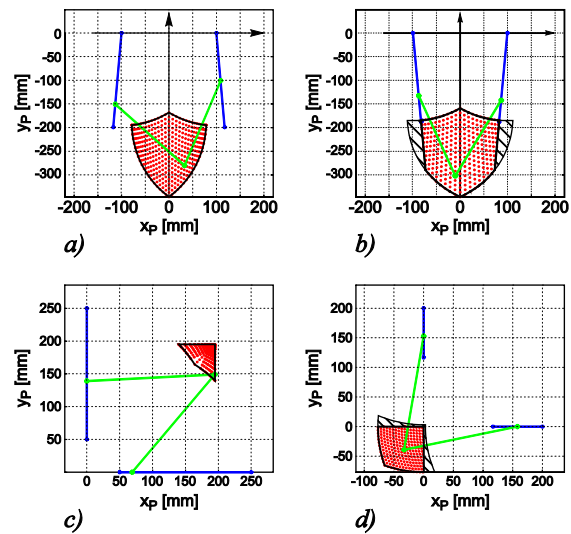
Slika 5 – Uopšten geometrijski model paralelnog mehanizma MOMA

$$T = \begin{bmatrix} \cos S & -\sin S \\ \sin S & \cos S \end{bmatrix} \tag{15}$$

$$T = \begin{bmatrix} \cos S & -\sin S \\ \sin S & \cos S \end{bmatrix} \tag{16}$$

Za analizu radnog prostora konfiguracija paralelnog mehanizma prikazanih na slici 3 su usvojeni slede i parametri:

- Za sve konfiguracije su koriš ene spojke jednakih dužina i to $l_1=l_2=195$ mm;
- Za konfiguraciju paralelnog mehanizma sa slike 3a i 3b, koordinate referentnih ta aka u koordinatni sistem $\{B\}$ su $x_{R1}=-100$ mm, $x_{R2}=100$ mm, $y_{R1}=y_{R2}=0$ mm;
- Za konfiguraciju paralelnog mehanizma sa slike 3c koordinate referentnih ta aka u koordinatni sistem $\{B\}$ su $x_{R1}=250$ mm, $y_{R1}=x_{R2}=0$ mm, $y_{R2}=250$ mm;
- Za konfiguraciju paralelnog mehanizma sa slike 3d koordinate referentnih ta aka u koordinatni sistem $\{B\}$ su $x_{R1}=117$ mm, $y_{R1}=x_{R2}=0$ mm, $y_{R2}=117$ mm;
- Za konfiguraciju paralelnog mehanizma sa slike 3a uglovi koji definišu orijentaciju vo ica su $\alpha_1=3\pi/2-5^\circ$ i $\alpha_2=3\pi/2+5^\circ$;
- Za konfiguraciju paralelnog mehanizma sa slike 3b uglovi koji definišu orijentaciju vo ica su $\alpha_1=3\pi/2+5^\circ$ i $\alpha_2=3\pi/2-5^\circ$.



Slika 6 – Radni prostori razli itih konfiguracija paralelnog mehanizma sa dva stepena slobode

Koriste i izvedene jedna ine i usvojene parametre paralelnog mehanizma za svaku konfiguraciju mehanizma sa slike 3, dobijeni su radni prostori koji su prikazani na slici 6. Dobijeni radni prostori su dostižni radni prostori ali zbog kona nih dimenzija elemenata paralelnog mehanizma i zbog same geometrije mehanizma, spojke mehanizma se mogu nalaziti samo za jedne strane vo ica pa samim time platforma paralelnog mehanizma se ne može na i u svakoj ta ki radnog prostora. Ovaj deo radnog prostora je na slici 6b i 6d šrafiran kosim linijama.

5. JAKOBIJAN MATRICA I ANALIZA SINGULARITETA

Za dalju analizu rekonfigurabilnog paralelnog mehanizma sa slike 3 izvedena je Jakobijan matrice inverzne kinematike - jedna ine (17) i (18) kao i Jakobijan matrica direktne kinematike data jedna inama (19) i (20)

$$J_p = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial p_1} & \frac{\partial f_1}{\partial p_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial p_1} & \frac{\partial f_2}{\partial p_2} \end{bmatrix} \tag{17}$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial p_i} = 2p_i - 2[a_{xi}(x_p - x_{Ri}) + a_{yi}(y_p - y_{Ri})]$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial p_j} = \frac{\partial f_j}{\partial p_i} = 0 \tag{18}$$

$$J_x = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_p} & \frac{\partial f_1}{\partial y_p} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_p} & \frac{\partial f_2}{\partial y_p} \end{bmatrix} \tag{19}$$

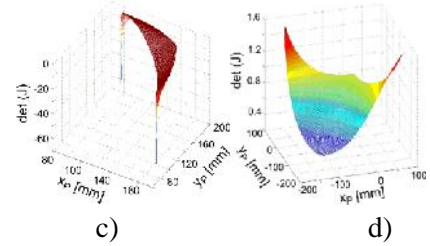
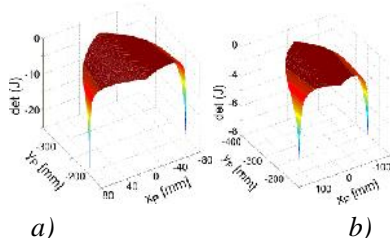
$$\frac{\partial f_i}{\partial x_p} = 2(x_p - x_{Ri}) - 2p_i a_{xi}$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial y_p} = 2(y_p - y_{Ri}) - 2p_i a_{yi} \tag{20}$$

Na osnovu Jakobijan matrica inverzne i direktne kinematike dobijena je Jakobijan matrica paralelnog mehanizma iji je opšti oblik dat jedna inom (21).

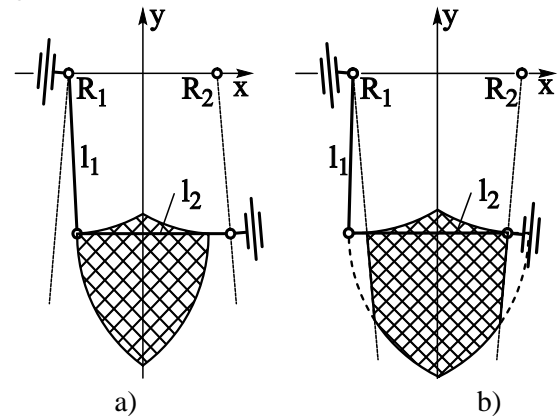
$$J = J_p^{-1} \cdot J_x \tag{21}$$

U jedna inama (18) i (20) figurišu komponente jedini nih vektora $\mathbf{B}^i a_i$, a za analize pojedinih konfiguracija paralelnog mehanizma koriste se ve izvedene matrice transformacije (14), (15) i (16). Prema jedna ini (21), a sa parametrima paralelnog mehanizma iz prethodnog poglavlja, za svaku konfiguraciju sa slike 3. izra unate su vrednosti determinante Jakobijan matrice za svaku ta ku dostizivog radnog prostora mehanizma a rezultati su u obliku dijagrama prikazani na slici 7.



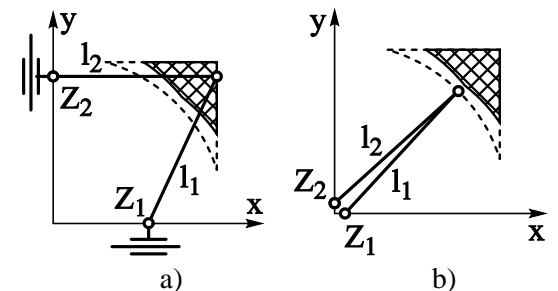
Slika 7 – Vrednosti detJ za razli ite konfiguracije paralelnog mehanizma

Analiziraju i vrednosti det(J) i dijagrame sa slike 7 dobijaju se singularni položaji razmatranih konfiguracija paralelnog mehanizma sa slike 3. Na slici 8a i 8b su prikazane singularne konfiguracije paralelnih mehanizama sa slike 3a i 3b, respektivno. Konfiguracije paralelnog mehanizma sa slike 3a i 3b nemaju singularitete direktne kinematike.



Slika 8 – Singularne konfiguracije: a) za mehanizme sa slike 3a; b) za mehanizme sa slike 3b

Na slici 9 su prikazane singularne konfiguracije paralelnog mehanizma sa slike 3c i to singularitet inverzne kinematike i singularitet direktne kinematike. Singulariteti inverzne kinematike sa javljaju kada je bar jedna od koordinate platforme jednake dužinama spojki (slika 9a). Za usvojene parametre paralelnog mehanizma to je $x_p=195[\text{mm}]$ i/ili $y_p=195[\text{mm}]$. Singulariteti direktne kinematike sa javljaju kada se zglobovi izme u spojki i kliza a na u u koordinatnom po etku, odnosno kada njihove koordinate imaju vrednosti $x_{z1} = x_{z2} = y_{z1} = y_{z2} = 0$.

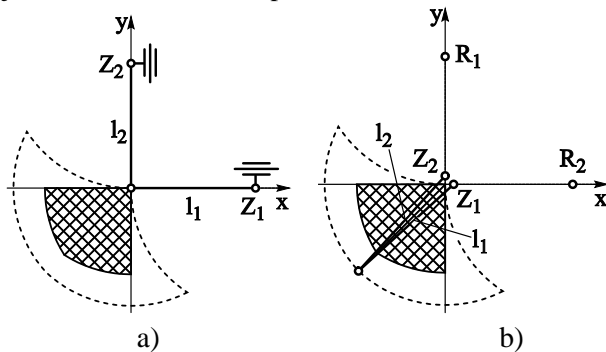


Slika 9 – Singularne konfiguracije mehanizma sa slike 3c - a) Singulariteti inverzne kinematike ; a) Singulariteti direktne kinematike

Kao u prethodnom slučaju, mehanizam sa slike 3d ima singularitete inverzne kinematike (slika 10a) i singularitete direktne kinematike (slika 10b).

Singularitet inverzne kinematike se javlja kada su koordinate platforme $x_P=y_P=0$ dok se singularitet direktne kinematike javlja kada koordinate zglobova izmeću spojki i kliza imaju vrednosti $x_{Z1} = x_{Z2} = y_{Z1} = y_{Z2} = 0$.

Na slikama 8-10 prikazane su pozicije platforme paralelnog mehanizma u singularnim položajima mehanizma. Međutim, zbog geometrije sastavnih elemenata mehanizma ali i celog sklopa mehanizma platforma paralelnog mehanizma se ne može naći u svakoj tački radnog prostora dobijenog na osnovu izvedenih jednačina kinematičkih problema.



Slika 10 – Singularne konfiguracije mehanizma sa slike 3d - a) Singulariteti inverzne kinematike; b) Singulariteti direktne kinematike

Na slikama 8-10 radni prostor dobijen proračunom je uokviren isprekidanim linijama dok je radni prostor za realni fizički model šrafiran i uokviren punom linijom. Uzimajući ove činjenice u obzir, konfiguracija paralelnog mehanizma sa slike 3b ne može zauzeti singularni položaj prikazan na slici 8b. Takođe, konfiguracije sa slike 3c i 3d ne mogu zauzeti položaje u kojima se javljaju singulariteti direktne kinematike prikazanih na slikama 9b i 10b, respektivno.

6. ZAKLJUČAK

Osnovni cilj ovog rada je uspostavljanje generalizovanog kinematičkog modela za rešavanje inverznog i direktnog kinematičkog problema rekonfigurabilnog dvoosnog paralelnog mehanizma. Izvedene opšte jednačine su uz promenu pojedinih parametara dalje upotrebljive za formiranje upravljanja za bilo koju konfiguraciju rekonfigurabilnog paralelnog mehanizma, čime se omogućava osobina integrisne rekonfigurabilnosti upravljanja ovakve mašine.

Pre fizičke realizacije bilo koje konfiguracije paralelnog mehanizma, izvedene jednačine su korištene za analizu željene konfiguracije. Najpre je analiziran radni prostor a potom i singulariteti paralelnog mehanizma. Kako je i pokazano u radu, ovakve analize se mogu sprovesti za bilo koju konfiguraciju i time doći do optimalne konfiguracije koja će ispunjavati potrebe korisnika. Sprovedenom analizom za četiri prikazane konfiguracije, zaključuje se da promenom pojedinih parametara mehanizma, osim na oblik i veličinu radnog prostora može se uticati i na singularitete, odnosno ako se znaju singularni položaji mehanizma, fizički se mogu sprečiti a samim time i izbegnuti.

Dalji planovi za opisan paralelni mehanizam je istraživanje novih konfiguracija rekonfigurabilnog mehanizma kao i implementacija mehanizma u hibridne rekonfigurabilne mehanizme sa tri i više stepeni slobode.

LITERATURA

- [1] Koren Y, Heisel U, Jovane F, Moriwaki T, Pritschow G, Ulsoy G, Brussel H. V, Reconfigurable Manufacturing Systems, Annals of the CIRP, 48/2, p. 527-540. 1999.
- [2] Živanović S, Vasilić 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. ISBN 978-99976-623-2-3, December 2014.
- [3] 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.
- [4] Živanović S, Tehnološki modul sa paralelnim mehanizmom, Magistarska teza, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 2000.
- [5] Živanović S, Parallel Kinematic Machines, International Journal of Production Engineering and Computers, Vol. 3, No. 3, p.49-54, 2000.
- [6] Šika, Z, Hamrl V, Valášek M, Beneš P, Calibrability as additional design criterion of parallel kinematic machines, Mechanism and Machine Theory, Vol. 50, p.48-63, 2012.
- [7] 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.

- [8] 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.
- [9] Jun W, Jinson, W Liping, W, Optimal Kinematic Design and Application of a Redundantly Actuated 3DOF planar Parallel Manipulator, Journal of Mechanical design, Vol 13, 2008.
- [10] 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.
- [11] Landers G, Mid K, Koren Y, Reconfigurable Machine Tools, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 50, No.1, pp. 269-274, 2001.
- [12] Moon Y. M, Reconfigurable Machine Tool Design, Chapter 7 from book Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories, pp. 111-137. <http://link.springer.com/book/10.1007%2F3-540-29397-3>
- [13] Vasilji G., Živanovi S, Kokotovi B, Glavonji 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.
- [14] Živanovi S, Glavonji M, Kokotovi B, Dimi Z, Stona dvoosna rekonfigurabilna mašina sa paralelnom kinematikom – MOMA, Tehni ko rešenje (Novi laboratorijski proizvod, 82), Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 2014.

SUMMARY

MODELING AND ANALYSIS OF 2-AXIS RECONFIGURABLE PARALLEL MECHANISM MOMA WITH TRANSLATORY ACTUATED JOINTS

This paper presents modeling and analysis of a 2-axis reconfigurable parallel mechanism. In this paper, generalized model for solving of inverse and direct kinematic problems is presented. Generalized equations that represent the solution of the kinematic problems of parallel kinematic mechanism applicable to any configuration of 2-axis reconfigurable parallel mechanism are derived. Some of characteristic configurations of 2-axis parallel mechanism are shown as examples. For the selected configurations the workspaces are determined and the possible singular positions of these configurations are analyzed.

Key words: 2-axis reconfigurable parallel mechanism, inverse and direct kinematic problem, workspace, singularities