

Radni prostor O-X glide hibridnog mehanizma

Cvijetin Mladenović, Slobodan Tabaković, Milan Zeljković
 Departman za proizvodno mašinstvo
 Fakultet tehničkih nauka
 Novi Sad, Srbija
mladjja@uns.ac.rs, tabak@uns.ac.rs, milanz@uns.ac.rs

Sadržaj— Kao posledica razvoja proizvoda, alata za obradu i procesa obrade, kao i zbog stalnog rasta zahteva tržišta, pojavila se potreba za operacijama obrade koje se teško mogu izvesti na konvencionalno građenim mašinama alatkama. Primenom paralelnih mehanizama u gradnji mašina alatki razvijene su nove mašine koje mogu da ispune prethodne uslove.

Međutim, paralelni mehanizmi nisu idealni za primenu u mašinama alatkama prvenstveno zbog radnog prostora koji je nepravilnog oblika. Njihovim kombinovanjem sa serijskim mehanizmima nastali su hibridni mehanizmi čiji je osnovni cilj iskorišćavanje najboljih karakteristika serijskih i paralelnih mehanizama, a da pri tome loše karakteristike oba mehanizma budu minimalne.

U radu je prikazana matematička analiza radnog prostora hibridnog “O-X glide” mehanizma, i njegova verifikacija na prototipu mehanizma izrađenom metodom brze izrade prototipa. Hibridni mehanizam “O-X glide” je razvijen na Departmanu za proizvodno mašinstvo Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu.

Ključne riječi: Hibridni mehanizam, O-X glide, radni prostor

I. UVOD

Poslednjih godina paralelni mehanizmi privlače pažnju istraživača koji ih smatraju alternativom serijskim mehanizmima za primenu u mašinama alatkama, manipulatorima i robotima [7].

Razmatrajući mehanizme sa serijskom kinematikom može se zaključiti da su oni dostigli svoj zenit u pogledu performansi dinamičkog ponašanja. Odnosno, iako imaju dobre radne karakteristike (veliki radni prostor i visoka fleksibilnost) serijski mehanizmi imaju određene nedostatake vezane za krutost i brzinu kretanja [7].

Nasuprot tome, paralelni mehanizmi imaju prednosti nad svojim serijskim (manje pokretne mase i veća krutost [7]) koje su im omogućile superiorne dinamičke sposobnosti (višestruko povećanje brzina kretanja).

Međutim, većina poznatih paralelnih mehanizama imaju mali radni prostor nepravilnog oblika, kao i složene matematičke relacije kojima se definišu kretanja [1].

Kao pokušaj iskorišćenja najboljih karakteristika serijskih i paralelnih mehanizama, a da pri tome njihove loše karakteristike budu minimalne, nastali su hibridni mehanizmi,

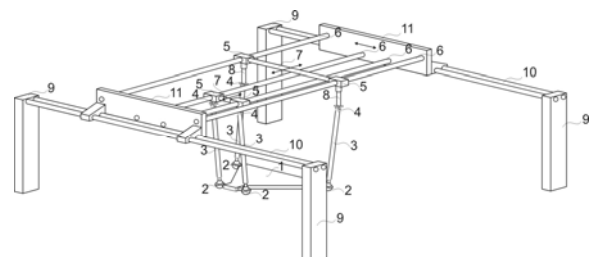
koji predstavljaju svojevrsnu kombinaciju ova dva tipa mehanizma.

U radu je prikazana matematička analiza radnog prostora hibridnog “O-X glide” mehanizma, sprovedena u programskom sistemu *Wolfram Mathematica 8* na osnovu matematičkih relacija dobijenih analizom direktne kinematike posmatranog mehanizma. Takođe, na prototipu “O-X glide” mehanizma, napravljenom brzom izradom prototipa, izvedena je i verifikacija radnog prostora ovog mehanizma.

II. GEOMETRIJA “O-X GLIDE” HIBRIDNOG MEHANIZMA

Hibridni “O-X glide” mehanizam sadrži ravanski paralelni mehanizam sa štapovima fiksne dužine, i odgovarajuću noseću strukturu koja omogućava translatorno kretanje ravanskog mehanizma.

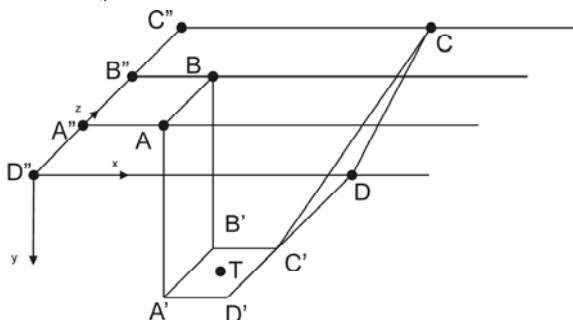
Slika 1 prikazuje šemu hibridnog “O-X glide” mehanizma. Na slici se uočava ravanski paralelni mehanizam čiju osnovu čine pokretna platforma (1), koja je preko sfernih zglobova (2) vezana za četiri štapa (3) konstantne dužine. Štapovi su na drugom kraju preko zglobova sa jednim, rotacionim stepenom slobode kretanja (4) vezani za klizače (5), od kojih se svaki kreće po sopstvenoj vodiči (6). Klizači su grupisani u parove koji su spojeni krutom vezom (7) čime se obezbeđuju njihova ista brzina i ubrzanje. U cilju povećanja autonomije kretanja grupa klizača oni su pozicionirani na različitim rastojanjima u pravcu vertikalne ose od pokretne platforme, što omogućava njihovo mimoilaženje u ravni, a time i dualnost kretanja mehanizma, odnosno kretanje u opruženom (O) i ukrštenom (X) položaju. Kompenzacija tako nastale razlike u rastojanjima između klizača i pokretne platforme vrši se uvođenjem vertikalnih kompenzacionih elemenata (8), na višim klizačima. Na ovaj način, zglobovi između štapova i klizača su pozicionirani u istoj ravni paralelnoj sa pokretnom platformom, i omogućena je primena štapova iste dužine što u mnogome pojednostavljuje konstrukciju mehanizma.



Slika 1. Šema hibridnog O-X glide mehanizma [9]

Osnovna karakteristika "O-X glide" mehanizma je upravo dualnost njegove strukture, te može da funkcioniše u opruženom (O) i ukrštenom (X) obliku. Takođe, dimenzije radnog prostora su, zbog te dualnosti, veće nego kod sličnih paralelnih mehanizama. Iz istog razloga, pravilnim izborom upravljačkog sistema, moguće je eliminisati singularne tačke (u kojima krutost mehanizma značajno opada i mehanizam gubi funkciju) a da pri tome nema gubitka dimenzija i oblika radnog prostora.

Geometrijski model paralelnog mehanizma, koji predstavlja osnovu hibridnog "O-X glide" mehanizma, prikazan je u pojednostavljenom obliku na slici 2.



Slika 2. Pojednostavljeni geometrijski model paralelnog mehanizma

Uzimajući u obzir prethodno, mogu se napisati vektorske jednačine hibridnog "O-X glide" mehanizma:

$$\overrightarrow{OD''} + \overrightarrow{D''D} + \overrightarrow{DD'} = \overrightarrow{OT} + \overrightarrow{TD'}$$

$$\overrightarrow{OA''} + \overrightarrow{A''A} + \overrightarrow{AA'} = \overrightarrow{OT} + \overrightarrow{TA'}$$

$$\overrightarrow{OB''} + \overrightarrow{B''B} + \overrightarrow{BB'} = \overrightarrow{OT} + \overrightarrow{TB'}$$

$$\overrightarrow{OC''} + \overrightarrow{C''C} + \overrightarrow{CC'} = \overrightarrow{OT} + \overrightarrow{TC'}$$

Uz pretpostavku da je:

$$\overrightarrow{OD''} = 0; \overrightarrow{OA''} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ a \end{pmatrix}; \overrightarrow{OB''} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 2a \end{pmatrix}; \overrightarrow{OC''} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 3a \end{pmatrix}$$

gde je a – rastojanje između horizontalnih vođica.

Takođe, sama konstrukcija hibridnog mehanizma nameće određena ograničenja:

$$\overrightarrow{A''A} = \overrightarrow{B''B}$$

$$\overrightarrow{C''C} = \overrightarrow{D''D}$$

Kao što je već napomenuto hibridni "O-X glide" mehanizam ima mogućnost kretanja u opruženom i ukrštenom obliku, te je stoga i analiza kinematike ovog mehanizma sprovedena za ova dva karakteristična oblika.

III. ANALIZA KINEMATIKE "O-X GLIDE" MECHANIZMA

Analiza kinematike hibridnog "O-X glide" mehanizma sprovodi se samo za njegov paralelni mehanizam, pri čemu se on, radi pojednostavljenja problema, posmatra kao ravanski, odnosno ne uzima se u obzir „z“ koordinata.

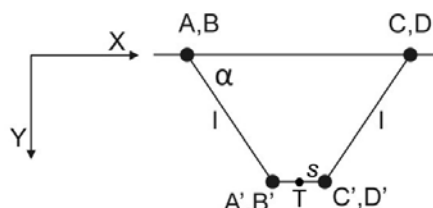
A Inverzna kinematika

Pri rešavanju inverzne kinematike "O-X glide" mehanizma položaj težišta (T) pokretne platforme se smatra poznatim, dok je cilj određivanje položaja klizača AB i CD, odnosno:

$$P_{AB,CD} = f(x_T, y_T)$$

• Opružen oblik

Na slici 3 prikazana je ravanska šema opruženog oblika "O-X glide" mehanizma za koji je u nastavku izvršena inverzna kinematska analiza.



Slika 3. Ravanska šema opruženog oblika O-X glide mehanizma

Položaj klizača AB na osnovu položaja težišta pokretne platforme, može se izraziti na sledeći način:

$$x_{AB} = x_T - \frac{s}{2} - l \cos \alpha = x_T - \frac{s}{2} - l \sqrt{1 - \left(\frac{y_T}{l}\right)^2}$$

$$x_{AB} = x_T - \frac{s}{2} - \sqrt{l^2 - y_T^2}$$

Dok se položaj klizača CD na isti način može izraziti kao:

$$x_{CD} = l \cos \alpha + \frac{s}{2} + x_T = l \sqrt{1 - \left(\frac{y_T}{l}\right)^2} + \frac{s}{2} + x_T$$

$$x_{CD} = \sqrt{l^2 - y_T^2} + \frac{s}{2} + x_T$$

gde su: l – dužina štapova

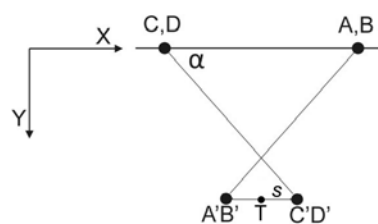
s – širina pokretne platforme

a – rastojanje između horizontalnih vođica

α – ugao između štapova i horizontalnih vođica

• Ukršten oblik

Na slici 4 prikazana je ravanska šema ukrštenog oblika "O-X glide" mehanizma, a u nastavku je data njena inverzna kinematska analiza.



Slika 4. Ravanska šema ukrštenog oblika O-X glide mehanizma

Položaj klizača AB i CD na osnovu položaja težišta pokretne platforme, može se izraziti na sledeći način:

$$x_{AB} = x_T - \frac{s}{2} + l \cos \alpha = x_T - \frac{s}{2} + l \sqrt{1 - \left(\frac{y_T}{l}\right)^2}$$

$$x_{AB} = x_T - \frac{s}{2} + \sqrt{l^2 - y_T^2}$$

$$x_{CD} = \frac{s}{2} + x_T - l \cos \alpha = \frac{s}{2} + x_T - l \sqrt{1 - \left(\frac{y_T}{l}\right)^2}$$

$$x_{CD} = \frac{s}{2} + x_T - \sqrt{l^2 - y_T^2}$$

B Direktna kinematika

Pri rešavanju direktne kinematike položaj klizača AB i CD, se smatra poznatim, dok je cilj određivanje položaja težišta pokretne platforme (T), odnosno:

$$\mathbf{P}_T = \mathbf{f}(\mathbf{x}_{AB}, \mathbf{x}_{CD})$$

U opštem slučaju inverzna kinematika paralelnih mehanizama je prilično jednostavna, dok je direktna kinematika često vrlo kompleksna. Međutim, zbog svoje jednostavne konstrukcije i inverzna i direktna kinematika "O-X glide" mehanizma su vrlo logički jednostavne i jasne.

• Opušten oblik

Direktna kinematska analiza opuštenog oblika "O-X glide" mehanizma (slika 3), odnosno određivanje položaja tačke T u zavisnosti od položaja klizača AB i CD, može biti predstavljena na sledeći način:

$$\begin{pmatrix} x_{AB} \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} l \cos \alpha \\ l \sin \alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} TA'_x \\ TA'_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_T \\ y_T \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x_{CD} \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -l \cos \alpha \\ l \sin \alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} TD'_x \\ TD'_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_T \\ y_T \end{pmatrix}$$

Odnosno, konačno:

$$\begin{pmatrix} x_T \\ y_T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{x_{AB} + x_{CD}}{2} \\ \frac{1}{2} \sqrt{4l^2 - (x_{CD} - x_{AB} - s)^2} \end{pmatrix}$$

• Ukršten oblik

Na isti način kao i u prethodnom slučaju položaj težišta pokretne platforme (T) za ukršten oblik "O-X glide" mehanizma (slika 3), može biti predstavljen na sledeći način:

$$\begin{pmatrix} x_{AB} \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -l \cos \alpha \\ l \sin \alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} TA'_x \\ TA'_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_T \\ y_T \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x_{CD} \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} l \cos \alpha \\ l \sin \alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} TD'_x \\ TD'_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_T \\ y_T \end{pmatrix}$$

Konačno:

$$\begin{pmatrix} x_T \\ y_T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{x_{AB} + x_{CD}}{2} \\ \frac{1}{2} \sqrt{4l^2 - (x_{CD} - x_{AB} + s)^2} \end{pmatrix}$$

IV. TEORETSKI RADNI PROSTOR "O-X GLIDE" MEHANIZMA

Teoretski radni prostor hibridnog "O-X glide" mehanizma je zapremina omeđena svim mogućim položajima pokretne platforme. Za analizu radnog prostora "O-X glide" mehanizma dovoljno je analizirati radni prostor njegovog ravanskog

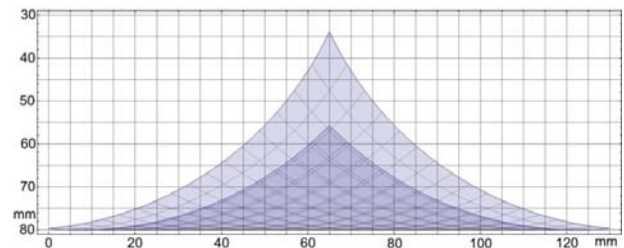
paralelnog mehanizma, jer ukupan teoretski radni prostor hibridnog mehanizma nastaje transliranjem radnog prostora ravanskog paralelnog mehanizma duž uzdužnih vodica.

Radni prostor ravanskog paralelnog mehanizma može se definisati na osnovu direktne kinematike za koju postoje rešivi analitički izrazi za opušten (a) i ukršten (b) oblik mehanizma:

$$a) \begin{pmatrix} x_T \\ y_T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{x_{AB} + x_{CD}}{2} \\ \frac{1}{2} \sqrt{4l^2 - (x_{CD} - x_{AB} - s)^2} \end{pmatrix};$$

$$b) \begin{pmatrix} x_T \\ y_T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{x_{AB} + x_{CD}}{2} \\ \frac{1}{2} \sqrt{4l^2 - (x_{CD} - x_{AB} + s)^2} \end{pmatrix}$$

Uvrštavanjem ovih izraza u softverski sistem *Wolfram Mathematica 8*, uz usvojena ograničenja da je dužina štapova 80mm, širina pokretne platforme 20mm, a dužina poprečnih vodica 130mm, dobijene su površine radnog prostora ravanskog paralelnog mehanizma. Na slici 5 prikazan je radni prostor paralelnog mehanizma u ravni, pri čemu je tamnijom bojom označena površina koja se ostvaruje u opuštenom obliku mehanizma a svetlijom bojom površina dobijena kretanjem mehanizma u ukrštenom obliku.



Slika 5. Radni prostor ravanskog paralelnog mehanizma za njegov opušten i ukršten oblik (u ravni)

Na osnovu prethodno usvojenih dimenzija paralelnog mehanizma, metodom brze izrade prototipa napravljen je prototip hibridnog "O-X glide" mehanizma koji je prikazan na slici 6.

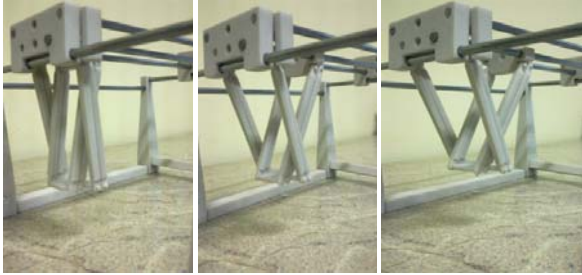


Slika 6. Prototip hibridnog O-X glide mehanizma

Na ovom prototipu, pomeranjem klizača i praćenjem položaja težišta pokretne platforme, sprovedena je verifikacija radnog prostora "O-X glide" mehanizma. Na taj način je ustanovljeno da radni prostor prototipa "O-X glide" mehanizma odgovara matematički dobijenom radnom prostoru. Karakteristični položaji prototipa "O-X glide" mehanizma, u kojima je praćen položaj težišta pokretne platforme, prikazani su na slici 7, za opušten oblik, i na slici 8, za ukršten oblik mehanizma.



Slika 7. Karakteristični položaji O-X glide mehanizma u opruženom obliku



Slika 8. Karakteristični položaji O-X glide mehanizma u ukrštenom obliku

V. ZAKLJUČAK

Kao jedan od najvećih nedostataka paralelnih mehanizama izdvaja se nepovoljan oblik i veličina radnog prostora. U nekim slučajevima ovaj nedostatak je moguće umanjiti kombinovanjem paralelnih sa serijskim mehanizmima. U radu je analiziran radni prostor jednog takvog, hibridnog, mehanizma, razvijenog na Departmanu za proizvodno mašinstvo Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, koji se naziva mehanizam.

Matematička analiza radnog prostora sprovedena je samo za paralelni mehanizam koji je glavni element hibridnog mehanizma, i dobijen je radni prostor (u ravni) čijim se transliranjem duž "z" ose dobija radni prostor hibridnog mehanizma.

Na teorijskom radnom prostoru moguće je uočiti dve preklapljene složene površine koje predstavljaju radne prostore paralelnog mehanizma u njegovom opruženom i ukrštenom obliku. Stoga, analizirajući prikazani radni prostor može se zaključiti da mehanizam u ukrštenoj formi ima nešto veći radni prostor nego u opruženoj formi. Međutim, treba povesti računa o mogućoj pojavi singularnih tačaka pri mimoilaženju klizača, odnosno pri prelasku mehanizma iz opružene u ukrštenu formu i obrnuto.

Verifikacija matematički dobijenog teorijskog radnog prostora izvršena je na prototipu mehanizma napravljenom metodom brze izrade prototipova, pri čemu je konstatovano da teorijski radni prostor odgovara radnom prostoru prototipa mehanizma.

LITERATURA

[1.] Angeles, J.: *Fundamentals of Robotic Mechanical Systems*, Monographic publication, Springer-Verlag, Berlin, 2002, ISBN 0-387-95368-X

[2.] Bi, Z.M., Lang, S.Y.T.: *Joint workspace of parallel kinematic machines*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 25, Elsevier, 2009, pp.57–63, ISSN: 0736-5845.

[3.] Chablat, D., Wenger, P., Merlet, J.: *Workspace Analysis Of The Orthoglide Using Interval Analysis*, 8th International Symposium on Advances in Robot Kinematics, Kluwer Academic Publishers, 2002, pp.1-10, ISBN 140-2022484.

[4.] Glavonjic, M., Milutinovic, D.: *Parallel structured milling machines with long X travel*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 24, Elsevier, 2008, pp.310–320, ISSN: 0736-5845.

[5.] Kanaan, D., Wenger, P., Chablat, D.: *Kinematic analysis of a serial-parallel machine tool: The VERNE machine*, Mechanism and Machine Theory 44, Elsevier, 2009, pp.487–498, ISSN: 0094-114X.

[6.] Liu, X.J., Wang, J., Zheng, H.J.: *Optimum design of the 5R symmetrical parallel manipulator with a surrounded and good-condition workspace*, Robotics and Autonomous Systems 54, North-Holland, 2006, pp.221–233, ISSN: 0921-8890.

[7.] Pashkevich, A., Chablat, D., Wenger, P.: *The Orthoglide: Kinematics and Workspace Analysis*, 9th International Symposium on Advances in Robot Kinematics, Kluwer Academic Publishers, 2004, pp.1-10, ISBN 140-2022484.

[8.] Pashkevich, A., Wenger, P., Chablat, D.: *Design strategies for the geometric synthesis of Orthoglide-type mechanisms*, Mechanism and Machine Theory 40, Elsevier, 2005, pp.907–930, ISSN: 0094-114X.

[9.] Tabaković, S., Zeljković, M., Gatalo, R., Mladenović, C.: *Uređaj za manipulaciju radnim predmetima ili alatima kod mašina alatki i industrijskih manipulatora*, Glasnik intelektualne svojine, Br. 2/2012, Zavod za intelektualnu svojinu Republike Srbije, Beograd, Broj 20111243.

[10.] Verdes, D., Stan, S.D., Manic, M., Bălan, R., Maties, V.: *Kinematics analysis, workspace, design and control of 3-RPS and TRIGLIDE medical parallel robots*, 2nd Conference on Human System Interactions, HSI '09, 21-23 May, 2009, Catania, Italy, pp.103-108, ISBN : 978-1-4244-3960-7.

Napomena: U radu je prikazan deo rezultata istraživanja na projektu "Savremeni prilazi u razvoju specijalnih rešenja uležištenja u mašinstvu i medicinskoj protetiци" TR 35025, koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

ABSTRACT

As a result of development of products, tools and machining processes, as well as with a continuous increase of market demands, the need for machining operations that are difficult to perform on conventional machine tools has been increased.

By using parallel mechanisms in the construction of machine tools were developed new machines that can meet the previous requirements. However, parallel mechanisms are not ideal for use in machine tools primarily because the workspace which is irregular in shape. Combining them with serial mechanisms were created hybrid mechanisms with the main aim to use the best features of serial and parallel mechanisms.

This paper presents a mathematical analysis of a hybrid mechanism workspace and its verification on a prototype fabricated using rapid prototyping. Hybrid mechanism has been developed at the Department of Production Engineering, Faculty of Technical Sciences in Novi Sad.

Keywords: Hybrid mechanism, OX glide, workspace

WORKSPACE OF THE HYBRID MECHANISM

Cvijetin Mladenović, Slobodan Tabaković, Milan Zeljković