

NOVI PARALELNI MEHANIZAM ZA GLODALICE SA DUGAČKOM X OSOM²⁾

Rezime

Kao što je poznato, oblik i dimenzije radnog prostora su među najvećim nedostacima mašina sa paralelnom kinematikom (MPK). Mehanizmi Hexaglide i Triaglide su primeri kod kojih je radni prostor izdužen po jednoj osi, kao glavnoj osi kretanja što je inače uobičajena karakteristika mašina sa serijskom strukturom. Polazeći od značaja izdvajanja jedne ose kao dominantne razvijen je novi prostorni paralelni mehanizam sa 3 stepena slobode za horizontalne i vertikalne glodalice. U radu je opisana struktura mehanizma i njegova primena na primeru razvijenog prototipa vertikalne glodalice.

Ključne reči: paralelni mehanizam, modeliranje, glodalica

1. UVOD

Mašine alatke i roboti sa paralelnom kinematikom su uveliko prepoznati kao novi-revolucionarni koncept. Rezultati istraživanja u ovoj oblasti su publikovani u velikom broju radova. Međutim, iznalaženje struktura sa superiornim performansama i niskom cenom u odnosu na konvencionalne mašine još nije završeno [1]. Do sada je razvijen veliki broj MPK različitih topologija sa 3 – 6 stepeni slobode [2,3,4]. Međutim, 5 – osna obrada nije uvek neophodna za većinu delova uobičajene složenosti oblika. Iz ovih razloga su u poslednje vreme istraživanja fokusirana na razvoj mašina sa manje od 6 stepeni slobode [5]. Zbog fizičkih i komercijalnih ograničenja mnogi proizvođači trenutno razvijaju troosne MPK za obradu velikim brzinama. Kao što je poznato oblik i dimenzije radnog prostora su među najvećim nedostacima MPK. Pored prednosti koje pružaju paralelni mehanizmi sa konstantnim dužinama spojki, HEXAGLIDE i TRIAGLIDE [4,6] su mehanizmi gde je korišćenjem paralelnih vodica izdužena jedna osa radnog prostora, kao glavna osa kretanja, što je karakteristično za serijske mašine. Polazeći od značaja izduživanja jedne ose kao dominantne, razvijen je novi paralelni mehanizam sa 3 stepena slobode. U poređenju sa sličnim, ovaj mehanizam ima nekoliko prednosti: pravilan radni prostor, što je karakteristika serijskih mašina, veću krutost po prirodi koncepcije sa ukrštenim štapovima i vrlo dobar odnos sila i brzina u celom radnom prostoru. Pored toga, struktura mehanizma odnosno oblik, dimenzije i kretanja platforme omogućuju i ugradnju dve serijske ose, odnosno gradnju hibridnih paralelno-serijskih petoosnih mašina. U radu se daje struktura mehanizma i njegova primena, na primeru razvijenog industrijskog prototipa vertikalne glodalice LOLA pn101_4 V1.

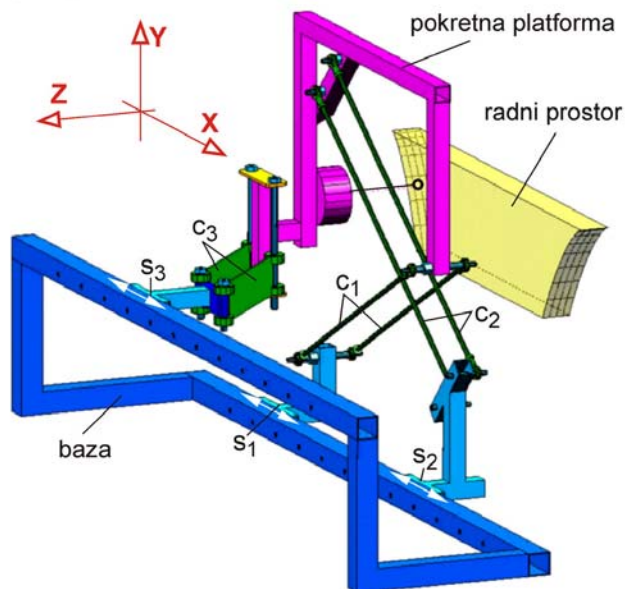
2. OPIS MEHANIZMA

CAD model inicijalne verzije mehanizma je prikazan na slici 1. To je kombinovani prikaz inicijalnog fizičkog modela i analitički dobijenog radnog prostora. Zbog specifične topologije mehanizma, fizički model je poslužio za inicijalnu proveru funkcionisanja odnosno stabilnosti mehanizma. Kao što se može videti sa slike 1, mehanizam se sastoji od pokretne platforme, tri zglobna paralelograma c_1 , c_2 i c_3 i nepokretne osnove na kojoj se nalaze dve paralelne vodice. 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 vodicom na bazi čine dva osnažena i upravljana translatorsna zgloba. Treći zglobni paralelogram c_3 je jednim svojim krajem, preko pasivnih translatorsno-obrtnih zglobova sa 2 stepena slobode, vezan za pokretnu platformu, dok je drugim svojim krajem obrtnim zglobovima vezan za klizač s_3 koji sa vodicom na bazi čini treći osnaženi i upravljani translatorsni zglob. Pokretanjem klizača s_1 , s_2 i s_3 se obezbeđuju 3 stepena slobode pokretne

¹⁾ dr Dragan Milutinović, red. prof. (dmilutinovic@mas.bg.ac.yu), dr Miloš Glavonjić, vanr. prof. (mglavonjic@mas.bg.ac.yu), mr Saša Živanović, asistent (szivanovic@mas.bg.ac.yu), Mašinski fakultet, Kraljice Marije 16, 11120 Beograd, Vladimir Kvirgić, dipl. maš. inž, LOLA Sistem A.D. Beograd

²⁾ Rađeno u okviru trogodišnjeg projekta MIS.3.02.0101.B Troosne paralelne mašine, u čijem su finansiranju učestvovali Ministarstvo nauke i zaštite životne sredine Srbije i LOLA Sistem iz Beograda i pripreme za realizaciju novog trogodišnjeg projekta 006309 Petoosne paralelne mašine.

platforme odnosno alata tako da platforma pri kretanju u prostoru ostaje paralelna samoj sebi, odnosno zadržava konstantnu orijentaciju u prostoru.



Slika 1. CAD model inicijalne verzije mehanizma

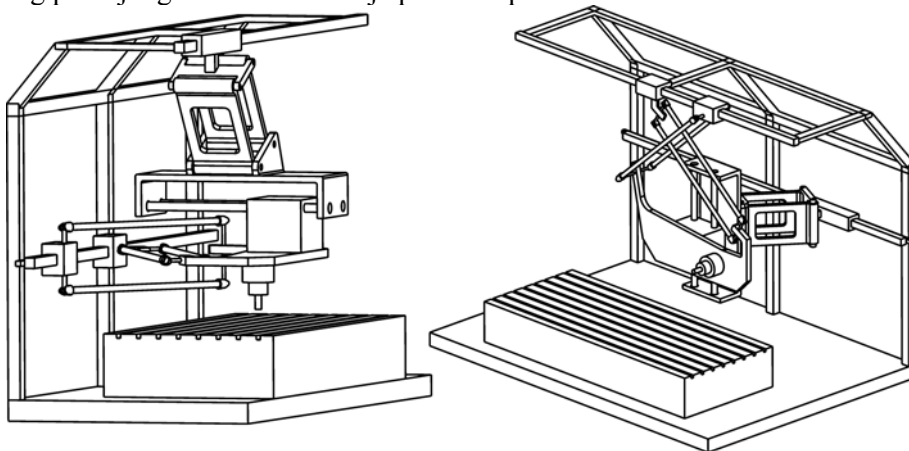
Specifičnost topologije mehanizma se ogleda u korišćenju pasivnih translatorno-obrtnih zglobova odnosno pasivnih translatorsnih stepeni slobode u Y pravcu za vezu zglobnog paralelograma c_3 sa platformom za njeno kretanje prvenstveno u Z pravcu. Na ovaj način se omogućava svojevrsno dekoplovanje međusobnog uticaja kretanja platforme u pravcima Z i Y. Time se omogućava izuzetna pravilnost radnog prostora tj. $Z_{min} = const$ i $Z_{max} = const$ na njegovim granicama za svako $Y_{min} \leq Y \leq Y_{max}$. Položaj zglobnog paralelograma c_3 , oblik njegovih segmenata i raspored zglobova mogu obezbediti veliku silu i krutost u Z pravcu, odnosno u pravcu ose alata kao i veliku krutost oko osa X i Z. Paralelnost vodica, pored toga što omogućava proizvoljnu dužinu radnog prostora u X pravcu omogućava i njegovu pravilnost u Y pravcu na njegovim granicama tj. $Y_{min} = const$ i

$Y_{max} = const$. Ukrštenost zglobnih paralelograma c_1 i c_2 , zakretanje platforme prvenstveno u pravcima X i Y, pored toga što obezbeđuje velike sile i krutosti celog mehanizma u X i Y pravcima omogućava manju dužinu vodice za istu dimenziju X radnog prostora i manju zakrivljenost na njegovim granicama X_{min} i X_{max} .

S obzirom da se klizači s_1 i s_2 ne mogu miomići, jer su na zajedničkoj vodici od moguća tri singulariteta dva su praktično neostvariva zbog konačnih dimenzija segmenata odnosno kolizija između njih (singulariteti direktne kinematike), dok se treći (singularitet inverzne kinematike) lako eliminiše mehaničkim odnosno upravljačkim ograničenjima jer se nalazi na samoj granici radnog prostora (Z_{min}). Struktura mehanizma obezbeđuje dobre prenosne odnose sila i brzina platforme sa pogonskim silama i brzinama.

Jednostavnost rešavanja inverznog kinematičkog problema, mogućnost analitičkog rešavanja direktnog kinematičkog problema i inverzne Jakobijan matrice omogućavaju efikasne upravljačke algoritme. Takođe značajna prednost mehanizma je i njegova tehnološkičnost u smislu izrade i korišćenja tipiziranih komponenta i sistema razvijenih za serijske i paralelne mašine.

Varijantnost strukture mehanizma omogućava široku oblast primene za vertikalne i horizontalne troosne paralelne glodalice odnosno obradne centre, kao i za hibridne paralelno-serijske petoosne mašine zbog povoljnog oblika i dimenzija pokretne platforme.



Slika 2. Koncepti vertikalne i horizontalne glodalice sa paralelnom kinematikom

Mehanizam takođe može biti pogodan i za lakše mašine kao što su mašine za obradu drveta i drugih nemetalnih materijala i industrijske robote. Varijanta mehanizma pogodna za razvoj vertikalnih i horizontalnih troosnih glodalica, odnosno obradnih centara šematski je prikazana na slici 2. Pored varijanti mehanizma sa slika 1 i 2 nije teško uočiti ni još nekoliko podvarijanti

mehanizma koje nisu od interesa za ovaj rad, a koje se mogu dobiti izostavljanjem po jedne poluge sa bilo koja dva zglobna paralelograma.

Iz jednačine (3) se lako može uočiti da je rešenje inverznog kinematičkog problema jednostavno i za najopštiji slučaj mehanizma, jednačina (4). Međutim, rešavanje direktnog kinematičkog problema za opšti slučaj mehanizma u eksplicitnoj formi nije moguće ali se izborom pogodnih parametara to može izvesti, kao što je pokazano u [9]. Prethodno pokazani način modeliranja mehanizma odnosno opšteg rešenja inverznog kinematičkog problema, jednačina (4), je pored efikasnosti i jednostavnosti interesantna i zbog činjenice da se nominalni model može usložavati do prilično tačnog modela uzimanjem u obzir vrednosti parametara koji su na slici 3 predstavljeni kao da su nule. Ova činjenica se pokazala kao vrlo korisna u razvoju upravljačkih algoritama i sprovođenju kalibracije.

3. JAKOBIJAN MATRICE I ANALIZA SINGULARITETA

S obzirom na značaj singulariteta mehanizama sa paralelnom kinematikom ovaj problem je detaljno analiziran za varijantu mehanizma sa slike 3, koji je korišćen za razvoj prototipa vertikalne glodalice.

$$J = \begin{bmatrix} 1 & \frac{y_p + d}{x_p + c_4 - p_1} & \frac{z_p + z_{p2}}{x_p + c_4 - p_1} \\ 1 & \frac{y_p + d}{x_p - p_2} & \frac{z_p + z_{p2}}{x_p - p_2} \\ 1 & 0 & \frac{z_p + z_{p3} - z_{03}}{x_p + x_{p3} - p_3} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$J = J_p^{-1} \cdot J_x \quad (6)$$

Diferenciranjem jednačina (4) po vremenu i zamenom parametara Jakobijan matrica je određena kao u jednačini (5). Kako su jednačine (3) implicitne funkcije unutrašnjih i spoljašnjih koordinata to se njihovim diferenciranjem po vremenu Jakobijan matrica može izvesti i preko jednačina (6), gde su J_p i J_x Jakobijan matrice inverzne i direktne kinematike [10]. Na ovaj način sva tri tipa singulariteta mogu biti analizirana, odnosno singulariteti inverzne, direktne kinematike i kombinovani singulariteti.

Pažljivom analizom Jakobijan matrica J , J_p i J_x odnosno njihovih determinanti mogu se uočiti singulariteti inverzne i direktne kinematike. Međutim kako su klizači s_1 i s_2 na zajedničkoj vodiči, kao što se vidi sa slike 1, to se oni ne mogu miomići pa su od značaja samo dva singulariteta direktne kinematike (slika 4a i 4b) i jedan singularitet inverzne kinematike (slika 4c). Sa slike 1, 2 i 3 lako je uočiti da singulariteti direktne kinematike slike 4a i 4b nisu ostvarivi zbog konačnih dimenzija segmenata odnosno njihovih kolizija. Singularitet inverzne kinematike (slika 4c) je moguć ali se mehaničkim ograničenjima i upravljačkim algoritmima lako izbegava.

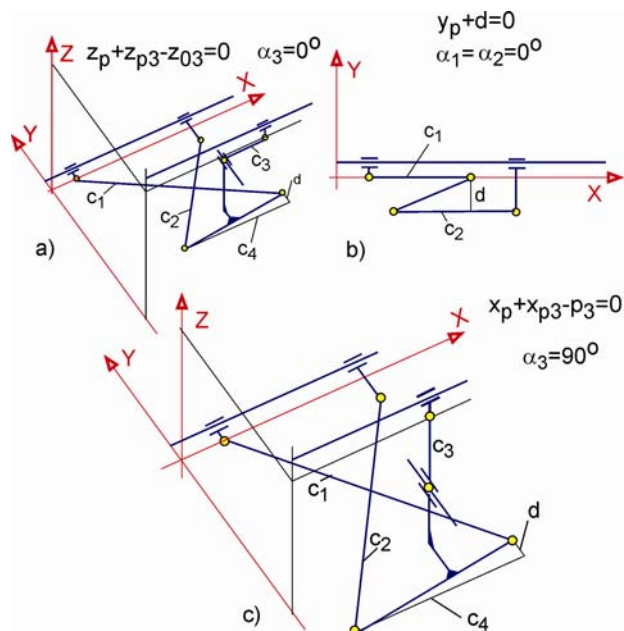
4. PROTOTIP VERTIKALNE GLODALICE SA PARALELNO KINEMATIKOM

4.1 Projektni parametri

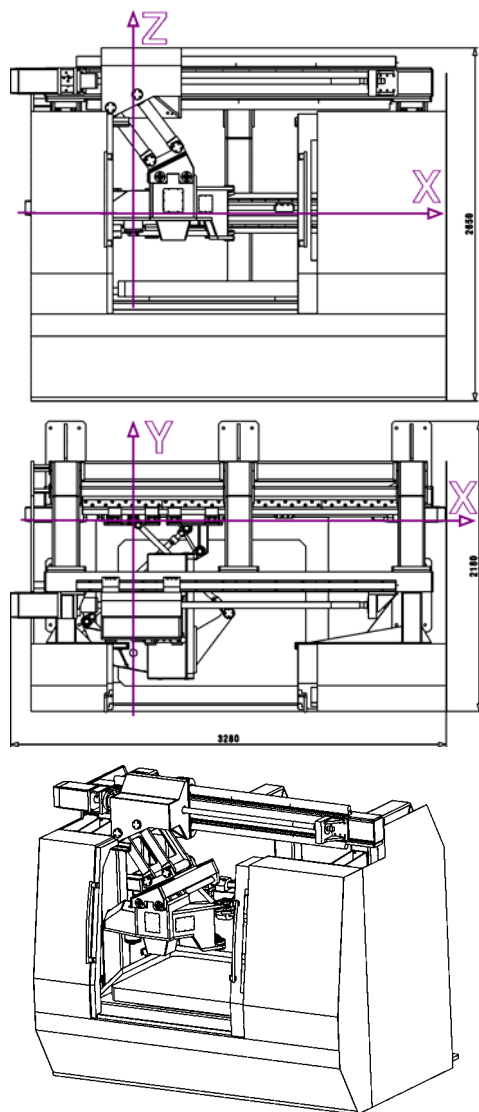
Kao što je poznato [1,8] pored izbora odgovarajuće kinematičke topologije, izbor geometrijskih parametara je veoma važan s obzirom na njihov značajan uticaj na performanse MPK.

Za dimenzije radnog prostora vertikalne glodalice od primarnog uticaja su, kao što se vidi sa slike 3, odnosno u jednačinama (3) do (5) dužine zglobnih paralelograma c_1 , c_2 , c_3 , položaji zglobova na pokretnoj platformi odnosno dimenzija c_4 platforme, kao i položaj vodiče za osu p_3 odnosno njena koordinata z_{03} . Pri koncipiranju prototipa vertikalne glodalice sa paralelnom kinematikom pošlo se od odnosa hodova glavnog vretena odnosno mera radnog prostora u pravcima X, Y i Z. Ovaj odnos je usvojen približno kao 5:2:1 što je čest slučaj za dugohodne vertikalne glodalice sa serijskom kinematikom. Za usvojenu dimenziju radnog prostora $Y = 500$ mm prvo su razmatrani uticaji dimenzija c_4 platforme i dužina paralelograma c_1 i c_2 jednih na druge vodeći pri tome računa da uglovi α_1 i α_2 budu dovoljno veliki kako bi mehanizam na granici radnog prostora bio dovoljno udaljen od singulariteta direktne kinematike slika 4a i singulariteta inverzne kinematike slika 4b. Ovako određeni parametri za analize i simulacije su neznatno korigovani pri detaljnom projektovanju prototipa vertikalne glodalice (slika 5).

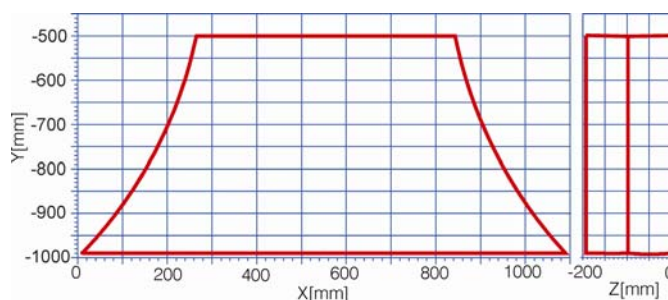
Za ovako usvojene projektne parametre određene su dimenzije radnog prostora slika 6, korišćenjem jednačina (3) uzimajući u obzir sva fizička ograničenja. Zatim je, takođe za usvojene projektne parametre za nekoliko karakterističnih horizontalnih ravni radnog prostora i veći broj tačaka na njima sračunavana vrednost $\det(J)$ slika 7. Sa slike 8 je lako uočiti da vrednosti $\det(J)$ kao i $\det(J^{-1})^T$ zavise samo od Y i Z koordinata. Ova činjenica je iskorišćena da se zatim prikažu vrednosti $\det(J)$ i $\det(J^{-1})^T$ samo u funkciji Y i Z koordinata slika 8. Iz prethodnih prikaza se mogu uočiti dobri prenosni odnosi sila i brzine platforme sa pogonskim silama i brzinama u celom radnom prostoru mašine.



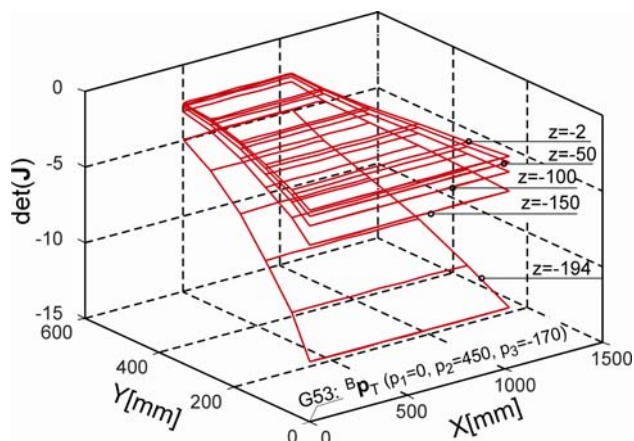
Slika 4. Tipovi singulariteta



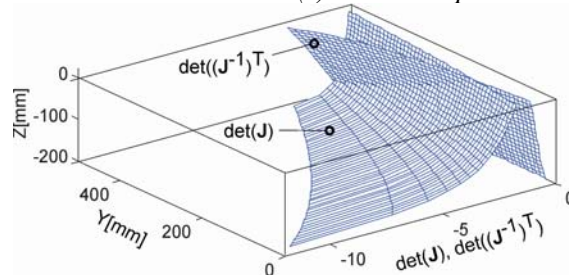
Slika 5. CAD model prototipa



Slika 6. Radni prostor razvijenog prototipa



Slika 7. Vrednosti $\det(J)$ u radnom prostoru



Slika 8. Vrednosti $\det(J)$ i $\det(J^{-1})^T$ u radnom prostoru

4.2 Prototip glodalice

Na osnovu usvojenog koncepta i projektnih parametara razvijen je prvi industrijski prototip vertikalne glodalice sa paralelnom kinematikom u LOLA Sistem AD Beograd, slika 9. Aktuatori čine servomotori, zavojna vretena i linearne vodice. Ovo je još uvek široko primenjen koncept zbog niza prednosti u pogledu cene, pouzdanosti i održavanja, ali je planirano i korišćenje linearnih motora u cilju poboljšanja brzine i ubrzanja. Upravljački sistem je baziran na adaptiranom upravljačkom sistemu robota. Programiranje je konvencionalno primenom razvijenog postprocesora za konverziju CL datoteke u G kod. Posle planiranog ispitivanja gemoetrijske tačnosti projektovan je i urađen nestandardni test radni predmet slika 10, za ispitivanje radne tačnosti u cilju određivanja strategije za dalja ispitivanja i kalibraciju prototipa.



Slika 9. Prototip glodalice



Slika 10. Prvi obrađeni test radni predmet

ZAKLJUČAK

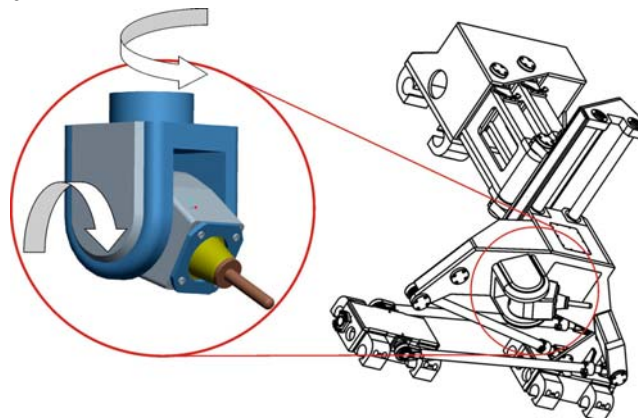
U cilju razvoja troosne glodalice sa dugačkom X osom koja zadovoljava uslove savremene proizvodnje razvijen je novi troosni mehanizam sa paralelnom kinematikom. U radu je opisana struktura mehanizma, modeliranje i simulacije na primeru razvijenog prototipa vertikalne glodalice. Predloženi mehanizam opisan u ovom radu predstavlja obećavajući alternativni koncept u poređenju sa nekim postojećim troosnim paralelnim mehanizmima. Razvijeni prototip vertikalne glodalice ukazuje da bi ovakva komercijalna mašina mogla biti superiorna u odnosu na slične postojeće mašine u pogledu cene, dinamike i tačnosti što opravdava dalja istraživanja u ovom pravcu. Kao što je pokazano u radu, varijantnost strukture mehanizma omogućava široku oblast primene za horizontalne troosne mašine kao i za hibridne paralelno-serijske, slika 11, što je takođe predmet daljih istraživanja.

Izjava zahvalnosti

Ovaj projekat je podržan od strane Ministarstva za nauku i zaštitu životne sredine, Vlade Republike Srbije i od strane LOLA Sistema A.D. Beograd.

LITERATURA

- [1] Weck, M., Staimer, D., 2002, Parallel Kinematic Machine Tools – Current State and Future Potentials, Annals of the CIRP, 51/2:671-681.
- [2] Pritschow, G., Wurst, K.H., 1997, Systematic Design of Hexapods and other Parallel Link Systems, Annals of the CIRP, 46/1:291-295.
- [3] Warnecke, H.J., Neugebauer, R., Wieland, F., 1998, Development of Hexapod Based Machine Tool, Annals of the CIRP, 47/1:337-340.
- [4] Hebsacker, M., Treib, T., Zirn, O., Honegger, M., 1999, Hexaglide 6 DOF and Triaglide 3 DOF Parallel Manipulators; Editors C.R. Boer, L. Molinari Tosatti, K.S. Smith; Springer Verlag, September 1999, London, UK, pp. 345-355.
- [5] Cai, G.Q., Hu, M., Guo, C., Li, B., Wang, Q.M., 1999, Development and Study of a New Kind of 3-DOF Tripod, Annals of the CIRP, 48/1:333-336.
- [6] Rehsteiner, F., Neugebauer, R., Spiewak, S., Wieland, F., 1999, Putting Parallel Kinematics Machines (PKM) to Productive Work, Annals of the CIRP, 48/1:345-350.
- [7] Arai, T., Tanikawa, T., Merlet, J-P., Sendai, T., 1996, Development of a New Parallel Manipulator with Fixed Linear Actuator, Proc. of Japan/USA Symposium on Flexible Automation, Vol.1, pp.145-149.
- [8] Merlet, J-P., 1999, The Importance of Optimal Design for Parallel Structures, Parallel Kinematic Machines; Editors C.R. Boer, L. Molinari Tosatti, K.S. Smith; Springer Verlag, September 1999, London, UK, pp. 345-355.
- [9] D.Milutinovic, M. Glavonjic, V. Kvrđic, S. Zivanovic, A New 3-DOF Spatial Parallel Mechanism for Milling Machines with Long X Travel, 2005., Annals of the CIRP, 54/1
- [10] Tsai, L.W., Robot Analysis, The mechanics of Serial and Parallel Manipulators, John Wiley & Sons, NY., 1999.



Slika 11. Model hibridne konfiguracije petoosne paralelne mašine (3 paralelne + 2 serijske ose)

D. Milutinović, M. Glavonjić, V. Kvrđić, S. Živanović

A New Spatial Parallel Mechanism for Milling Machines with Long X Travel

Summary

It is well known that the shape and volume of the workspace are one of the greatest weaknesses of parallel kinematic machine tools (PKM). Hexaglide and Triaglide mechanisms are examples where workspace extension is achieved by elongating one axis as a principal motion axis that is a common feature of all Cartesian machines. With the idea of principal axis of motion in mind, a new 3-DOF spatial parallel mechanism for horizontal and vertical milling machines has been developed. The paper describes the structure of the mechanism, modelling approach and simulation on a developed vertical milling machine prototype.

Keywords: Parallel mechanism, Modelling, milling machine tool