



M. Glavonjić, D. Milutinović, S. Živanović, Z. Dimić¹⁾

KONFIGURACIJA JEDNE HIBRIDNE PETOOSNE MAŠINE²⁾

Rezime

U radu su opisani kinematičko modeliranje hibridnog mehanizma sa 5 stepena slobode i sistem za upravljanje i programiranje mašine sa tim mehanizmom. Dati su rešenja inverzne i direktne kinematike, kao osnove za projektovanje, upravljanje i programiranje hibridne petoosne glodalice i neki rezultati simulacije rada te mašine po pripremljenom programu za petoosnu obradu.

Cljučne reči: hibridni mehanizam, petoosna glodalica, modeliranje, upravljanje.

1. UVOD

U cilju realizacije mašina alatki i robota sa prednostima i paralelne i serijske kinematike pojavila su se hibridna rešenja ovih mašina. Dodavanjem serijskog mehanizma na pokretnu platformu paralelnih mehanizama u osnovi se može postići:

- povećanje broja stepena slobode,
- povećanje opsega orijentacije alata.

U prvom slučaju je na paralelni mehanizam sa tri stepena slobode dodat dvoosni serijski mehanizam čime je dobijena petoosna mašina sa velikim opsezima osa orijentacije alata. U drugom slučaju se na paralelne mehanizme sa šest stepena slobode takođe dodaje dvoosni serijski mehanizam čime se postiže povećanje opsega osa orijentacije alata, ali uz probleme redundantnosti, složenosti i cene konstrukcije.

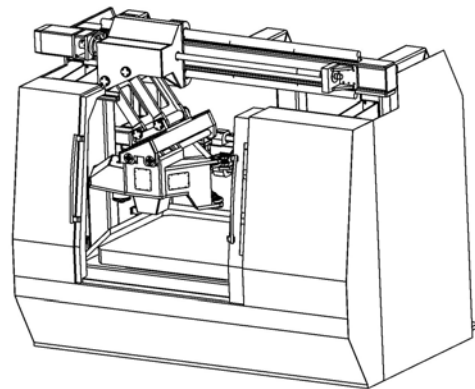
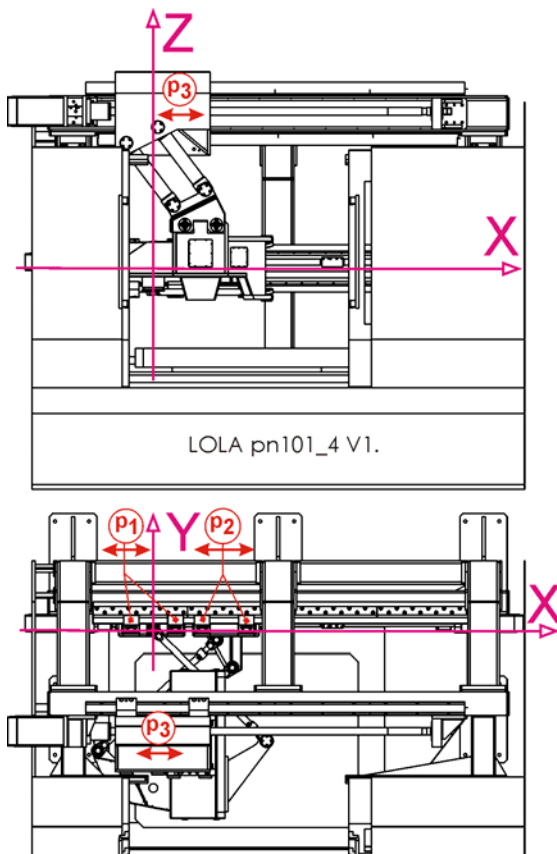
U ovom radu se pokazuje kinematičko modeliranje hibridnog, paralelno-serijskog mehanizma sa pet stepena slobode i koncept sistema za upravljanje i programiranje mašine tipa glodalice sa tim mehanizmom. Dati su rešenja direktnog i inverznog kinematičkog problema, kao osnove za projektovanje, upravljanje i programiranje te petoosne glodalice i prvi rezultati simulacije sistema za njeno upravljanje. Ova istraživanja predstavljaju nastavak istraživanja čiji su rezultati detaljno pokazani u [1,2,3].

2. HIBRIDNE PETOOSNE MAŠINE

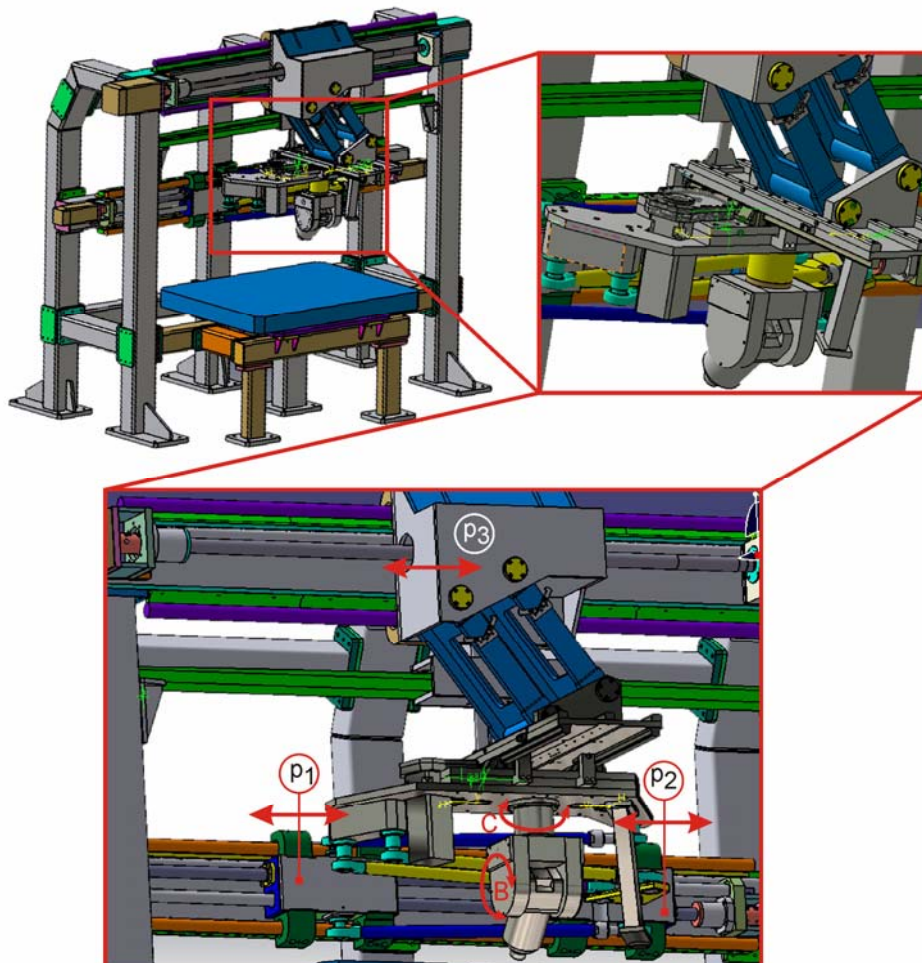
Razvojem prve domaće troosne mašine sa paralelnom kinematikom, slika 1, ostvaren je značajan napredak u gradnji ovih mašina s obzirom na specifičnost mehanizma koji omogućava dugačku X osu, što je karakteristika serijskih mašina. Ovaj koncept je rezultat rada na projektu MIS.3.02.0101.B, kojeg su, u periodu 2002-2004. godina, finansirali Ministarstvo nauke i zaštite životne sredine i LOLA Sistem, MAA. Ovaj koncept je verifikovan i na međunarodnom nivou [2]. S obzirom da pored niza prednosti razvijeni troosni paralelni mehanizam karakterišu i pogodan oblik i dimenzije pokretne platforme, to su pre dve godine započela i istraživanja na razvoju hibridne, paralelno-serijske petoosne mašine. Ova projekat takođe finansiraju Ministarstvo nauke i zaštite životne sredine i LOLA Sistem, MAA. Na slici 2. je pokazan koncept ove hibridne petoosne mašine. Orijeisanjem ka sistemu za upravljanje višeosnih glodalica koji je dostupan svakome (EMC 1 [4]) i personalnom računaru sa operativnim sistemom koji je takođe dostupan svakome (Linux [5]) postavljena je platforma za razvoj sistema za upravljanje ove petoosne glodalice sa hibridnom kinematikom. Prve probe i verifikacija platforme izvršene su na fizičkom modelu troosne glodalice sa paralelnim mehanizmom pn_101 [3]. On je u ovom projektu proširen dvoosnom serijskom glavom.

¹⁾ dr Miloš Glavonjić, vanr. prof (mglavonjic@mas.bg.ac.yu), dr Dragan Milutinović, red. prof (dmilutinovic@mas.bg.ac.yu), mr Saša Živanović, asistent (szivanovic@mas.bg.ac.yu), Mašinski fakultet, Kraljice Marije 16, 11120 Beograd, Zoran Dimić, dipl. ing, LOLA SISTEM PC MAA, (zdimic@yubc.net).

²⁾ Rađeno u okviru trogodišnjeg projekta TR6309B Petoosne paralelne mašine, u čijem su finansiranju učestvovali Ministarstvo nauke i zaštite životne sredine Srbije i LOLA Sistem, MAA iz Beograda.



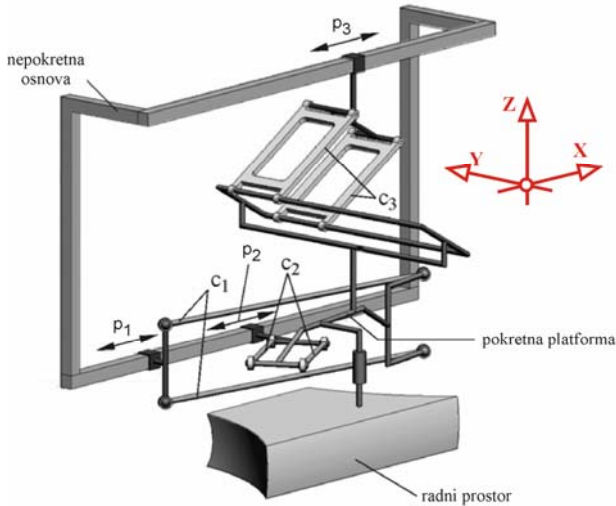
Slika 1. Prototip prve domaće troosne paralelne mašine sa mehanizmom pn_101



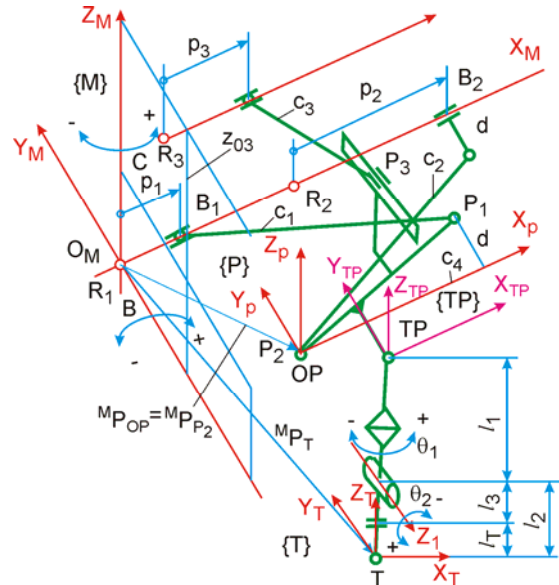
Slika 2. Model petoosne hibridne mašine na bazi mehanizma pn_101 i dvoosne serijske glave

3. MODELIRANJE MECHANIZMA

Na slici 3. je prikazan model varijante mehanizma korišćenog za razvoj prototipa troosne vertikalne glodalice sa slike 1. Opis mehanizma, karakteristike i modeliranje inverzne i direktne kinematike su detaljno dati u [1,2]. Kinematički model hibridnog, paralelno-serijskog mehanizma izveden je iz modela sa slike 3 i pokazan je na slici 4. Tehnološki koordinatni sistemi biće pokazani uz opis upravljanja mašine.



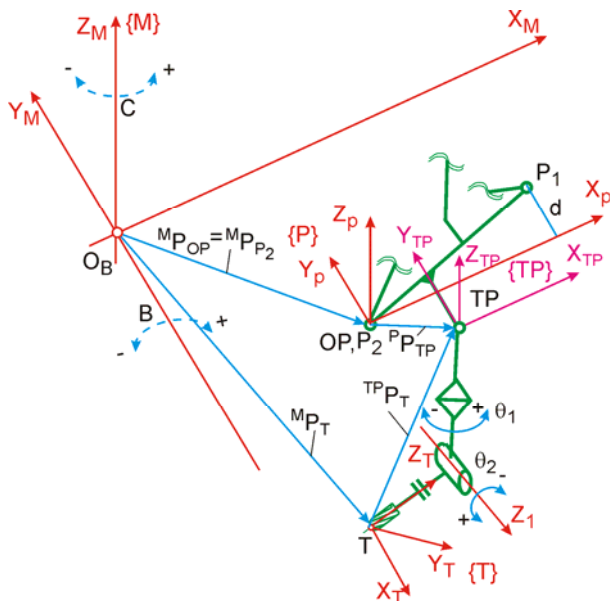
Slika 3. Model troosnog paralelnog mehanizma



Slika 4. Kinematički model hibridne mašine

Rešenje inverzne kinematike paralelnog mehanizma, jednačine (1), odnosno, izračunavanje pozicija klizača p_1 , p_2 i p_3 za zadatu poziciju pokretne platforme, odnosno, koordinatnog početka OP koordinatnog sistema $\{P\}$ vezanog za platformu (u računskom zglobu P_2) ${}^M p_{OP} = [x_{p2} \ y_{p2} \ z_{p2}]^T$ pokazano je u [1, 2]:

$$\begin{aligned} p_1 &= x_{p2} + c_4 - \sqrt{c_1^2 - (y_{p2} + d)^2 - z_{p2}^2} \\ p_2 &= x_{p2} + \sqrt{c_2^2 - (y_{p2} + d)^2 - z_{p2}^2} \\ p_3 &= x_{p2} + x_{p3} - \sqrt{c_3^2 - (z_{p2} + z_{p3} - z_{03})^2} \end{aligned} \quad (1)$$



Slika 5. Kinematički model dvoosnog serijskog dela hibridnog mehanizma

Rešenje direktne kinematike paralelnog mehanizma, jednačine (2), odnosno, izračunavanje pozicije pokretne platforme ${}^M p_{OP} = [x_{p2} \ y_{p2} \ z_{p2}]^T$ za zadate pozicije klizača p_1 , p_2 i p_3 je takođe detaljno pokazano u [1,2]:

$$\begin{aligned} x_{p2} &= \frac{p_2^2 + c_1^2 - c_2^2 - (p_1 - c_4)^2}{2(p_2 - p_1 + c_4)} \\ z_{p2} &= z_{03} - z_{p3} - \sqrt{c_3^2 - (p_3 - (x_{p2} + x_{p3}))^2} \\ y_{p2} &= -d - \sqrt{c_2^2 - (p_2 - x_{p2})^2 - z_{p2}^2} \end{aligned} \quad (2)$$

Detalji za kinematički model serijskog dela mehanizma pokazani su na slici 5. Oni se koriste za nalaženje rešenja inverzne i direktne kinematike kompletnog hibridnog mehanizma pokazanog na slici 4. Rešenje se traži u koordinatnom sistemu mašine (X_M , Y_M , Z_M). Posmatra se vrh T alata bez obzira kako mu je opisana uočena pozicija.

3.1 Rešenje direktnog kinematičkog problema petosnog hibridnog mehanizma

Za zadatu poziciju vrha alata ${}^M p_T = [x_T \ y_T \ z_T]^T$ i orijentaciju alata definisanu ortom ${}^M k_T = [k_{Tx} \ k_{Ty} \ k_{Tz}]^T$ sračunavaju se uglovi orijentacije alata B i C . S obzirom na strukturu serijskog mehanizma i kako rukovaoc posmatra mašinu sa alatom, alat se orijentiše tako što se prvo izvrši rotacija koordinatnog sistema $\{T\}$ oko ose Y_M za ugao B , a zatim oko ose Z_M za ugao C .

Matrica orijentacije koordinatnog sistema $\{T\}$ u odnosu na koordinatni sistem $\{M\}$ izvodi se na sledeći način:

$${}^M_T R = R_{z_M, C} \cdot R_{y_M, B} = \begin{bmatrix} cC cB & -sC & cCsB \\ sC cB & cC & sCsB \\ -sB & 0 & cB \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{Tx} & o_{Tx} & k_{Tx} \\ i_{Ty} & o_{Ty} & k_{Ty} \\ i_{Tz} & o_{Tz} & k_{Tz} \end{bmatrix} \quad (3)$$

gde su: $c\alpha \equiv \cos(\alpha)$ i $s\alpha \equiv \sin(\alpha)$.

Treća kolona u matrici ${}^M_T R$ predstavlja orijentaciju alata, odnosno, projekcije orta ose Z_T na ose koordinatnog sistema $\{M\}$, tj.

$$cCsB = k_{Tx}, \quad sCsB = k_{Ty}, \quad cB = k_{Tz} \quad (4)$$

odakle sledi da su

$$B = \pm A \tan 2\left(\sqrt{1 - k_{Tz}^2}, \quad k_{Ty}\right) \quad \text{i} \quad C = A \tan 2\left(k_{Ty}, \quad k_{Tx}\right), \quad (5)$$

uz uslov da je $sB \neq 0$, odnosno, da je $B \neq 0^\circ$ (za slučaj kada je $B=0^\circ$ vrednost ugla C se može birati po odgovarajućoj strategiji).

Modeliranjem serijskog dvoosnog mehanizma po Denavit-Hartenbergovoj konvenciji dobijaju se položaj i orijentacija alata, odnosno, koordinatnog sistema $\{T\}$ u odnosu na koordinatni sistem $\{TP\}$ kao

$${}^{TP}_T T = \begin{bmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1 & -c\theta_1 s\theta_2 & l_2 c\theta_1 s\theta_2 \\ c\theta_1 c\theta_2 & c\theta_1 & -s\theta_1 s\theta_2 & l_2 s\theta_1 s\theta_2 \\ s\theta_2 & 0 & c\theta_2 & -l_2 c\theta_2 - l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^{TP}_T R & {}^{TP} p_T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

gde su ${}^{TP} p_T$ vektor položaja vrha alata T i ${}^{TP}_T R$ orijentacija koordinatnog sistema $\{T\}$ u odnosu na koordinatni sistem $\{TP\}$.

Kako su koordinatni sistemi $\{TP\}$, $\{P\}$ i $\{M\}$ međusobno uvek paralelni, to se položaj i orijentacija alata, odnosno koordinatnog sistema $\{T\}$, u odnosu na koordinatni sistem mašine $\{M\}$, određuje kao

$${}^M_T T = \begin{bmatrix} {}^M_T R \equiv {}^{TP}_T R & {}^M p_T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

gde je vektor položaja vrha alata

$${}^M p_T = \begin{bmatrix} x_T \\ y_T \\ z_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{p2} + l_2 c\theta_1 s\theta_2 + x_{TP} \\ y_{p2} + l_2 s\theta_1 s\theta_2 + y_{TP} \\ z_{p2} - l_2 c\theta_2 - l_1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Ova jednačina predstavlja deo rešenja direktnog kinematičkog problema hibridnog mehanizma jer se zadavanjem pozicija klizača p_1 , p_2 i p_3 i uglova θ_1 i θ_2 sračunava pozicija vrha alata x_T , y_T i z_T (x_{p2} , y_{p2} i z_{p2} se sračunavaju pomoću jednačina (2)).

Izjednačavanjem matrica orijentacije iz jednačina (6) i (7), odnosno,

$${}^{TP=M}_T R(\theta_1, \theta_2) = {}^M_T R(B, C) \quad (9)$$

se za zadate vrednosti uglova θ_1 i θ_2 sračunavaju uglovi orijentacije alata:

$$B = -\theta_2 \text{ i } C = \theta_1 \quad (10)$$

čime je kompletirano rešenje direktnog kinematičkog problema petoosnog hibridnog mehanizma.

3.2 Rešenje inverznog kinematičkog problema petoosnog hibridnog mehanizma

Za zadatu poziciju vrha alata ${}^M p_T = [x_T \ y_T \ z_T]^T$ i orijentaciju alata definisanu ortom ${}^M k_T = [k_{Tx} \ k_{Ty} \ k_{Tz}]^T$, odnosno, uglovima orijentacije alata B i C , treba odrediti pozicije klizača p_1, p_2 i p_3 i uglove θ_1 i θ_2 . Kao što se vidi iz jednačina (10) određivanje uglova θ_1 i θ_2 je vrlo jednostavno.

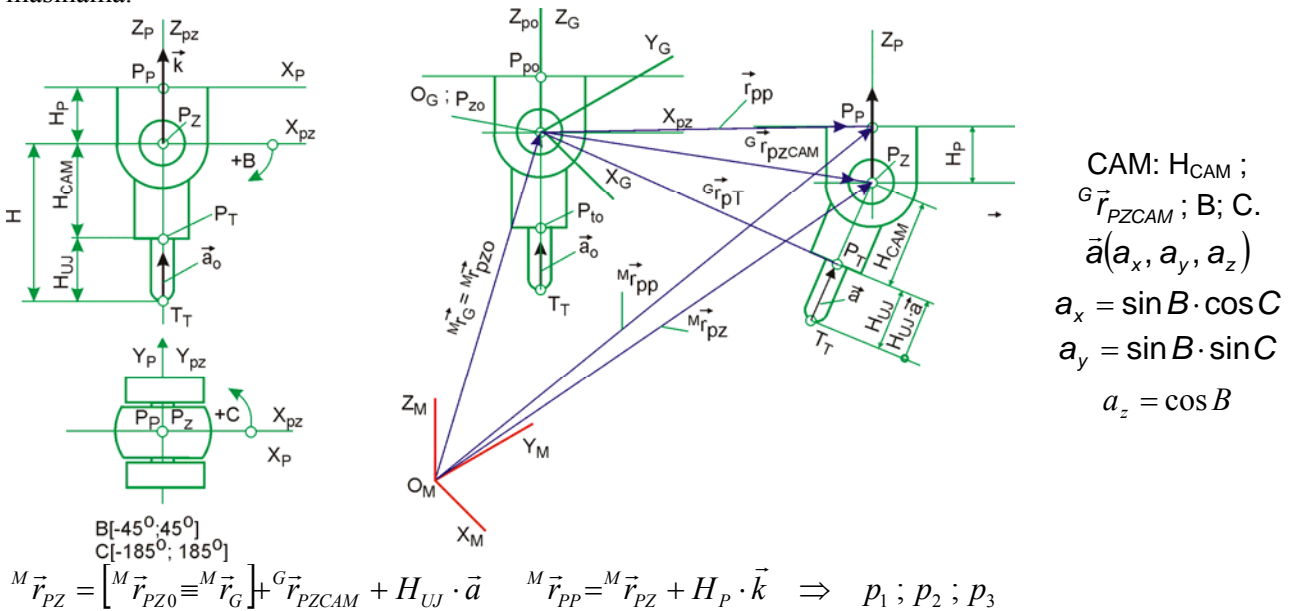
Iz jednačina (8) se, za zadatu poziciju alata $[x_T \ y_T \ z_T]^T$ i prethodno izračunate uglove θ_1 i θ_2 , odnosno, uglove B i C , izračunava pozicija platforme kao:

$$x_{p_2} = x_T - x_{TP} + l_2 c C s B, \quad y_{p_2} = y_T - y_{TP} + l_2 s C s B, \quad z_{p_2} = z_T + l_1 + l_2 c B \quad (11)$$

Za ovako sračunate koordinate pozicija platforme se iz jednačina (1) određuju pozicije klizača p_1, p_2 i p_3 , što zajedno sa uglovima θ_1 i θ_2 čini kompletno rešenje inverznog kinematičkog problema hibridnog petoosnog mehanizma.

4. KONCEPT SISTEMA ZA UPRAVLJANJE I PROGRAMIRANJE

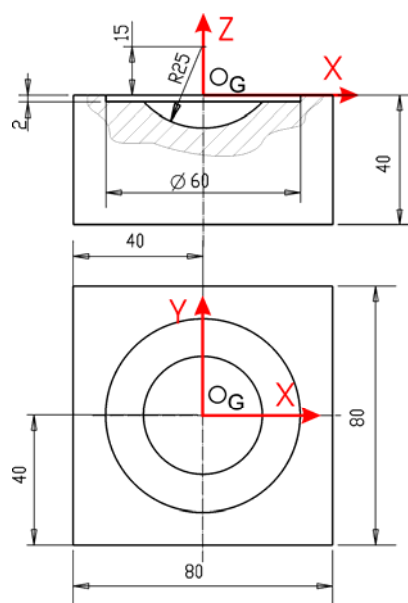
Ova mašina može da se programira samo u okruženju CAD/CAM sistema koji podržava petoosnu obradu. Trenutna verzija sistema za upravljanje podešena je tako da preuzima G-kod za putanju alata pripremljen za mašinu sa serijskom kinematikom strukture (X,Y,Z,B,C). Sistem ima interpreter G-koda, planer putanje i implementirana rešenja za inverznu i direktnu kinematiku ove hibridne mašine. Planirano je: uobičajeno transformisanje koordinatnih sistema sa obratka na mašinu i osnovna pozicija alata $\vec{a}_0 \equiv \vec{k}$, slika 6. Koordinatni sistem mašine je (X_M, Y_M, Z_M) , a obratka (X_G, Y_G, Z_G) . Vrha alata je T_T , a programirana tačka na putanji u sistemu CAM je P_T . Tekuća pozicija orta alata je $\vec{a} \equiv {}^M k_T = [k_{Tx} \ k_{Ty} \ k_{Tz}]^T$. Time rukovaoc ove hibridne mašine zadržava navike stečene u rukovanju uobičajenim serijskim petoosnim mašinama.



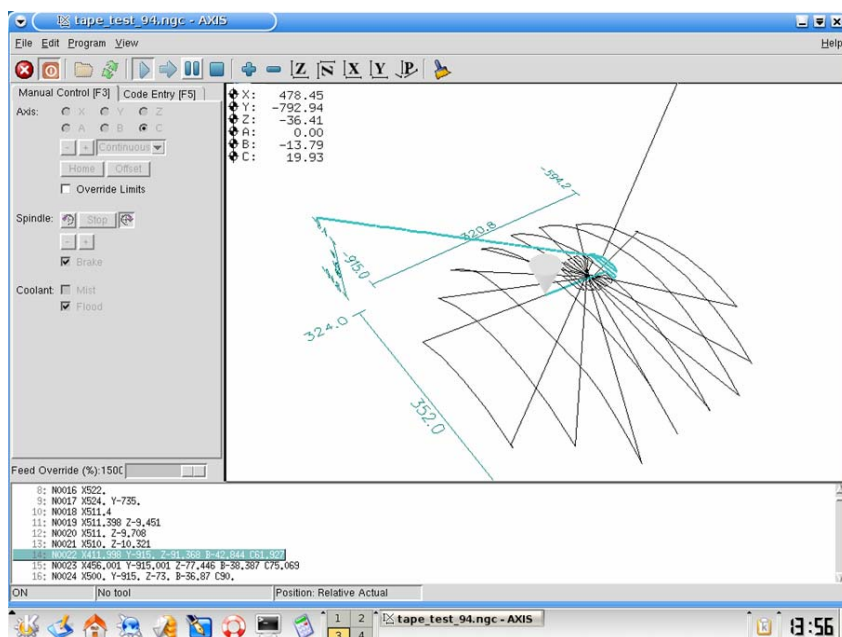
Slika 6. Tehnološki koordinatni sistemi hibridne mašine

Planirano je i korigovanje dužine alata u samom sistemu za upravljanje (H_{UJ} je naknadna korekcija dužine alata posle pokretanja programa koji već ima uračunatu dužinu alata H_{CAM}). Za proveru interpretera i interpolatora simulirana je obrada probnog dela, slika 7a). G-kod je pripremljen za putanju centra P_Z u koordinatnom sistemu mašine (translacija koordinatnih sistema i korigovanje dužine alata nisu aktivirani).

Simulirana putanja za taj program pokazana je na slici 7b). Na tom ekranu pokazan je i aktivni deo G-koda, ali i trenutne pozicije svih pet aktivnih pogonskih osa. U sistem je ugrađeno rešenje inverznog kinematičkog problema po koordinatama pogonskih osa p_1 , p_2 i p_3 i uglovima B i C dvoosne glave, umesto po uglovima θ_1 i θ_2 .



a) Probni deo



b) Primer ekrana softvera za upravljanje ParKinG 5-Axis

Slika 7. Simulacija sistema za upravljanje hibridnom mašinom

5. ZAKLJUČAK

U radu je pokazano kinematičko modeliranje hibridnog, paralelno-serijskog mehanizma sa pet stepena slobode. Data su rešenja direktnog i inverznog kinematičkog problema, kao osnove za projektovanje, upravljanje i programiranje jedne hibridne petoosne glodalice čiji je razvoj u toku.

Korišćenjem jednačina inverzne kinematike realizovan je i sistem za upravljanje i programiranje. Za programiranje se koristi CAD/CAM sistem koji podržava petoosnu obradu glodanjem i ima adekvatan postprocesor, a za upravljanje sistem EMC 1 [4,5] za upravljanje mašinama u okruženju LINUX.

6. LITERATURA

- [1] Milutinović, D., Glavonjić, M., Kvrđić, V., Živanović, S., Novi paralelni mehanizam za glodalice sa dugačkom X osom, 31. JUPITER konferencija, 27. simpozijum NU - Roboti - FTS, Zbornik radova, ISBN 86-7083-508-8, str. 3.6-3.11, Mašinski fakultet, Beograd, Zlatibor, april 2005.
- [2] 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, Vol. 54/1, pp. 345 – 348.
- [3] S. Živanović, Z. Dimić, Upravljanje modela troosne mašine sa paralelnom kinematikom pn 101 na bazi EMC sistemskog softvera, 33. JUPITER konferencija, 29. simpozijum NU-Roboti-FTS, rad u štampi, Mašinski fakultet, Beograd-Zlatibor, maj 2007.
- [4] EMC - Enhanced Machine controller web site - www.linuxcnc.org
- [5] NIST - National Institute of Standards and Technology web site - www.nist.gov

M. Glavonjić, D. Milutinović, S. Živanović, Z. Dimić

CONFIGURATION OF A HYBRID 5-AXIS MACHINE

Summary

This paper describes kinematic modelling of 5-DOF hybrid mechanism. Given solutions inverse and direct kinematics are basement for design, control and programming system of one hybrid 5-axis milling machine.

Key words: hybrid mechanism, 5-axis milling machine, modelling, control.