

S. Živanović, M. Glavonjić¹

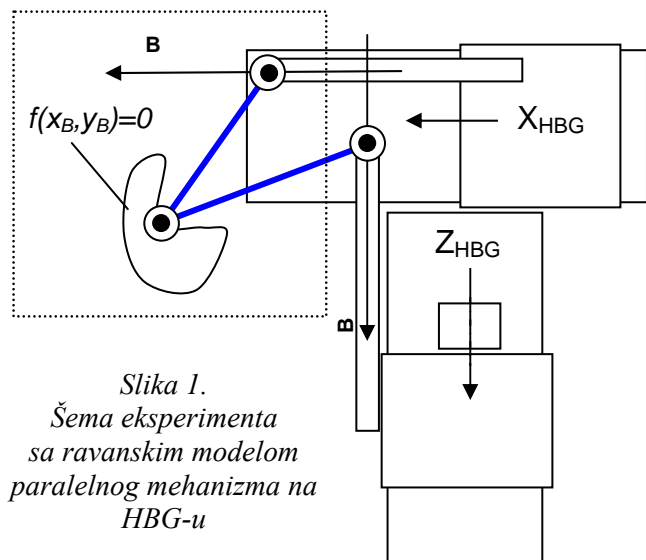
EDUKACIONA 2D PARALELNA MAŠINA ALATKA KAO TEHNOLOŠKI MODUL

Rezime

U radu se predstavljaju ostvareni rezultati gradnje edukacione 2D paralelne mašine alatke na bazi ideje da se iskoriste raspoloživi resursi tradicionalne tehnološke opreme na netradicionalan način, da bi se napravio sopstveni eksperimentalni i edukacioni sistem, bez upuštanja u razvoj i gradnju tipskih komponenata za komunikaciju, programiranje, pogon i upravljanje.

1. UVOD

Početna istraživanja na temu gradnje edukacione paralelne mašine alatke, kao tehnološkog modula na bazi serijske mašine (HBG80), ostvarena su na primeru ravanskog 2D modula sa paralelnim mehanizmom. Da li HBG80 ima u sebi neku paralelnu mašinu? Ima i to tri, sa osama (X,Y) , (Y,Z) i (X,Z) , ali da obe istovremeno pomeraju alat. U ovom radu su u razmatranje uzete ose X i Z kao prema slici 1.



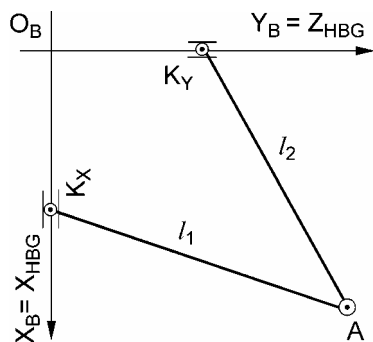
Slika 1.
Šema eksperimenta
sa ravanskim modelom
paralelnog mehanizma na
HBG-u

2. KINEMATIKA 2D PMA

Kinematički proračun nije problem i lako se određuje i inverzna i direktna kinematika, što omogućava potrebna izračunavanja za kretanje vrha mehanizma, pomeranjem klizača po X i Z osi, kao i za određivanje radnog prostora. Osnovne veličine 2D paralelne mašine alatke, za potrebe definisanja kinematike ove mašine:

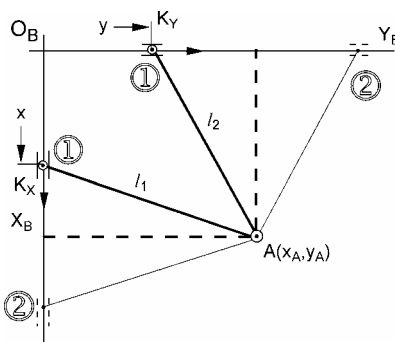
- $(X_{HBG}; Z_{HBG})$ - ose HBG80;
- $(X_B; Y_B)$ - ose 2D PMA;
- $(K_x; K_y)$ - klizači, odnosno zglobovi PMA, koji su translatorno pokretni po x, odnosno y osi;
- A (x_A, y_A) - pozicija alata, istovremeno i platforma, pošto nju sada predstavlja samo jedan zglob u koji se susstiču dva spojke;
- l_1 i l_2 - dužine spojki (nogu) mehanizma.

¹ Saša Živanović, dipl.maš.inž., asistent-pripravnik
dr Miloš Glavonjić, vanr. prof., Katedra za Proizvodno mašinstvo, Mašinski Fakultet, Beograd, 27.marta 80



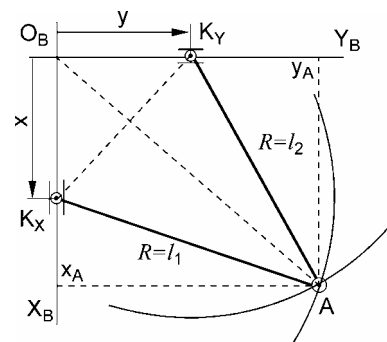
Slika 2.

Osnovne veličine 2D PMA



Slika 3.

Inverzna kinematika 2D PMA



Slika 4.

Direktna kinematika 2D PMA

Na primeru ravanskog mehanizma treba proveriti mogućnosti za programiranje kretanja vrha alata, na osnovu translatorskih pomeranja po osama mehanizma (X_B ; Y_B). Geometriju obratka treba preračunati putem inverznog kinematičkog problema u potrebna kretanja osa HBG-a, pri čemu treba voditi računa da je $X_B = X_{HBG}$ i $Y_B = Z_{HBG}$.

U nastavku će biti predstavljena rešenja direktnog i inverznog kinematičkog problema, za prikazani ravanski paralelni mehanizam.

Rešenje IKP se dobija kao presek kružnica sa centrom u zadatoj poziciji alata (x_A, y_A), radijusa l_1 i l_2 , sa pravama $y=0$ i $x=0$ respektivno. Rešavanje sistema jednačina baziran na prethodnoj postavci predstavljen je u nastavku:

$$\begin{aligned} (x - x_A)^2 + (y - y_A)^2 &= l_1^2, & y &= 0 \\ (x - x_A)^2 + (y - y_A)^2 &= l_2^2, & x &= 0 \end{aligned} \quad \text{odakle se dobija} \quad \begin{aligned} (x - x_A)^2 + y_A^2 &= l_1^2 \\ x^2 - 2x_A x + (x_A^2 + y_A^2 - l_1^2) &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x &= x_A \pm \sqrt{l_1^2 - y_A^2} \\ y &= y_A \pm \sqrt{l_2^2 - x_A^2} \end{aligned} \quad \rightarrow \quad \begin{aligned} x &= x_A - \sqrt{l_1^2 - y_A^2} \\ y &= y_A - \sqrt{l_2^2 - x_A^2} \end{aligned} \quad (1)$$

Jednačina (1) predstavlja rešenje IKP, na osnovu kojeg se može zaključiti postojanje po dva rešenja, što znači da mogu postojati dva položaja klizača na osama za dostizanje istovetne pozicije. Iz rešenja se vidi da se ne sme zadati x_A veće od dužine spojke y ose (l_2) i y_A veće od dužine spojke x ose (l_1). Zbog postojanja dva rešenja za istu poziciju usvojicemo rešenja bliža koordinatnom početku O_B .

Rešenje DKP je teme A trougla kome su zadati položaji K_x, K_y i koji ima poznate dužine spojki l_1 i l_2 . Rešenje DKP se može odrediti kao presek dvaju kružnica sa centrima u položajima klizača K_x i K_y , radijusa l_1 i l_2 respektivno (vidi sliku 4.)

$$\begin{aligned} (x_A - x)^2 + y_A^2 &= l_1^2 \\ x_A^2 + (y_A - y)^2 &= l_2^2 \end{aligned} \quad (2) \quad \begin{aligned} x_A^2 - 2x_A x + x^2 + y_A^2 &= l_1^2 \\ y_A^2 - 2y_A y + y^2 + x_A^2 &= l_2^2 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} x_A^2 - 2x_A x + y_A^2 &= l_1^2 - x^2 \\ y_A^2 - 2y_A y + x_A^2 &= l_2^2 - y^2 \end{aligned} \quad (4) \quad \text{uvode se smene} \quad \begin{aligned} s_1 &= l_1^2 - x^2 & s_3 &= -2x \\ s_2 &= l_2^2 - y^2 & s_4 &= -2y \end{aligned} \quad (5)$$

Radi lakšeg zapisivanja uvodiće se smene za izraze koji predstavljaju konstante od poznatih ulaznih veličina.

$$\begin{aligned} x_A^2 + s_3 x_A + y_A^2 &= s_1 \\ y_A^2 + s_4 y_A + x_A^2 &= s_2 \end{aligned} \quad (6) \rightarrow y_A^2 = s_1 - x_A^2 - s_3 x_A \rightarrow y_A = \pm \sqrt{s_1 - x_A^2 - s_3 x_A} \quad (7)$$

kada izraženo y_A u funkciji od x_A , ubacimo u donju jednačinu (6) dobija se

$$\begin{aligned} x_A^2 + s_1 - x_A^2 - s_3 x_A \pm s_4 \sqrt{s_1 - x_A^2 - s_3 x_A} &= s_2 \text{ i neka je } s_5 = s_2 - s_1, \text{ dobija se} \\ \pm s_4 \sqrt{s_1 - x_A^2 - s_3 x_A} &= s_5 + s_3 x_A \rightarrow s_4^2 (s_1 - x_A^2 - s_3 x_A) = (s_5 + s_3 x_A)^2 \end{aligned} \quad (8)$$

posle množenja i sređivanja jednačine (8) dobija se sledeći izraz:

$$(s_3^2 + s_4^2)x_A^2 + (s_3 s_4^2 + 2s_3 s_5)x_A + s_5^2 - s_1 s_4^2 = 0 \quad (9)$$

ako uvedemo potrebne smene $s_6 = s_3^2 + s_4^2$ $s_7 = s_3 s_4^2 + 2s_3 s_5$ $s_8 = s_5^2 - s_1 s_4^2$ (10)

dobija se osnovni oblik kvadratne jednačine, odakle se jednostavno određuju rešenja za x_A .

$$s_6 x_A^2 + s_7 x_A + s_8 = 0 \rightarrow x_{A1,2} = \frac{-s_7 \pm \sqrt{s_7^2 - 4s_6 s_8}}{2s_6} \quad (11) \text{ i konačno kao odabrano rešenje}$$

direktnog kinematičkog problema usvajamo:

$$x_{A1,2} = \frac{-s_7 + \sqrt{s_7^2 - 4s_6 s_8}}{2s_6} \quad (12)$$

$$y_A = +\sqrt{s_1 - x_A^2 - s_3 x_A}$$

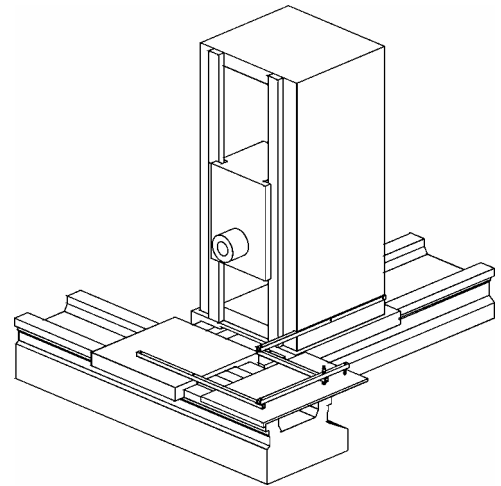
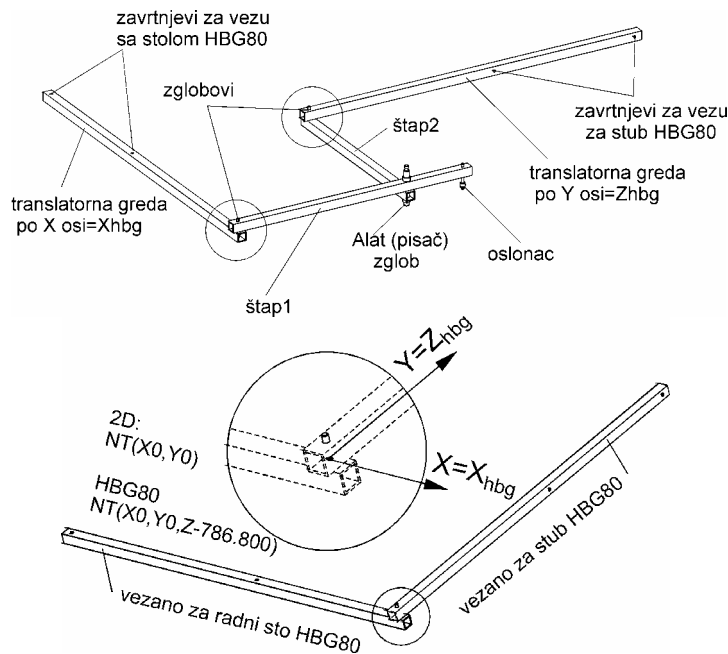
3. PROJEKTOVANJE 2D PMA HBG

U projektovanju najprostijeg 2D tehnološkog modula sa paralelnim mehanizmom, iskorišćeni su postojeći resursi materijala, cevastih priprema, kao i HBG 80 kao bazna serijska mašina čije će ose biti korišćene za pokretanje edukacionog 2D tehnološkog modula.

Paralelni mehanizam je u obliku pokretnih "makaza" sa dve translatorne ose i dva štapa (štap1 i štap2) konstantne dužine. U opštem slučaju ovi štapovi mogu biti i različitih dužina, što je u prethodnim kinematičkim proračunima i uzeto u obzir. Mehanizam je konstruisan za ispitivanja sa jednakim dužinama štapova, ali se može koristiti i za opštiji slučaj kada su štapovi različitih dužina.

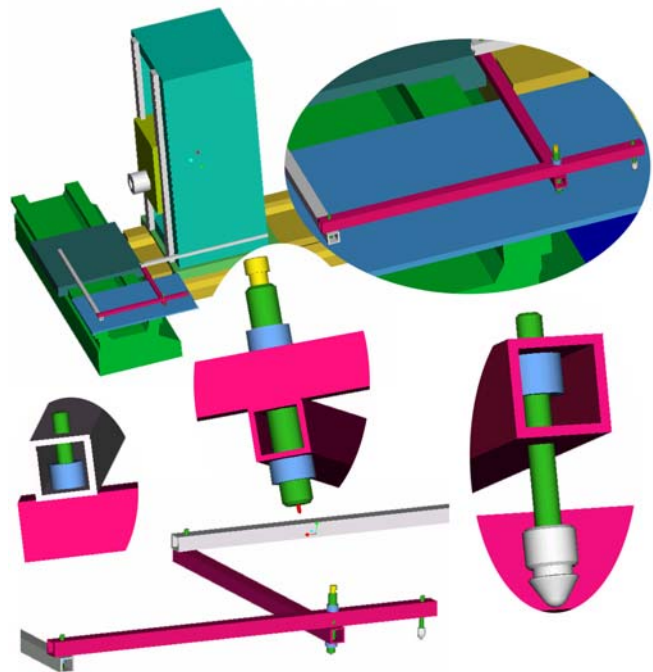
Po pripremi svih potrebnih komponenata od kojih se paralelni mehanizam sastojao pristupljeno je montaži. Prilikom montaže bilo je bitno određivanje nulte tačke 2D tehnološkog modula sa paralelnim mehanizmom u koordinatnom sistemu bazne mašine HBG80. Predviđeno je da se upravljanje 2D paralelnim mehanizmom ostvari na bazi postojećeg upravljačkog sistema HBG-a, primenom upravljačke jedinice BOSCH - CNC5, kao i mogućnosti komunikacije računara sa ovom upravljačkom jedinicom u oba smera. Nulta tačka mehanizma u baznom koordinatnom sistemu mašine je očitana na ekranu upravljačke jedinice, za položaj prikazan na slici 3.3.3, u kome je ostvareno povezivanje dvaju translatorskih greda od obe ose, koje pokreću paralelni mehanizam. Posle toga su montirane grede, razmaknute po X i Y osi, da bi se ostvarila montaža samog mehanizma kao na slici 3.3.2. Poznavanjem ove nulte tačke, moguće je kasnije i demontirati tehnološki modul i montirati ga opet, kada se za to ukaže potreba. Montaža svih

obrotnih zglobova je ostvarena čaurama, koje su za vertikalnu osovinicu čvrsto vezane svornim vijcima. Između dodirnih površina štapova na mestu zglobova, umetnute su plastične podloške.



Slika 5.
2D PMA kao tehnološki modul

2D tehnološki modul sa paralelnim mehanizmom, je ravanski mehanizam posmatran u ravni XY mehanizma, odnosno ravni X_{HBG} , Z_{HBG} bazne mašine. U posmatranoj ravni mehanizam ima zadovoljavajuću krutost, što nije slučaj za vertikalni pravac. Da ne dođe do savijanja štapova u vertikalnoj ravni postavljen je jedan oslonac na kraju štapa1. Ovaj oslonac na kraju ima plastičan umetak sfernog vrha, koji kliza po podlozi. Dužina oslonca se podešava prema podlozi. Ova podloga predstavlja radnu tablu (radni sto) 2D tehnološkog modula, na kojoj će biti postavljen etalon (milimetarski papir ili sl.) za praćenje vrha mehanizma. Položaj radne table se podešava po visini, radi regulisanja dodira sa etalom. Pokretna platforma je ovde geometrijski gledano tačkastog tipa, i ona objedinjuje zajednički obrtni zglob za oba štapa i nosač alata (pisača). Kao pisač koristi se flomaster sa keramičkom kuglicom, koji se umeće unutar samog zgloba. U otvor gde se smešta flomaster, postavlja se i opruga koja obezbeđuje pisaču potrebnu vertikalnu popustljivost. Ovaj 2D tehnološki modul može umesto pisača imati i malu obradnu jedinicu sa sopstvenim pogonom i alatom. Naravno dimenzije kao i težina takve obradne jedinice moraju biti male zbog prirode samog mehanizma. Za ispitivanja i edukaciju bi bili obrađivani penasti materijali. Problemi koji bi se javili kod ovakvog mehanizma su potreba za

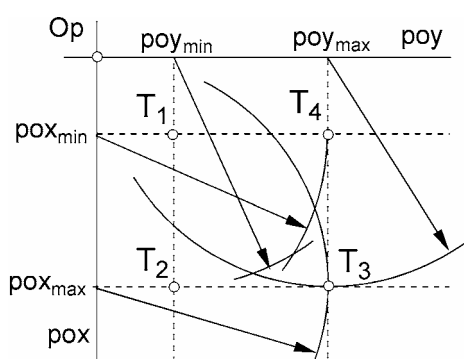


Slika 6. Prikaz sklopa i osnovnih delova
2D PMA kao tehnološkog modula na HBG 80
(Pro/Engineer)

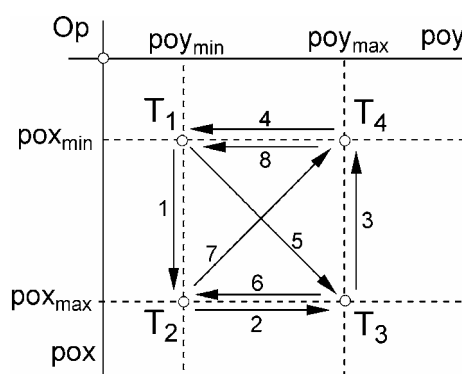
izuzetno malim dimenzijama i masom obradne jedinice, kao i potreba za vertikalnim pozicioniranjem. Vertikalno pozicioniranje u ovakvoj situaciji bi obavezno pripalo obratku, što bi se rešilo specifičnom konstrukcijom radnog stola.

4. RADNI PROSTOR 2D PMA

Radni prostor se za ravanski 2D paralelni mehanizam može odrediti geometrijski na bazi fizičkih ograničenja. Štapovi mehanizma su konstantnih dužina, pa vrh alata ne može dostići veću poziciju od one koju diktiraju dužine štapova. Tako se oblik radnog prostora može dobiti kao presek četiri kružna luka sa centrima u pozicijama pox_{min} , pox_{max} , poy_{min} , poy_{max} i radijusom koji odgovara dužini štapova (vidi sliku 4.1.1 a)



Slika 7. Geometrijsko određivanje radnog prostora



Slika 8. Strategija obilaska granica radnog prostora

Na osnovu rešenih kinematičkih problema može se odrediti oblik i veličina radnog prostora kinematički. Radni prostor treba da bude upisan u četvorougao $T_1T_2T_3T_4$ (slika 4.1.1b, 4.1.2). Kretanjem klizača između tačaka ovog četvorougla, po strategiji "svaki sa svakim", treba da se dobije kontura radnog prostora koju bi opisao vrh alata. Strategija obilaska konture granica radnog prostora je:

$$T_1 \rightarrow T_2 \rightarrow T_3 \rightarrow T_4 \rightarrow T_1 \rightarrow T_3 \rightarrow T_2 \rightarrow T_4 \rightarrow T_1,$$

dok su granične vrednosti za kretanje klizača $pox(100,600)$ i $poy(100,600)$. Pri obilaženju konture za dobijanje granica radnog prostora, kretanje između graničnih tačaka je ostvareno linearnom interpolacijom sa po 100 pozicija između dve tačke. Dobijeni radni prostor prikazan je na slici 4.1.2 i 4.1.3.

Računski dobijeni radni prostor omogućava tumačenje petlji na konturama radnog prostora, posebno pri izlasku iz pozicije T_1 ka T_2 i T_4 , kao i pri kretanju po dijagonalama T_1T_3 i T_2T_4 sa unutrašnjom interpolacijom. Mogu se izvesti sledeći zaključci:

- kretanje iz T_1 ka T_2 i T_4 , karakteriše postojanje petlje i preklapanja putanje alata,
- kretanje po dijagonali T_1T_3 sa unutrašnjom interpolacijom, predstavlja upravo tu dijagonalu, dok je kretanje po dijagonali T_2T_4 unutrašnjom interpolacijom putanja koja skoro odgovara kružnom luku.

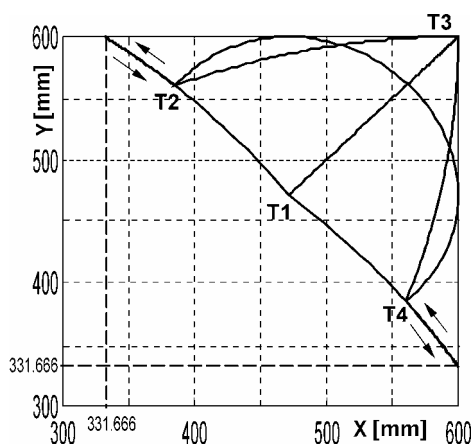
Pri kretanju od T_1 ka T_2 i T_4 ka T_1 , dešava se da jedna noga miruje na ekstremnom rastojanju, dok druga prevaljuje put u intervalu 100 - 600 mm, gde se ispoljavaju oba rešenja IKP, pa usled toga nastaju petlje na krajevima radnog prostora. Ova petlja predstavlja rezultat kretanja noge između dva simetrična položaja, koja daju ekvivalentno rešenje, a to je pozicija T_1 , donosno T_4 .

Kretanje po dijagonali T_1T_3 je sama ta dijagonala s obzirom da kretanje obe noge počinju iz (100,100) do (600,600) linearnom interpolacijom, pri čemu ne dolazi do ispoljavanja postojanje dvostrukog rešenja. Međutim dijagonala T_2T_4 ima drugačiji karakter jer od početne tačke $T_2(600,100)$ do $T_4(100,600)$ obe noge prelaze dovoljno rastojanje da ostvare dva simetrična položaja (oko pozicije 350 mm), i da u krajnjem rezultiraju putanji u obliku kružnog luka.

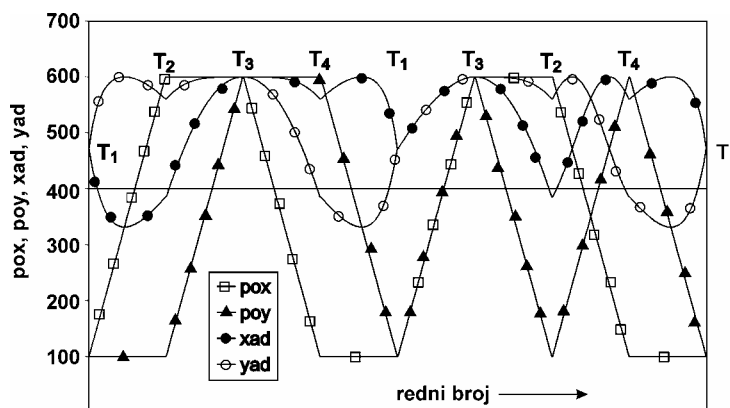
2D tehnološki modul sa PM, ima vrlo mali radni prostor, ali je jednostavan i pogodan za početna istraživanja kao i za edukaciju. Na primeru ovog 2D modula montiranog na HBG80 će biti realizovana planirana eksperimentalna istraživanja. Planirano je testirati ponašanje kretanja osa HBG-a da bi na izlazu ostvarili željeno kretanje. Pri tome će u obzir biti uzeti primeri sa linearnom i kružnom interpolacijom. Interesantno je razmotriti i oblike zavisnosti karakterističnih parametara u funkciji vremena, odnosno rednog broja tačke u interpolaciji.

Parametri koji su za analizu značajni su sledeći:

- pox - translatorno kretanje po x osi mehanizma (isto što i X_{HBG}),
- poy - translatorno kretanje po y osi mehanizma (isto što i Z_{HBG}),
- xad - pozicija po x osi mehanizma za kretanje alata,
- yad - pozicija po y osi mehanizma za kretanje alata,



Slika 9. Radni prostor 2D PMA



Slika 10. Zavisnost promene translatorskih osa HBG-a i virtualanih osa 2D paralelnog mehanizma

Razmatranim dijagramskim prikazima jasno se uočavaju delovi putanja vrha mehanizma gde se javljaju razmatrane petlje zbog postojanja dvostrukih rešenja IKP za istu poziciju. Na osnovu dijagrama sa slike 10. može se primetiti:

- uporedni prikaz zavisnosti promena osa HBG-a, i osa paralelnog mehanizma sa ucrtanim pozicijama karakterističnih tačaka $T_1 - T_4$ u redosledu kako se ostvaruje kretanje, što omogućava lako uočavanje mesta na kojima se dešavaju petlje,
- za uobičajenu linearnu interpolaciju osa HBG-a, paralelni mehanizam ima svoju unurašnju interpolaciju, po složenoj zakrivljenoj putanji,
- crtanjem zavisnosti $yad = f(xad)$, dobija se radni prostor 2D tehnološkog modula sa paralelnim mehanizmom (slika 9).

5. TEST KONTURA ZA 2DPMA HBG

Postoji potreba i dobra prilika da se konstruišu etaloni za testiranje i verifikaciju tehnoloških modula sa paralelnim mehanizmom. Treba da budu dopuna i/ili zamena za raspoložive, po pravilu tipizirane etalone za mašine alatke sa serijskim mehanizmom.

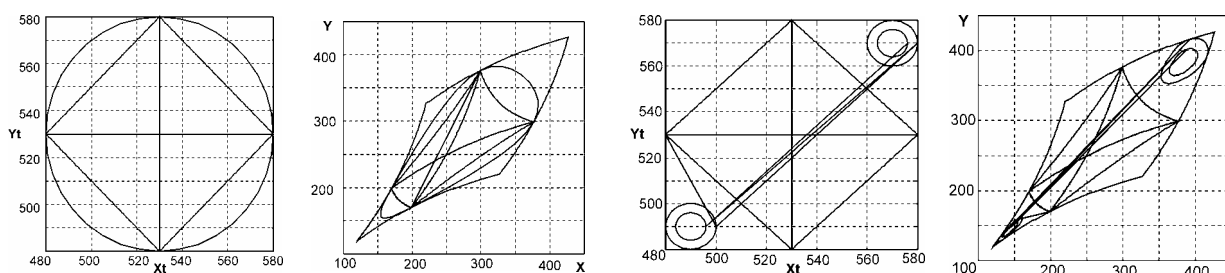
Ispitivanje mašina alatki je kvalitativno i kvantitativno utvrđivanje kvaliteta razmatrane mašine alatke. Kada treba kvantitativno oceniti, to se vrši preko pokazatelja kvaliteta mašina alatki koji moraju biti dogovorno utvrđeni. Ta vrsta dogovora može biti jednosmerna, preko standarda (JUS, ISO, GOST, DIN,...), kao zakonskih normativa, dok je druga vrsta dogovora manje obavezujuća i predstavlja preporuke (VDI, VDI-DGQ...) renomiranih proizvođača ili udruženja. Jednu od prvih preporuka u vidu normi kao pokazatelja kvaliteta mašina alatki, dao je prof. Šlezinger.

S obzirom da se radi o edukacionom tehnološkom modulu, obrada test radnog predmeta, se praktično svodi na iscrtavanje test konture i treba da obuhvati sledeće provere: provera pozicioniranja (pre početka obrade), provera ponovljivosti pozicije, provera radnih kretanja (provera izvršenja linearne interpolacije i provera izvršenja kružne interpolacije).

Analizom postojećih test komada kao i preporuka, dobijene su test konture za ispitivanje 2D paralelne mašine alatke. Za ove konture su primenom IKP dobijeni upravljački NC programi koji omogućavaju pomeranje odgovarajućih translatorskih osa bazne mašine, a time i štapova mehanizma, koji svojim vrhom ispisuje predviđene putanje. U toku ekperimentalnog rada na mašini je uspešno ostvareno iscrtavanje različitih kontura, na osnovu kojih se došlo do željenih saznanja.



Slika 11. Prikaz eksperimentalne opreme sa 2D tehnološkim modulom montiranim na baznoj mašini HBG 80, u toku izvođenja eksperimenta



Slika 12. Simulacija kretanja alata pri crtanju test konture i odgovarajuća interpolacija osa HBG-a
a) tačnost linearne i kružne interpolacije
b) tačnost linearne i kružne interpolacije + tačnost pozicioniranja

Da bi vrh mehanizma opisao željenu konturu, bazna mašina (HBG), vrši neku unutrašnju interpolaciju svojih osa, tako da bazna mašina ostvaruje veća pomeranja, da bi se alat na kraju pomerio za male veličine.

6. ZAKLJUČAK

Na osnovu uvida u postojeća dostignuća u pogledu realizacije mašina alatki sa paralelnim tehnološkim modulima, i sopstvenih istraživanja, u radu se prava znanja planiraju ostvariti metodom nedovršene koncepcije, koji bi se mogao iskazati kao pristup po kome je bolje samostalno koncipirati i u gradnji odmaći dovoljno daleko na svojoj koncepciji, umesto da se kupi tuđi nedovršeni proizvod. Radi toga je i planirano konstruisanje odgovarajućeg tehnološkog modula sa paralelnim mehanizmom. Ideja je da se iskoriste raspoloživi resursi tradicionalne tehnološke opreme na netradicionalan način, da bi se napravio sopstveni eksperimentalni i edukacioni sistem, bez upuštanja u razvoj i gradnju tipskih komponenata za komunikaciju, programiranje, pogon i upravljanje. Ovde su predstavljena početna istraživanja na primeru 2D tehnološkog modula sa paralelnim mehanizmom. Gradnja edukacionog tehnološkog modula ima sledeći značaj:

- provera mogućnosti iskorišćenja tradicionalne opreme na netradicionalni način, odnosno gradnje paralelne mašine na bazi serijske,
- provera ugradnje i funkcionisanja 2D mehanizma, na HBG uključujući, pogone, upravljačku jedinicu, NC programe, komunikacije PC - Bosch,
- provera mogućnosti za programiranje paralelnih mašina alatki.
- 2D PMA kao tehnološki modul je preteča i proba za buduću 3D PMA,
- edukacija kao i praktičan rad studenata u okviru laboratorijskih vežbi na predmetima katedre za Proizvodno mašinstvo.

7. LITERATURA

- [1] Stewart D., A Platform With Six Degree of Freedom, The Institution of Mechanical Engineers, Proceedings 1965-66, Part 1, No 15, str. 371-386
- [2] Živanović S., Tehnološki modul sa paralelnim mehanizmom, magistarski rad u pripremi, Mašinski fakultet Beograd, 1999
- [3] M. Glavonjić, D. Milutinović, B. Kokotović, S. Živanović, Model paralelne mašine alatke i robota, Elaborat NMA 01-96, Mašinski fakultet, Beograd, 1996
- [4] M. Glavonjić, D. Milutinović, S. Živanović, B. Kokotović, Edukaciona mašina alatka sa paralelnom kinematikom, Elaborat NMA 01-99, Mašinski fakultet, Beograd, 1999

S. Živanović, M. Glavonjić

EDUCATION 2D PARALLEL MACHINE TOOL AS MANUFACTURING MODULE

Summary

Achieved results in building of education 2D parallel machine tool, based on serial one, were discussed in this paper. Basic idea was to use available resources of traditional manufacturing equipment in non-traditional way in order to build own experimental and educational system. Details of development and building of typical components for communication, programming, drive and control were not considered.