

**28. SAVETOVANJE PROIZVODNOG MAŠINSTVA JUGOSLAVIJE  
SA MEDJUNARODNIM UČEŠĆEM  
28<sup>TH</sup> . CONFERENCE OF PRODUCTION ENGINEERING WITH  
INTERNATIONAL PARTICIPATION**



**ZBORNİK RADOVA  
PROCEEDINGS**

**KRALJEVO 28-29. SEPTEMBRA 2000.**

## OSNOVNA KONCEPCIJA JEDNOG PROTOTIPA TROOSNE MAŠINE SA PARALELNO KINEMATIKOM

N. Čović, S. Živanović, M. Glavonjić<sup>1</sup>

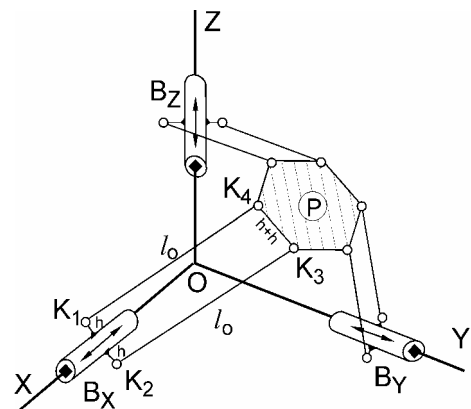
### Rezime

Konfigurisan je jedan prototip troosne (3D) mašine sa paralelnom kinematikom (MPK). Sprovedena je ideja da se iskoriste tradicionalni resursi sa numeričkim upravljanjem na netradicionalan način. Na raspolaganju je bio jedan horizontalni obradni centar (ILR HBG80), CAD/CAM sistem (Pro/Engineer) za projektovanje proizvoda i programiranje obrade delova i oprema za komunikaciju obradnog centra sa radnom stanicom (CP NiceLink). Tako je taj postojeći tradicionalni resurs iskorišćen za pogon i upravljanje MPK. Data je osnovna koncepcija troosne MPK sa uzajamno upravnom pogonskim osama. Opisano je rešavanje inverznog i direktnog kinematičkog problema. Pokazane su granice radnog prostora za jedan položaj završnog člana na platformi. Postavljena analiza ove koncepcije MPK omogućila je uprošćavanje rešenja inverznog kinematičkog problema (IKP) za potrebe programiranja, kalibracije koordinatnih sistema baze i platforme i modeliranja grešaka i kompenzacija ovakve mašine. Ceo postupak koncipiranja ovog prototipa vršen je po pravilima simultanog inženjerstva korišćenjem jednog specifičnog CAD/CAM/CAE sistema.

### 1. UVOD

Troosna mašina sa paralelnom kinematikom (3D MPK) zamišljena je da se realizuje kao tehnološki modul sa paralelnim mehanizmom, po uzoru na uopštenu koncepciju paralelnog mehanizma sa translatorno pokretnim zglobovima i spojkama istih konstantnih dužina. Ovakav modul se ugrađuje na postojeće ose raspoloživog (tradicionalnog) obradnog centra HBG80. Uopštena skica, sa osnovnim parametrima pomenutog paralelnog mehanizma, data je na slici 1. Detaljno je pokazana samo osa X. Ostale dve imaju iste ili slične uslove. Oznake imaju sledeća značenja:  $B_X$  je klizač na osi X, na kome su upareni sferni zglobovi  $K_1$  i  $K_2$ , simetrični u odnosu na osu X i udaljeni od nje za po  $h$ ;

$K_3$  i  $K_4$  su sferni zglobovi na pokretanoj ploči i na rastojanju  $h+h$ ;  $l_0$  je konstantna dužina spojki;  $P$  je (pokretana) platforma; pravac  $K_1K_2$  je stalno nagnut pod 45 stepeni prema ravni (X,Y); figura sa temenima  $K_1, K_2, K_3, K_4$  je (ravanski) paralelogram za sve vreme kretanja mehanizma. Kretanje klizača  $B_X, B_Y, B_Z$  ostvaruje se pomoću osnovne mašine HBG80. Za MPK to su pogonske ose. Kretanja platforme po koordinatnim pravcima ovde se zovu virtuelnim osama mašine. Ostvaruju se tek pomoću programiranja MPK. Istraživanjem je obuhvaćeno: izrada raznih fizičkih modela [1,2], konfigurisanje i realizacija ovog prototipa MPK [1] i detaljna analiza stanja koncepcija MPK u svetu [2]. Korišćeni CAD/CAM/CAE



Slika 1. Osnovni parametri razmatranog paralelnog mehanizma

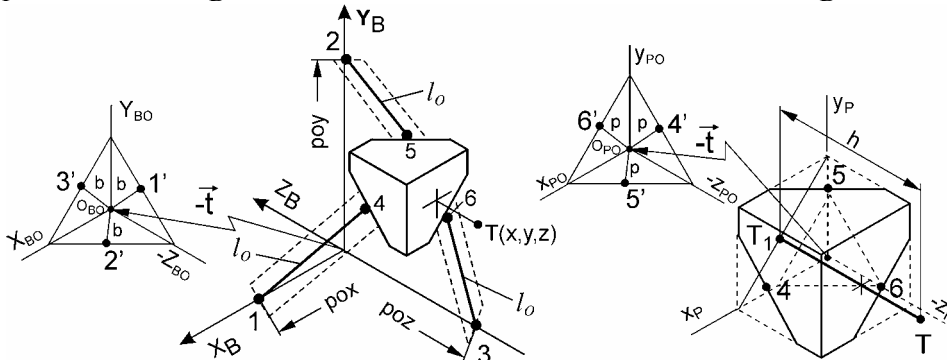
<sup>1</sup> dr Nebojša Čović, dipl. maš. inž., predsednik Upravnog odbora, AD FMP, Beograd, Lazarevački drum 6.

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

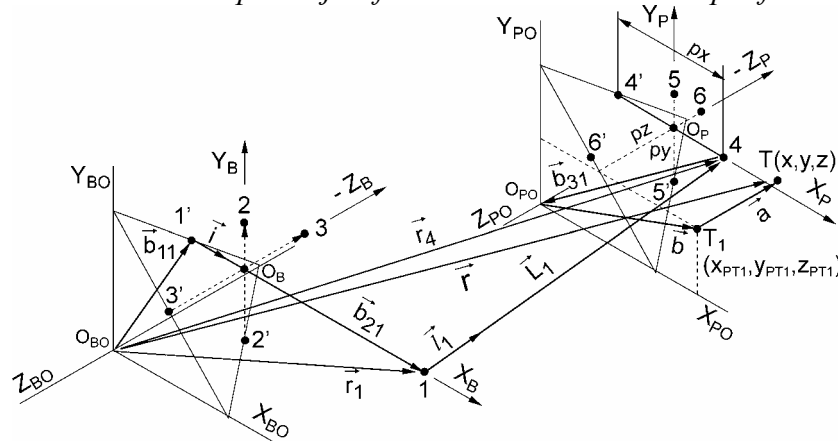
sistem omogućio je uporedo odvijanje koncipiranja, analize mehanizma, konstruisanja vitalnih komponenata, analize i izrade modela radnog prostora, izrade dokumentacije, projektovanja i programiranja tehnologije, itd.

## 2. KINEMATIKA 3D MPK

Za potrebe programiranja-upravljanja potrebno je rešiti inverzni kinematički problem (IKP). Rešenje direktnog kinematičkog problema (DKP) može da se koristi za određivanje granica radnog prostora, uglova spojki prema bazama zglobova i pozicija, brzina i ubrzanja platforme prilikom unutrašnje interpolacije na pogonskim osama. Rešenje DKP može da se dobije u algebarskom obliku jer je mašina troosna. Zbog toga i parovi susednih spojki stalno grade paralelograme. Tada se mogu uvesti računске srednje spojke 14, 25, 36, slika 2. Njihova dužina je takođe po  $l_0$ . Posle toga se i formalno postavlja koordinatni sistem baze ( $O_B$ ) tako da mu ose prolaze kroz računске srednje zglobove 1, 2, 3. On je dobijen translacijom baznog koordinatnog sistema (KS) za  $\vec{t}$ . Za toliko je transliran i KS na platformi. Detalji su pokazani na slici 3. Tako se dobija da je kretanje sistema  $O_{PO}$  u odnosu  $O_{BO}$  istovetno sa kretanjem sistema  $O_P$  u odnosu na  $O_B$ . Referentne tačke za računске ose tada su u  $O_B$ .



Slika 2. Osnovni položaji referentnih tačaka na bazi i platformi



Značenja karakterističnih veličina:

$O_{BO}(X_{BO}Y_{BO}Z_{BO})$  - bazni koordinatni sistem,

$O_{PO}(X_{PO}Y_{PO}Z_{PO})$  - koordinatni sistem na (pokretnoj) platformi,

$O_B(X_B Y_B Z_B)$  - bazni koordinatni sistem uprošćenog modela,

$O_P(X_P Y_P Z_P)$  - koordinatni sistem na (pokretnoj) platformi, uprošćenog modela,

1', 2', 3' - referentne tačke na bazi  $O_{BO}$ ,

4', 5', 6' - referentne tačke na platformi  $O_{PO}$ ,

1,2,3 - zglobovi na translatorno pokretnim

$x, y, z$  - koordinate vrha glavnog vretena u koordinatnom sistemu mašine,

$p_{ox}, p_{oy}, p_{oz}$  - translatorna pomeranja klizača,

$l_0$  - dužine spojki paralelnog mehanizma,

$h$  - rastojanje od vrha alata do ravni ( $X_{PO}, Y_{PO}$ ) (rastojanje između tačaka  $T$  i  $T_1$ ),

$b$  - intenzitet vektora položaja referentnih tačaka baze (1', 2', 3') u  $O_{BO}$ ,

$p$  - intenzitet vektora položaja referentnih tačaka platforme (4', 5', 6') u  $O_{PO}$ ,

$c = \cos 45^\circ, s = \sin 45^\circ$ ,

klizačima, odnosno, pogonskim osama,  
4,5,6 - zlobovi na platformi,  
T<sub>1</sub> - projekcija tačke T na ravan (X<sub>PO</sub>,Y<sub>PO</sub>),  
T - vrh alata,

$\vec{t} = O_{BO}O_B = O_{PO}O_P$  - vektori translacije  
koordinatnih sistema posle uvođenja računskih  
srednjih spojki.

*Slika 3. Vektorski model za inverzni i direktni kinematički problem*

Za sam prototip 3D MPK izvršeno je naknadno podešavanje pozicija referentnih tačaka da bi rešenje za IKP, pa i programiranje bili najjednostavniji [1,3]. Za rešavanje IKP potrebno je sprovesti sledeći postupak: (i) preuzeti koordinate vrha T alata iz prethodnog računa; (ii) izračunati koordinate zglobova 4, 5 i 6 na platformi; (iii) izračunati koordinate pozicija pogonskih osa (zglobova 1, 2 i 3 na bazi), odnosno  $pox$ ,  $poy$ ,  $poz$  i (iv) sprovesti ostalo izračunavanje (na primer: koordinata ortova  $\vec{l}_j$ ,  $j = 1,2,3$  srednjih osa). To se svodi na pozicioniranje zglobova 1, 2 i 3 tako da od pripadajućeg zgloba na platformi budu udaljeni tačno za  $l_0$ . To se može napisati kao u (1).

$$\begin{aligned} (x_4 - x_1)^2 + (y_4 - y_1)^2 + (z_4 - z_1)^2 &= l_0^2 \\ (x_5 - x_2)^2 + (y_5 - y_2)^2 + (z_5 - z_2)^2 &= l_0^2 \\ (x_6 - x_3)^2 + (y_6 - y_3)^2 + (z_6 - z_3)^2 &= l_0^2 \end{aligned} \quad (1)$$

Posle uvođenja već izračunatih koordinata u sistemu O<sub>BO</sub> dobija se:

$$\begin{aligned} (x - x_{PT1} + px - pox)^2 + (y - y_{PT1} + p \cdot s - b \cdot s)^2 + (z + h - z_{PT1} - p \cdot c + b \cdot c)^2 &= l_0^2 \\ (x - x_{PT1} + p \cdot c - b \cdot c)^2 + (y - y_{PT1} + py - poy)^2 + (z + h - z_{PT1} - p \cdot s + b \cdot s)^2 &= l_0^2 \\ (x - x_{PT1} + p \cdot c - b \cdot c)^2 + (y - y_{PT1} + p \cdot s - b \cdot s)^2 + (z + h - z_{PT1} - pz + poz)^2 &= l_0^2 \end{aligned} \quad (2)$$

Obično je  $p=b$  i  $z_{PT1}=0$ . Prelaskom u sistem O<sub>B</sub> uslovljava se da bude  $px=py=pz=0$ , dok je rešenje IKP u tom sistemu u obliku (3).

Podrazumeva se da su koordinate tačke T(x,y,z) i h sada dati u sistemu O<sub>B</sub>.

Rešavanje direktnog kinematičkog problema 3D MPK, svodi se na određivanje spoljašnjih koordinata,

$$\begin{aligned} pox &= x - x_{PT1} \mp \sqrt{l_0^2 - (y - y_{PT1})^2 - (z + h)^2} \\ poy &= y - y_{PT1} \mp \sqrt{l_0^2 - (x - x_{PT1})^2 - (z + h)^2} \\ poz &= -z - h \mp \sqrt{l_0^2 - (x - x_{PT1})^2 - (y - y_{PT1})^2} \end{aligned} \quad (3)$$

odnosno pozicije vrha alata T(x,y,z), za zadate vrednosti unutrašnjih koordinata, odnosno, pozicija pogonskih osa ( $pox$ ,  $poy$ ,  $poz$ ). Model za DKP takođe bazira na vektorskoj postavci sa slika 2. i 3. Rešenje DKP-a se izvodi na bazi sledećih jednačina, datih u sistemu O<sub>BO</sub>:

$$\begin{aligned} \vec{b}_{11} + \vec{b}_{21} + \vec{L}_1 + \vec{b}_{31} + \vec{b} + \vec{a} = \vec{r} \quad \vec{b}_{21} + \vec{L}_1 = \vec{r} - \vec{b}_{11} - \vec{b}_{31} - \vec{b} - \vec{a} \\ \vec{b}_{12} + \vec{b}_{22} + \vec{L}_2 + \vec{b}_{32} + \vec{b} + \vec{a} = \vec{r} \rightarrow \vec{b}_{22} + \vec{L}_2 = \vec{r} - \vec{b}_{12} - \vec{b}_{32} - \vec{b} - \vec{a} \\ \vec{b}_{13} + \vec{b}_{23} + \vec{L}_3 + \vec{b}_{33} + \vec{b} + \vec{a} = \vec{r} \quad \vec{b}_{23} + \vec{L}_3 = \vec{r} - \vec{b}_{13} - \vec{b}_{33} - \vec{b} - \vec{a} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{Zna se da je: } |\vec{l}_1| = |\vec{l}_2| = |\vec{l}_3| = 1 \quad l_{1x}^2 + l_{1y}^2 + l_{1z}^2 = 1 \quad l_{2x}^2 + l_{2y}^2 + l_{2z}^2 = 1 \quad l_{3x}^2 + l_{3y}^2 + l_{3z}^2 = 1 \quad (5)$$

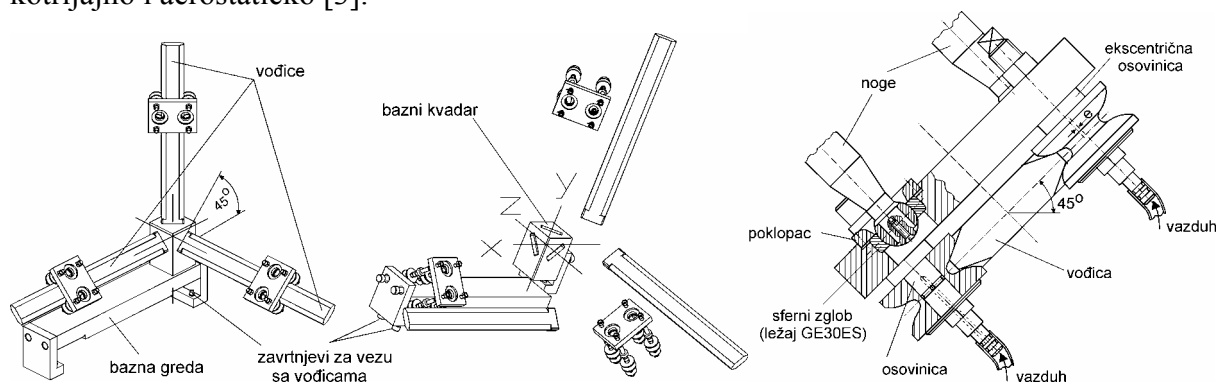
Svaka od vektorskih jednačina (4) svodi se na po tri skalarnе jednačine, {to daje ukupno devet jednačina. Iz uslova da su  $\vec{l}_1, \vec{l}_2, \vec{l}_3$  jedinični vektori dobijaju se još tri nove jednačine (5). Ovo čini ukupno 12 jednačina sa 12 nepoznatih veličina. Nepoznate veličine su: devet projekcija vektora  $\vec{l}_1, \vec{l}_2, \vec{l}_3$  i koordinate vrha alata T(x,y,z), kao osnovno rešenje DKP. Polazi se od prvih devet jednačina. One se najpre svode na šest jednačina, a zatim na tri: jednu kvadratnu i dve linearne. Dovoljno je odrediti koordinate samo jediničnog vektora jedne spojke. Pomoću

$$\begin{aligned} x_1 &= pox + l_0 \cdot l_{1x1} - px + x_{PT1} \\ x_2 &= pox + l_0 \cdot l_{1x2} - px + x_{PT1} \\ y_1 &= l_0 \cdot l_{1y1} + b \cdot s - p \cdot s + y_{PT1} \\ y_2 &= l_0 \cdot l_{1y2} + b \cdot s - p \cdot s + y_{PT1} \\ z_1 &= l_0 \cdot l_{1z1} - b \cdot c + p \cdot c + z_{PT1} - h \\ z_2 &= l_0 \cdot l_{1z2} - b \cdot c + p \cdot c + z_{PT1} - h \end{aligned} \quad (6)$$

njih se dobijaju koordinate vrha alata  $T(x,y,z)$ , kao par osnovnih rešenja DKP (6) u sistemu  $O_{B0}$ . Dalje se ovo rešenje prevodi u sistem  $O_B$  po postupku pokazanom za rešavanje IKP, a onda se i bira adekvatno rešenje među ova dva dobijena.

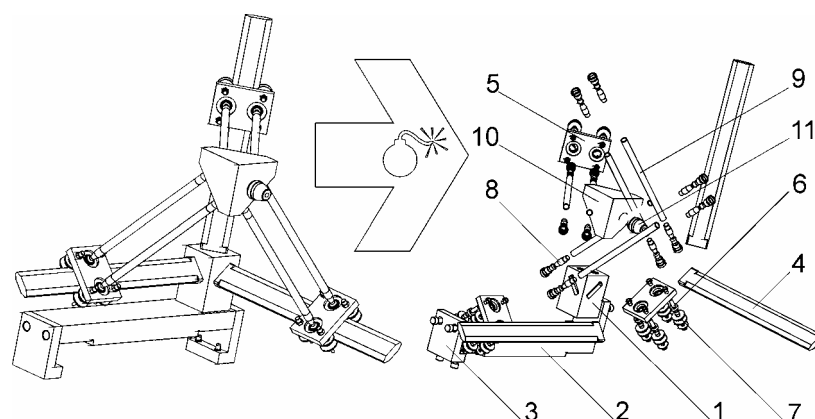
### 3.0 KONCEPCIJA 3D MPK

Prototip 3D MPK postavljen je na vođice ose X osnovne mašine HBG80. Veza se ostvaruje pomoću grede koja služi za baziranje na vođicama, a stezanje se vrši pomoću šapa sa zavrtnjevima. Vođice, po kojima se kreću klizači, paralelne su odgovarajućim osama HBG-a. Da bi pravac  $K_1K_2$  položaja zglobova bio stalno pod  $45^\circ$ , vođice pogonskih osa su zaokrenute za  $45^\circ$ . Po vođicama se kreću klizači u vidu pokretnih ploča, na kojima su napravljeni upusti za smeštaj sfernih ležaja. Svaki klizač na sebi nosi četiri točkica sa osovinicama (slika 4.), s obzirom na opredeljenje da vođice budu kotrljajne. Uležištenje točkova je kombinovano: kotrljajno i aerostatičko [3].



Slika 4. Bazni segment tehnološkog modula sa paralelnim mehanizmom sa elementima veze za HBG80 i poprečni presek podsklopa klizača sa kotrljajnim aerostatičkim elementima

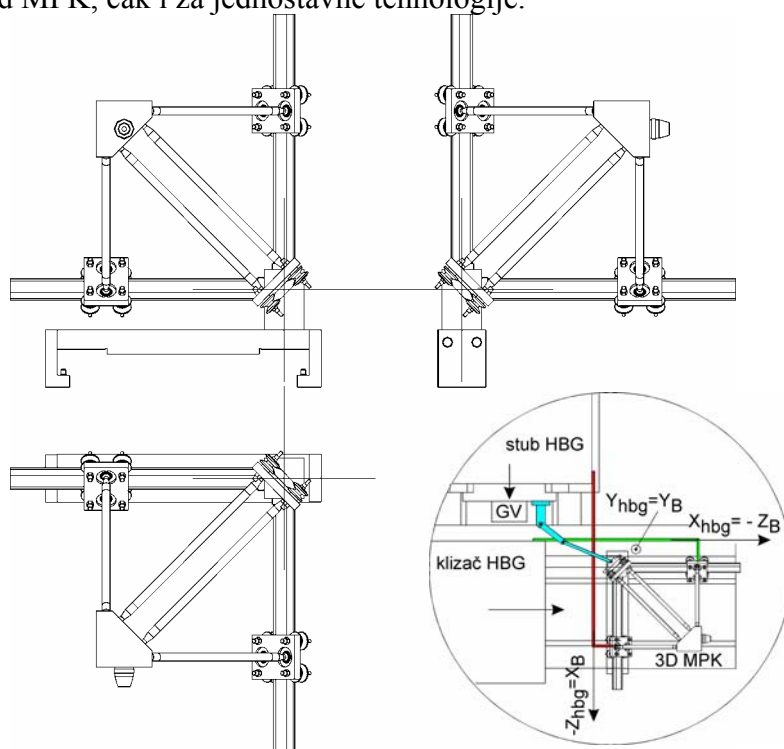
Na slici 4. dat je i prikaz poprečnog preseka klizača u sklopu sa vođicama, na kome je prikazan način dovoda vazduha, ekscentričnost druge osovinice, kao i način vezivanja ležaja, kao sfernog zgloba. Po dve osovinice sa jedne strane klizača imaju ekscentritet  $e$ , radi neophodnog poništavanja zazora i prednaprezanja. Točkici imaju karakterističnu geometriju u obliku kružnih lukova, koji tangiraju nagnute stranice vođica. Konstrukcija platforme je takva da predstavlja kocku kojoj su tri strane oborene pod  $45^\circ$ , što joj daje nagnute površine, koje su uparene sa odgovarajućim nagnutim površinama klizača. Na platformi se postavlja glavno vreteno (GV). Položaj GV je ovde takođe specifičan u odnosu na dosadašnje realizacije. Obično bi GV trebalo da bude na samom roglju kocke, kao platforme. S obzirom da su pogonske ose uzajamno upravne, zadržan je pravac ose X na HBG, odnosno Z na MPK, kao pravac ose GV. Položaj GV može biti i duž preostala dva pravca (X i Y). Na slici 5. dat je izometrijski prikaz sklopa projektovane 3D MPK, kao i prikaz eksplozivnog modela, na kome su rednim brojevima označeni osnovni delovi konstrukcije.



1-bazni kvadar, 2-bazna greda, 3- stezna šapa, 4-vođice, 5-klizač, 6-osovinica, 7-toččić,  
8-sferni zglobovi, 9-spojka, 10- platforma, 11-glavno vreteno

Slika 5. Izometrijski i eksplodirani prikaz 3D MPK

Za pogonske ose 3D MPK koriste se pogoni translatornih osa  $X_{hbg}$ ,  $Y_{hbg}$  i  $Z_{hbg}$  osnovne mašine HBG. Ose tehnološkog modula su obeležene sa  $X_B$ ,  $Y_B$  i  $Z_B$ . Dve ose  $X_B$  i  $Z_B$ , pogone dobijaju direktnom vezom sa odgovarajućim osama HBG-a. Treća osa,  $Y_B$ , dobija pogon od odgovarajuće ose  $Y_{hbg}$ , s tim da je ova veza realizovana preko serijskog mehanizma (sa dve rotacije), koji raspoređuje dve spregnute ose HBG (slika 6.). Ovakav način prenosa kretanja omogućava upotrebu raspoloživih osa HBG, kao pogona nove mašine, koja od stare nasleđuje i upravljačku jedinicu, kao i mogućnost komunikacije PC sa upravljačkom jedinicom Bosch (CP NiceLink). To je od posebnog značaja s obzirom na veličinu upravljačkih NC programa, koji se javljaju kod MPK, čak i za jednostavne tehnologije.



Slika 6. Dispozicija prototipa 3D MPK i sprega sa HBG

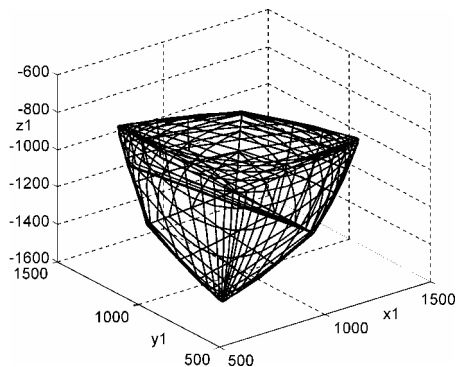
#### 4. RADNI PROSTOR 3D MPK

Radni prostor MPK je značajno manji, u odnosu na radni prostor tradicionalne mašine alatke sličnog gabarita. Prilikom projektovanja nove MPK potrebno je odrediti veličinu i oblik radnog prostora, jer on značajno može uticati na veličine ključnih parametara i samu koncepciju mašine. Njegove granice treba da budu poznate i prilikom pozicioniranja obratka

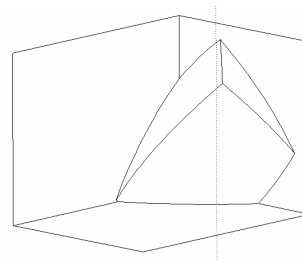
radi programiranja obrade na ovoj mašini. Postoje različiti pristupi određivanja radnog prostora. Ovde su primenjena dva načina procene granica radnog prostora: geometrijski, primenom nekog CAD paketa, uz uvažavanje postojećih ograničenja i drugi, primenom rešenja direktne kinematike, izračunavanjem ostvarivih položaja, za sve moguće pozicije na pogonskim osama. Da bi se dobio model radnog prostora u vidu plašta, pristupilo se formiranju algoritma i programa za proračun koji bazira na specifičnom kombinovanju kretanja svih pogonskih osa [1,2]. Kada se na ovo primeni rešenje DKP dobija se plašt ili omotač radnog prostora u vidu mreže, slika 7. Ovako dobijene koordinate iskorišćene su i za obradu omotača radnog prostora još u fazi projektovanja 3D MPK (slika 8.).

$$px=py=pz=100; lo=1200;$$

$$poj=200-600, j=x,y,z ; \text{gustina } 50 \text{ mm}$$



Slika 7. Plašt radnog prostora 3D MPK na bazi rešenja DKP-a



a) solid model Pro/ENGINEER



b) model dobijen obradom na HBG80

Slika 8. Modeli stvarnog oblika omotača Radnog prostora 3D MPK, približni i napravljeni

## 5. ZAKLJUČAK

Tradicionalne mašine alatke sa serijskim mehanizmom upravo pune dva veka svog postojanja i sada one služe i za gradnje prvih prototipova obećavajućih mašina sa paralelnim mehanizmom, koje veće zahteve postavljaju upravljačkom podsistemu, zato što nisu kadre da ostvare i najjednostavnija koordinatna kretanja u pozicioniranju, a da ne slažu kretanja, po pravilu, svih svojih raspoloživih osa. Za očekivati je da će se mašine sa paralelnom kinematikom održati kao aktuelne koncepcije i da će biti reafirmisane posle sadašnjeg prividnog zastoja u informacijama o istraživanju u tom domenu. U tom očekivanju ovde su prikazane osnovne ideje, od kojih se pošlo tokom istraživanja u ovoj oblasti, čime se tematski zasniva jedan novi pravac u analizi i sintezi mašina alatki za obradu rezanjem.

## 6.0 LITERATURA

1. Čović N., Razvoj konceptijskog projektovanja jedne klase fleksibilnih tehnoloških sistema, doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Beograd, 2000.
2. Živanović S., Tehnološki modul sa paralelnim mehanizmom, magistarska teza, Mašinski fakultet, Beograd, 2000.
3. Glavonjić, M., Čović, N., Naša prva troosna mašina sa paralelnom kinematikom, 26. JUPITER konferencija, 22. simpozijum NU - Roboti - FTS, Zbornik radova, str.3.201-3.208, Mašinski fakultet, Beograd, 2000.

---

---

## THE BASE CONCEPTION OF ONE THREE-AXES MACHINE PROTOTYPE WITH A PARALLEL KINEMATICS

### *Absratct*

*One three-axes (3D) machine prototype with a parallel kinematics (MPK) is established. The idea of using traditional resources with a machining center (ILR HBG80), a CAD/CAM system (Pro/Engineer) for designing of the products and programming of work pieces machining, as well as an outfit for the communication of the machining center with the work station (CP Nice Link) was on disposal. That was the way of using the traditional resource for driving and controlling of the MPK. The base conception for the three-axes MPK with mutual-normal driving axes is given. The solution for the inverse and direct kinematics problem is described. The working space borders are given for one position of an end effector at the platform. Stated analyze of the described conception of the MPK, enabled simplification of the solution for the inverse kinematics problem (IKP) for the needs of programming, calibration of coordinate systems of a base and a platform and for modeling of errors and compensations of the machine. The whole conception system for the prototype is made under the rules of concurrent engineering by using a specific CAD/CAM/CAE system.*