

ISPITIVANJE I VERIFIKACIJA GEOMETRIJE I UPRAVLJANJA MAŠINA ALATKI SA PARALELNO KINEMATIKOM

THE TESTING AND VERIFICATION OF GEOMETRY AND CONTROL OF PARALLEL KINEMATICS MACHINE TOOLS

Mr Saša Živanović, dipl. Inž.

Mašinski fakultet Beograd, 11120 Beograd, Kraljice Marije 16



REZIME

U radu je predstavljeno ispitivanje i verifikacija geometrije i upravljanja mašina alatki sa paralelnom kinematikom, tokom evolucije ove klase mašina kod nas. To je podrazumevalo i konstruisanje novih etalona, test radnih predmeta, kao dopune i/ili zamene za raspoložive, koji se koriste kod tradicionalnih mašina alatki sa serijskom kinematikom.

Ključne reči: ispitivanje, verifikacija, mašine sa paralelnom kinematikom (MPK)

ABSTRACT

This paper presents testing and verification of geometry and control of parallel kinematics machine tools during the evolution of this kind of machines in our country. This considered the construction of new etalons, test workpieces, as addition and/or change for available test workpiece, which are used for traditional serial kinematics machine tools.

Key words: testing, verification, Parallel Kinematics Machines (PKM)

1. UVOD

Ispitivanje mašina alatki je kvalitativno i kvantitativno utvrđivanje njenog kvaliteta. Kvantitativno ocenjivanje se vrši preko pokazatelja kvaliteta koji se dogovorno utvrđuju. Ta vrsta dogovora može biti jednosmerna, preko standarda (JUS, ISO, DIN, GOST, ...), kao zakonskih normativa, dok je druga vrsta dogovora manje obavezujuća i predstavlja preporuke renomiranih proizvođača ili udruženja (VDI, VDI-DGQ,...).

Na Mašinskom fakultetu u Beogradu, postoji duga tradicija istraživanja iz oblasti mašina sa paralelnom kinematikom. Postoji i potreba i dobra prilika za ispitivanje i verifikaciju geometrije i upravljanja ovih mašina alatki, u toku procesa njihovog konfigurisanja. Razlog za to su dosadašnji rezultati iz oblasti MPK kao i poslednji rezultati sa projekta Troosne paralelne mašine, koji je rađen u saradnji sa privredom (LOLA Sistem) i gde je osnovni rezultat industrijski prototip nove Mašine sa paralelnom kinematikom (MPK) [1]. U radu su opisani rezultati s početka istraživanja ovih mašina na primerima dvoosnog i troosnog tehnološkog modula sa paralelnim mehanizmom. Istraživanja na novom industrijskom prototipu su u toku. Pri realizaciji novih industrijskih prototipova slede detaljna ispitivanja i verifikacija geometrije i upravljanja. To podrazumeva razvoj metodologije i konstruisanje etalona za testiranje i verifikaciju novih mašina alatki, kao dopuna i/ili za-

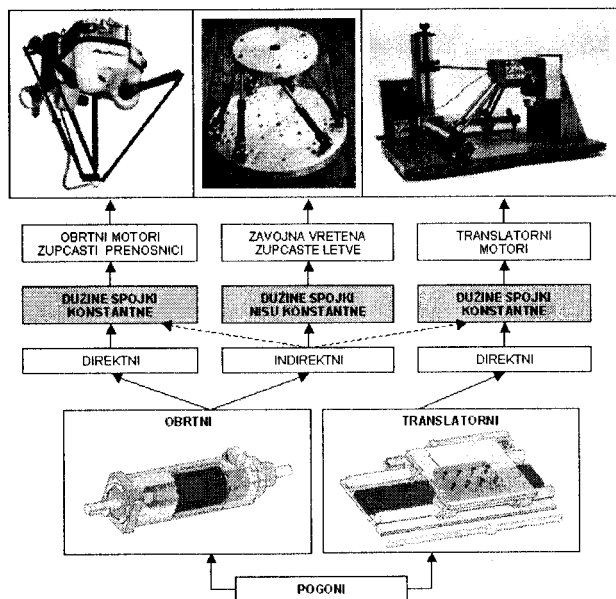
mena za raspoložive, po pravilu tipizirane etalone za mašine alatke sa serijskom kinematikom.

2. MAŠINE SA PARALELNO KINEMATIKOM

Mašina alatka se obično posmatra kao sistem koji čine: noseća struktura, pogoni sa prenosnicima i programiranje sa upravljanjem. Njen mašinski deo obično je neki specifični mehanizam. Ako je upotrebljen mehanizam u kojem je sprega pokretnog elementa sa bazom, u celoj noćeojoj strukturi mašine alatke, ostvarena najkraćim uporednim vezama, onda je takav mehanizam paralelni, a mašina sa paralelnom kinematikom. Obično su te veze sa jednim stepenom slobode kretanja. Pokretni član tog mehanizma obično se zove platforma, a nepokretni baza [1].

Postojeća rešenja mogu da se razvrstaju u tri karakteristične grupe, kako je pokazano na slici 1. Ako su pogoni obrtni, onda se prenosnik može dalje sastaviti od zupčastih prenosnika, ili samo od krivajja, a da spojke između platforme i baze imaju konstantnu dužinu. Drugu grupu čine mašine sa mehanizmom sa promenljivim dužinama spojki. To je grupa takozvanih Stjuartovih platformi, nazvana tako po autoru koji je pokrenuo seriju radova na temu mašina sa paralelnom kinematikom. Ove je ona ilustrovana jednim našim fizičkim modelom. Treća grupa su mašine sa spojkama konstantne dužine, ali sa translatorskim pogonskim osama, za razliku od mašina iz prve grupe. Ove je takva kocepcija, na slici 1,

pokazana na primeru fizičkog modela i učila modela troosne glodalice sa paralelnom kinematikom. Na slici 1 naznačeno je kakvi bi pogoni i prenosnici bili najpogodniji za svaku grupu posebno. Po tome se može videti koja bi grupa bila sada favorizovana ako se zna da se sada, za mašine alatke sve više koriste translatorni motori. U tom slučaju nema zavojnih vretena kao prenosnika, ali ni zupčastih letvi. Inače, translatorne pogonske ose su tipične za mašine sa serijskom kinematikom. Tako se treća grupa može najlakše osnovati u okruženju postojećih serijskih mašina [1].

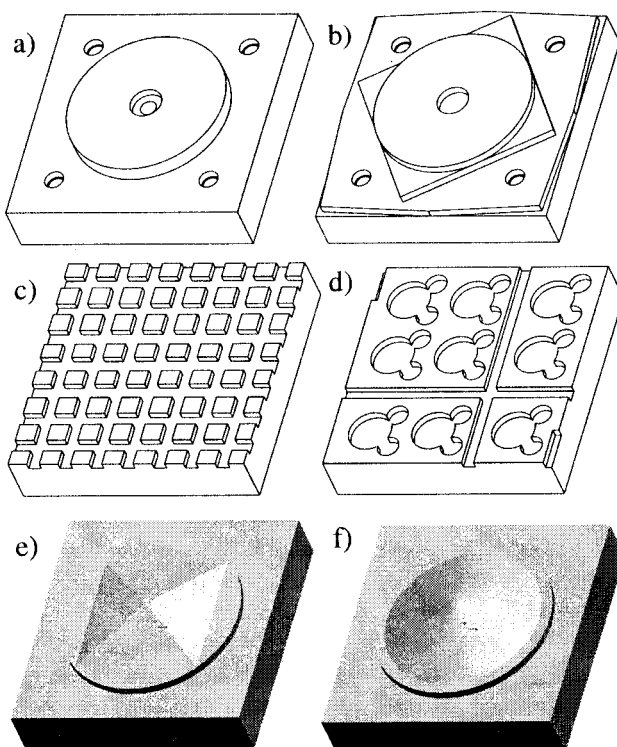


Slika 1. Klasifikacija mašina sa paralelnom kinematikom

3. ISPITIVANJE GEOMETRIJE I UPRAVLJANJA MAŠINA ALATKI

Mogući su razni postupci testiranja mašina alatki. Oni mogu biti neposredni (direktni) i posredni (indirektni). Neposredni postupci testiranja se vrše direktno na mašini bez obavljanja osnovne namene mašine (obrade rezanjem) i predstavlja grupu testova ispitivanja geometrijske tačnosti mašina, čime se procenjuju početni pokazatelji kvaliteta. Ovde je reč o testovima pozicioniranja u radnom prostoru mašine, testovi provere geometrije mašine pomoću etalona i slično. U ovu grupu spada i grupa testova u kojima se menjaju brzine i smerovi pomoćnih kretanja, što uključuje dinamiku pogona. To je slučaj kod testa kružne interpolacije i on zahteva upotrebu odgovarajućeg pribora i metoda analize dobijenih eksperimentalnih rezultata. Merenja se vrše pri različitim režimima, jednom sa malim, a drugi put sa velikim brzinama pomoćnog kretanja. Posredna ispitivanja su testiranja kojima dolazimo do pokazatelja kvaliteta mašine ostvarivanjem osnovne namene mašine, tj. obradom test radnih predmeta. Na taj način se indirektno na test komad preslikava geometrija mašine, ali i program upravljanja: Merenjem test radnog

predmeta na mernoj mašini, dolazimo do slike pokazatelja kvaliteta mašine. Ova ispitivanja se vrše prema proceduri ispitivanja radne tačnosti numerički upravljanih mašina alatki, pri čemu se vrši obrada test radnog predmeta, koji je dogovorno ustanovljen. Pitanje je kakav treba da bude ovaj test radni predmet? Mogućnosti su pokazane na slici 2. Kao prvi pokazan je pojednostavljeni ISO test radni predmet (slika 2a). Drugi je ISO test radni predmet (slika 2b), koji je uobičajen za ispitivanje numerički upravljanih glodalica. Treći test radni predmet sa gridom žlebova (slika 2c), koji su interesantni za proveru linearne interpolacije. Četvrti je test radni predmet sa profilisanim detaljima za obradu velikim brzinama, pogodnim za proveru kružne interpolacije (slika 2d). Peti je test radni predmet u obliku četvorostrane piramide za obradu profila velikim brzinama (slika 2e). Šesti je test radni predmet u obliku kupe za obradu profila velikim brzinama (slika 2f).

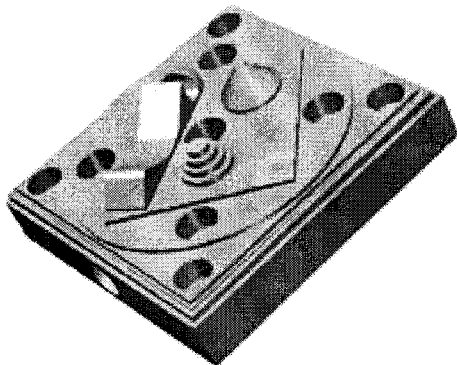


Slika 2. Test radni predmeti za ispitivanje radne tačnosti

Ispitivanje može biti ostvareno primenom svih, nekih od pokazanih i/ili njima sličnim radnim predmetima. Ako se želi potpunija informacija uobičajeno je da se obradi složeniji test predmet. Tako se ISO test radni predmet (slika 2b) uobičajeno koristi za kompletnu proceduru ispitivanja. Postoji mogućnost da se u ova ispitivanja uključi i statistika, za procenu sigurnosti dobijenih rezultata. To se radi na jednostavnijim test predmetima. Obično se proverava manji broj pokazatelja na većem broju komada (minimalno 25), čime se proverava ponovljivost željenog pokazatelja mašine. Na ovim test predmetima moguće je dodati i obradu navoja rezanjem, pomoću ureznika, ali i pomoću glodala za rezanje navoja.

U netipične test radne predmete, mogu se - ubrojiti:

- test predmet sa gridom žlebova (slika 2c), koji je interesantan za proveru pravolinijskih putanja kod MPK, jer je kod ovih mašina pravi izazov obrada prave linije [2];
- test radni predmet sa profilisanim detaljima za obradu velikim brzinama (slika 2d), koji je interesantan za proveru kružne interpolacije na krugovima vrlo malih poluprečnika (1 mm), kao i za proveru tačnosti obrađenih jednakih profila raspoređenih preko radnog prostora i obrađenih na različitim Z pozicijama; ovaj test predmet obuhvata i žlebove sa malim uglovima nagiba od 1° , prema X i Y osama [2];
- test radni predmet u obliku četvorostrane piramide za obradu profila velikim brzinama (slika 2e), koji je interesantan zbog obrade nagnutih ravnih površina i potrebe za ostvarivanjem tačnog prelaza sa jedne na drugu površinu po pravoj liniji;
- test radni predmet u obliku kupe za obradu profila velikim brzinama (slika 2f), koji je interesantan zbog obrade blago nagnute zakrivljene površine uz mogućnost provere i linearne i kružne interpolacije u zavisnosti od primenjenih strategija obrade.

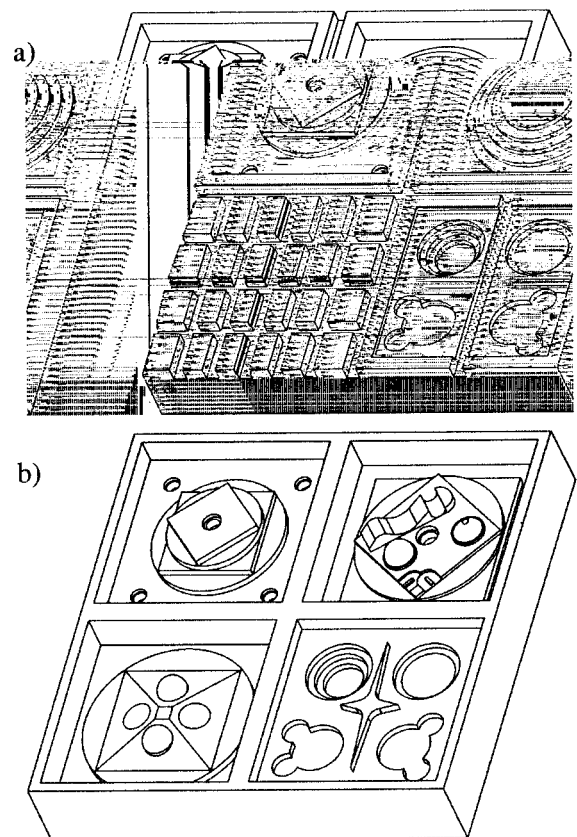


Slika 3. NCG test radni predmet za brzohodne mašine alatke [3]

Na slici 3. je pokazan NCG test radni predmet za brzohodne mašine alatke, koji sadrži više geometrijskih elemenata za proveru uklopljenih u jednu celinu. Test delove je moguće i samostalno konstruisati u zavisnosti od željenih provera, uz konsultaciju sa postojećim preporukama.

U opštem slučaju moguća je i kombinacija ovih test radnih predmeta, kao na slici 4, pošto svaki deo u sebi može sadržati neku karakterističnu proveru, a tek zajedno daju potpuniju informaciju o pokazateljima kvaliteta mašine. Tako na primer test radni predmet sa slike 4a sadrži ukomponovane uobičajene test oblike u jednu celinu. Namenjen je ispitivanju MPK troosnom obradom. Radni predmet sa slike 4b sadrži i oblike za ispitivanje višeosne obrade, kao što je petoosna. Tu se dve ispupčene i dve udubljene sfere na stranicama piramide, zatim -

reljefni talasasti oblik koji se završava četvrtinom sfere, polusfera i kosa kupa.



Slika 4. Primeri test radnih predmeta za višeosnu obradu brzohodnim mašinama sa paralelnom kinematikom

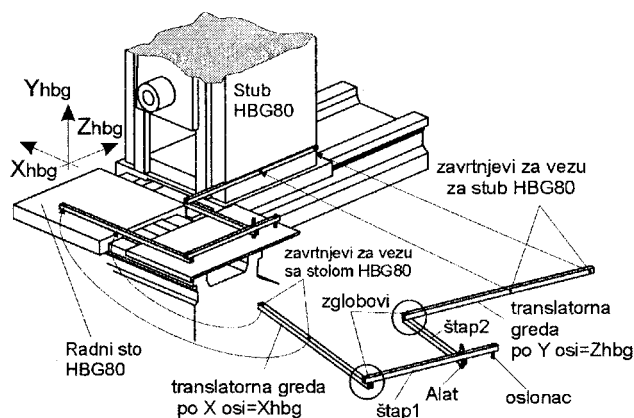
4. REZULTATI IPITIVANJA GEOMETRIJE I UPRAVLJANJA MAŠINA SA PARALELNO KINEMATIKOM

U nastavku će biti opisani neki od rezultata u vezi ispitivanja i geometrije i upravljanja mašina sa paralelnom kinematikom, u toku dosadašnjeg rada.

4.1 Dvoosni tehnološki modul sa paralelnim mehanizmom

Prva iskustva u definisanju metoda za ispitivanje i verifikaciju geometrije i programiranje mašina sa paralelnom kinematikom ostvarena su na primeru dvoosnog 2D tehnološkog modula sa paralelnim mehanizmom (2D TeMoPaM) koji je detaljno opisan u [4]. Ovaj paralelni mehanizam se kao modul postavlja na baznu mašinu HBG 80. Paralelni mehanizam je u obliku pokretnih "makaza" sa dve translatorne ose i dva štapa (štap 1 i štap 2) konstantne dužine (slika 5.). Dvoosni tehnološki modul sa paralelnim mehanizmom, je ravanski mehanizam posmatra-

an u ravni XY mehanizma, odnosno ravni X_{HBG}, Z_{HBG} bazne mašine. U posmatranoj ravni mehanizam ima zadovoljavajuću krutost, što nije slučaj za vertikalan pravac. Da ne dode 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 писаč koristi se flomaster sa keramičkom kuglicom, koji se umeće unutar samog zgloba. U otvor gde se smešta flomaster, postavlja se i opruga koja obezbeđuje писаču potrebnu vertikalnu popustljivost.

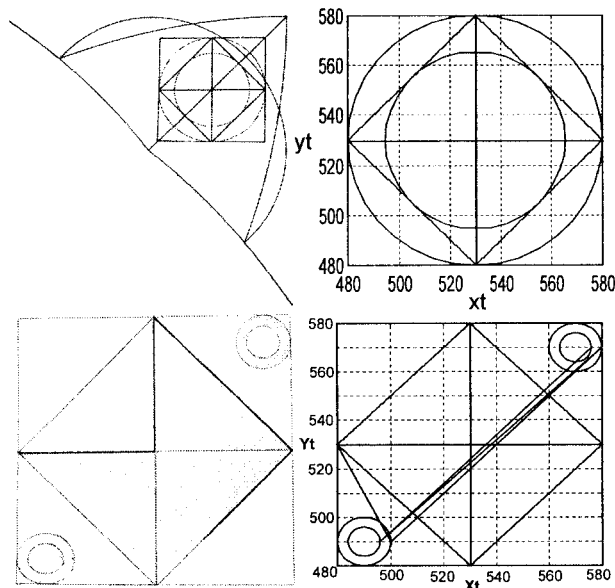


Slika5. Osnovni delovi 2D TeMoPaM i simbioza 2D TeMoPaM i bazne mašine

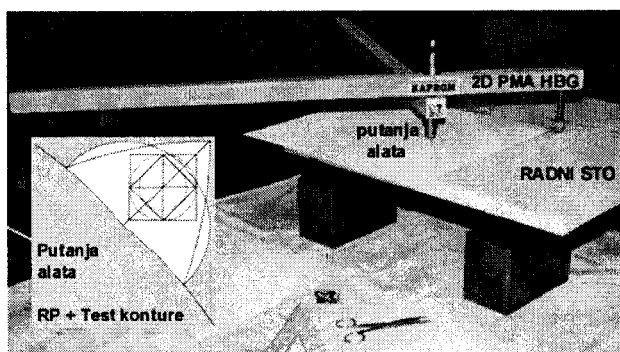
S obzirom da tehnološki modul sa paralelnim mehanizmom o kome je reč, kao baznu mašinu koristi HBG 80, njegov test radni predmet za ispitivanje radne tačnosti, je bio osnova za osmišljavanje test konture za ispitivanje. S obzirom da se radi o edukacionom tehnološkom modulu, obrada test radnog predmeta, je ovde predstavljena iscrtavanjem test konture i obuhvata sledeće provere: provera pozicioniranja (pre početka obrade), provera ponovljivosti pozicije, provera radnih kretanja (provera izvršenja linearne interpolacije, provera izvršenja kružne interpolacije).

S obzirom da je se radi o 2D mašini interesantno je razmotriti "obradu" (crtanjem vrha mehanizma pomoću писаča), test kontura koje će pokriti pomenute provere. Prilikom izbora geometrije - test konture, birani su karakteristični pravci, kada se kretanje ostvaruje duž osa X i Y u obliku kvadrata u koji je upisan zarotirani kvadrat pod 45° . U toku

obilaska konture ima i ponavljanja dela putanje radi provere ponovljivosti. Uz linearnu interpolaciju dodaje se i kružna interpolacija, sa krugovima koji tangiraju karakteristične stranice kvadrata, radi provere upravljačkog dela, ali i provere geometrije i krutosti samog mehanizma na tačnost obrade. Krugovi su upisani u prethodno pomenute kvadrate pri linearnoj interpolaciji, kao i u uglovima većeg kvadrata. Pored toga razmatra se položaj koncentričnih krugova, kao i krugova koji su na granici radnog prostora.



a) Test konture za ispitivanje geometrije i programiranja na primeru 2D TeMoPaM



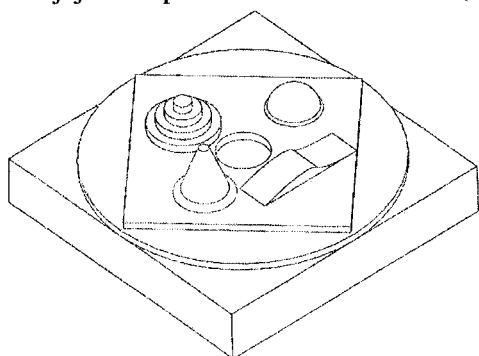
b) Izgled radnog mesta tokom eksperimenta Slika 7. Ispitivanje 2D TeMoPaM [4]

Prikazane slike su dobijene crtanjem primenom 2D paralelnog mehanizma, pomoću flomastera, na kartonu koji je postavljen na plastičnoj tabli. Ova tabla ima ulogu radnog stola, čija je visina podešena primenom graničnih merila. Prilikom rada posebna pažnja je posvećena granicama radnog prostora radi analize rezultata u

granicama i van ovog prostora. Izgled eksperimentalnog radnog mesta dat je na slici 7. Na slici 7a) predstavljene su programirane i iscrtane konture. Kontura za proveru je smeštena u kvadrat 100x100 mm i pokazan je njen odnos prema granicama radnog prostora. Prvom test konturom - je potvrđena ispravnost upravljačkih programa dobijanjem željenih kontura i njihovih odnosa. Međutim zbog prirode samog mehanizma, pomeranjem mehanizma blisko nultim pozicijama (skupljeni štapovi), dolazi do izražaja uticaj krutosti mehanizma na tačnost ostvarenih dimenzija. Uticaj na grešku je veći kada su štapovi bliski, a manji kada su razmaknutiji. U prilog ovoj tezi govori i primer druge analizirane test konture kod koje je par koncentričnih krugova u gornjem uglu sa zadovoljavajućom tačnošću, dok je donji par spljošten.

4. 2 Troosni tehnološki modul sa paralelnim mehanizmom - funkcionalni simulator mašine sa paralelnom kinematikom - P3

Troosna mašina sa paralelnom kinematikom (3D MPK) je nastavak ideje realizacije mašine kao tehnološkog modula sa paralelnim mehanizmom, po uzoru na uopštenu koncepciju paralelnog mehanizma sa translatorskom pokretnim zglobovima i spojkama istih konstantnih dužina. Ovakav modul se ugrađuje na postojeće ose obradnog centra HBG80 slično kao prethodno opisani mehanizam. Na taj način je napravljen funkcionalni simulator troosne glodalice sa paralelnom kinematikom - pod nazivom P3[6,7]. Osnovna koncepcija podrazumeva paralelnost osa tradicionalne mašine sa osama po kojima se kreću klizači sa zglobovima. Platforma i klizač su sa dve noge konstantnih dužina sfernim zglobovima međusobno povezane. Na taj način bi se translatorskim pomeranjem klizača menjala pozicija platforme po tri ose, slično kao što se to ostvaruje i na tradicionalnim troosnim mašinama, ne menjajući orijentaciju alata, koji ostaje stalno paralelan horizontalnoj Z osi [7]. Za ispitivanje - geometrije i upravljanja ove mašine odabran je test radni predmet koji je koncipiran za brzohodne mašine (slika 8.)

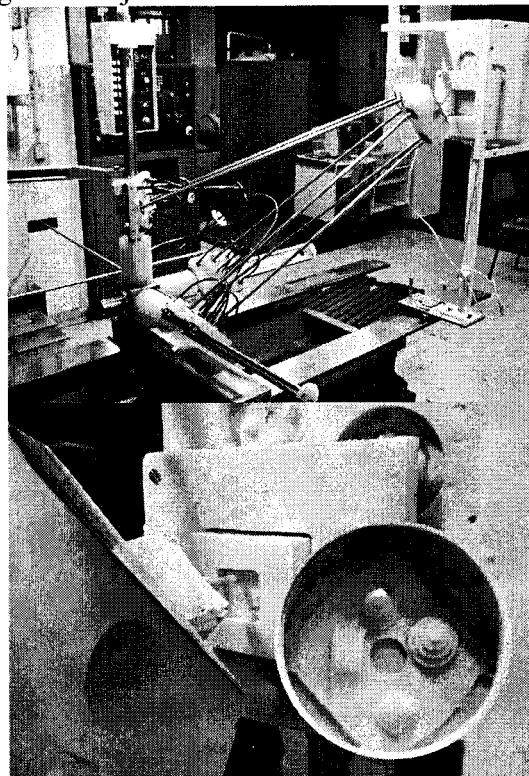


Slika 8. Test radni predmet za P3[6]

U ovu grupu mašina spada i P3 prema svojoj koncepciji. Mere ovog test radnog predmeta su podešene prema gabaritima radnog prostora mašine koji je ovde malih dimenzija (80x80mm). Pošto je r-

eč o edukacionoj eksperimentalnoj mašini kao materijal za obradu koriste se mekani materijali (u ovom slučaju pur pena).

Karakteristični elementi geometrijskih oblika na test radnom predmetu su odabrani raspoređeni tako da se obrada može ostvariti sa dva glodala. Jedno vretenasto i jedno loptasto glodalo prečnika 6 mm. Izometrijski prikaz ovog dela dat je na slici 8. Deo u osnovi podseća na ISO test komad, pošto ima karakteristični veliki krug u koji je upisan zarotiran kvadrat i mali centralni krug. Međutim poravni površine kvadrata su raspoređena još četiri karakteristična elementa i to: polusfera, kupa, stepanasti cilindrični oblici i talasasta reljefna površina. Ovaj probni deo je u više navrata obrađen u mekano-materijalu. Prvi put tokom regularnog ispitivanja ove mašine[6], a potom i tokom laboratorijskih vežbi iz predmeta Mašine alatke na Mašinskom fakultetu. Na osnovu ostvarene obrade (slika 9) moglo se zaključiti:

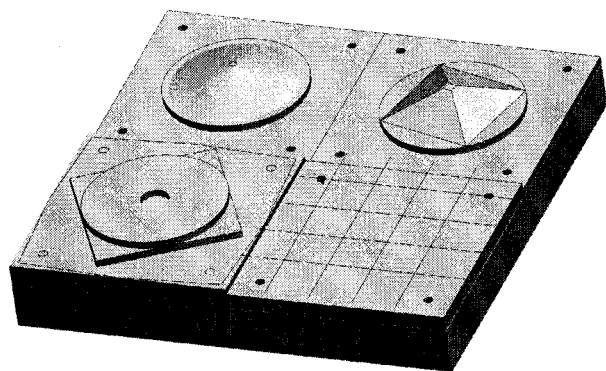


Slika 9. Eksperimentalno okruženje P3 funkcionalnog simulatora i test predmet

- izgled i proverene gabaritne mere potvrdile su koncept izračunavanja primenom inverznog kinematičkog problema, za upravljanje ovom mašinom,
- ostvareno je dobro pozicioniranje pripremljenog radnog prostora mašine.
- Obradjeni geometrijski oblici reljefnih površina su bez uočenih grešaka.

6. ZAKLJUČAK

Ispitivanje i verifikacija geometrije i upravljanja mašine je obaveza koja treba da prati, konfigurisanje novih mašina alatki. U radu je opisan put od sticanja prvih iskustava na dvoosnom tehnološkom modulu sa paralelnim mehanizmom, do troosnog funkcionalnog simulatora paralelne mašine. Ovde je predstavljen samo deo rezultata, kao ilustracija istraživanja. Rezultat projekta Troosne paralelne mašine je industrijski prototip prve generacije takvih mašina kod nas i ispitivanje ove mašine još uvek traje. Ova istraživanja prati i odgovarajuća podrška za ispitivanje geometrije i upravljanja ovakvim mašinama, od prvobitnih test kontura koje su iscrtavane na kartonu, preko obrade u mekim penastim materijalima, pa do obrade test radnih predmeta od legura aluminijuma prema standardu i/ili preporukama, uz upotrebu CAD/CAM okruženja za programiranje.



Slika 10. CAD model i obrada test radnog predmeta na mašini LOLA pn101_4 V1.

Na slici 10. prikazan je test radni predmet koji je obrađen na industrijskom prototipu LOLA pn101_4 V1 [1,8,9]. Na osnovu ostvarene obrade potvrđen je matematički model izračunavanja primenom inverznog kinematičkog problema, za programiranje ovakve mašine. Obradeni geometrijski oblici reljefnih površina su bez uočenih grešaka.

Iza ovih istraživanja je ostala dobra baza za dalji rad u domenu mašina sa paralelnom kinematikom. Kao nastavak istraživanja nameću se

petoosne mašine sa paralelnom kinematikom kao i mogućnost za pravljenje jedne takve mašine, za početak hibridnih: troosnih paralelnih sa dva serijska stepena slobode. To će tek biti pravi domet mašina alatki ovog tipa. U okviru okruženja za programiranje troosnih paralelnih mašina ostavljena je rezerva i za petoosne. Za takve mašine je ponovo potreban metod za ispitivanje i geometrije i upravljanja.

LITERATURA

- [1] Glavonjić, M., Milutinović, D., Živanović, S., Elaborat: MIS.3.02.0101.B Troosne paralelne mašine, Završni izveštaj, Mašinski fakultet, Beograd, 2004.
- [2] Powell N.P., Whittingham B.D., Gindy N.N.Z., Parallel Link Mechanism Machine Tools: Acceptance Testing and Performance Analysis, Parallel Kinematic Machines, Springer-Verlag London Limited 1999, pp. 327-344
- [3] NCG Empfehlung, NC-Gesellschaft Anwendung neuer Technologien, NCG 2004/Tell 1, Blatt1, www.ncg.de
- [4] Živanović S., Tehnološki modul sa paralelnim mehanizmom, magistarska teza, Mašinski fakultet Beograd, 2000.
- [5] Živanović S., Parallel Kinematic Machines, International Journal of Production Engineering and Computers, Volume 3, Number 3, pp.49-54, -2000.
- [6] Čović N., Razvoj konceptijskog projektovanja jedne klase fleksibilnih tehnoloških sistema, doktorska disertacija, Mašinski fakultet Beograd, 2000,
- [7] Čović N., Živanović S., Glavonjić M., Osnovna koncepcija jednog prototipa troosne mašine sa paralelnom kinematikom, 28. Savetovanje - proizvodnog mašinstva Jugoslavije, Zbornik radova, Mašinski fakultet Kraljevo, Mataruška banja, 2000.
- [8] Glavonjić M., Milutinović D., Živanović S., Kvrčić V., Višnjic Z., O jednoj troosnoj paralelnoj mašini, 30. JUPITER konferencija, 26. simpozijum NU - Roboti - FTS, Zbornik radova, str. 3.49-3.54, Mašinski fakultet, Beograd, 2004.
- [9] Glavonjić, M., Milutinović, D., Živanović, S., Sistem za kalibraciju, Projekat: Troosne paralelne mašine - MIS.3.02.0101.B, Elaborat 02-02-2004-01-02, Mašinski fakultet, Beograd, 2004.