

42. JUPITER KONFERENCIJA

sa međunarodnim učešćem

42nd JUPITER CONFERENCE

with foreign participants

ZBORNİK RADOVA PROCEEDINGS



UNIVERZITET U BEOGRADU - MAŠINSKI FAKULTET

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Beograd, oktobar 2020.



Lj. Tanović, S. Živanović, R. Puzović, B. Kokotović, M. Popović, N. Slavković,
G. Mladenović, S. Stojadinović, M. Pjević, N. Vorkapić¹

RAZVOJ NOVE GENERACIJE DOMAĆIH OBRADNIH SISTEMA² REZULTATI ISTRAŽIVANJA ZA 2019. GODINU

Rezime

Predmet istraživanja je nova generacija domaćih obradnih sistema, zajedno sa proizvodnim tehnologijama, koje su potrebne za razvoj tih obradnih sistema i za njihov nesmetani rad. Ključne oblasti istraživanja u ovim tehnologijama su mašine alatke, roboti, alati, tehnološki procesi i digitalni kvalitet. Istraživanja su usmerena ka tehnologijama otvorene arhitekture, u pogledu sistema upravljanja i programiranja, ali i u pogledu struktura ovih sistema, prateći aktuelna istraživanja u ovim oblastima. Tako se obezbeđuju fleksibilnost tehnoloških resursa i agilnost kompanija, kojima su i namenjeni ovi novi obradni sistemi, sa svojim pratećim tehnologijama. Ovde se daje pregled rezultata istraživanja za 2019. godinu, čime je zaokružen ovaj devetogodišnji ciklus projekata.

Ključne reči: obradni sistem, tehnologije, mašina alatka, obrada robotom, mikrorezanje, digitalni kvalitet

1. UVOD

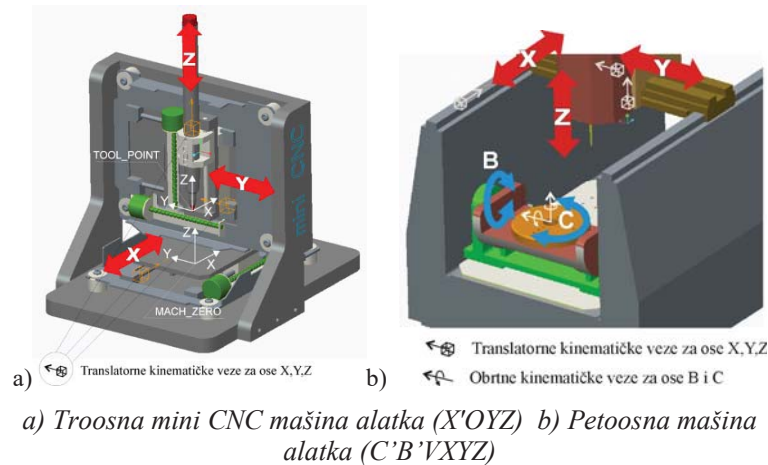
U okviru projekta "Razvoj nove generacije domaćih obradnih sistema", kompanije se posmatraju kao mreže svojih resursa, ali i kao delovi globalnih mreža resursa, da bi se uspostavila dinamičnost njihovih struktura u prihvatanju izazova gržišta. To je osnova brzog i globalnog transfera informacija, kao uslova za stalnu optimizaciju struktura tehnologija za nove proizvodne programe. Ovde su dati kratki prikazi rezultata istraživanja u 2019. godini za ključne oblasti: *mašine* (mašine alatke i robote), *tehnologije* (alate i tehnološke procese) i *kvalitet* (digitalnu kompaniju i digitalni kvalitet).

U 2019. godini, u okviru Faze 9, planiran je nastavak istraživanja za teme 1,2,3,5 i 6, koja su izvedena prema sledećem planu: *Tema 1:* Multifunkcionalna mašina alatka, aktivnosti 66 i 67. U aktivnosti 66 se planira konfigurisanje i integrisanje virtuelnih mašina alatki (troosnih i petoosnih) sa sistemom za programiranje i upravljanje. U aktivnosti 67 se planira analiza metoda programiranja, verifikacije i simulacije tehnologija dodavanja materijala. *Tema 2:* Virtuelna proizvodnja i obrada robotima, aktivnosti 68 do 70. U domenu virtuelne proizvodnje u okviru aktivnosti 68 planira se Off-line optimizacija CNC obrade na bazi simulacionog modela sila rezanja. U oblasti obrade robotima se planiraju dve aktivnosti i to 69 i 70. U aktivnosti 69 je planirana verifikacija korigovane putanje alata primenom modela virtuelnog robota koji uključuje i sile rezanja, dok je u aktivnosti 70 planiran novi pristup primene STEP-NC standarda za programiranje robota robotskim programskim jezikom. *Tema 3:* Istraživanje i razvoj prototipa mini industrijske i edukacione stone troosne glodalice sa paralelnom kinematikom, aktivnost 71. U okviru aktivnosti 71 planiran je razvoj mini CNC mašine alatke sa sistemom upravljanja otvorene arhitekture, koji obuhvata konfigurisanje virtuelnog prototipa, realizaciju prototipa i upravljanja za troosnu mini CNC mašinu alatku. *Tema 5:* Istraživanje interakcije između reznog alata i savremenih konstrukcionih materijala na bazi prevlaka, keramike i kamena (granita i mermera), aktivnosti 72 i 73. Aktivnosti 72 obuhvata analizu interakcije alata i obratka pri mikro rezanju materijala na bazi mermera i granita. U okviru aktivnosti 73 je planiran razvoj autonomnog sistema za optimizaciju procesa obrade glodanjem delova sa složenim površinama. *Tema 6:* Digitalna kompanija/kvalitet–ontološki prilaz, aktivnost 74. U okviru aktivnosti 74, planirana je verifikacija merne putanje pri inspekciji prizmatičnih delova na NUMM bazirana na modifikovanom Hemerslejevom algoritmu.

¹ Prof dr Ljubodrag Tanović, ltanovic@mas.bg.ac.rs, Prof dr Saša Živanović, szivanovic@mas.bg.ac.rs, Prof dr Radovan Puzović, rpuzovic@mas.bg.ac.rs, doc. dr Branko Kokotović, bkokotovic@mas.bg.ac.rs, doc. dr Mihajlo Popović, mpopovic@mas.bg.ac.rs, doc. dr Nikola Slavković, nslavkovic@mas.bg.ac.rs, doc. dr Goran Mladenović, gmladenovic@mas.bg.ac.rs, doc dr Slavenko Stojadinović, sstojadinovic@mas.bg.ac.rs, doc. dr Miloš Pjević, Nikola Vorkapić, mast. inž. maš., Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

² U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja su realizovana u okviru projekta "Integrirana istraživanja u oblasti makro, mikro i nano mašinskog inženjerstva" i podprojekta TR35022 „Razvoje nove generacije domaćih obradnih sistema“, koji finansijski podržava Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Vlade Republike Srbije po Ugovoru 451-03-68/2020-14/200105, od 24.01.2020. godine.

2. KONFIGURISANJE I INTEGRISANJE VIRTUELNIH MAŠINA ALATKI (TROOSNIH I PETOOSNIH) SA SISTEMOM ZA PROGRAMIRANJE I UPRAVLJANJE

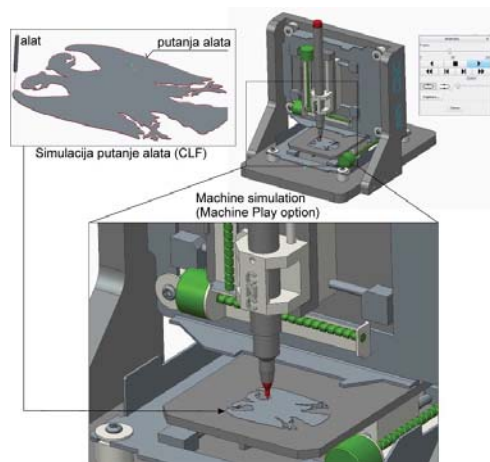


Slika 2.1 Definisanje kinematičkih veza u CAD/CAM okruženju i/ili programa za obradu (G - kôda). Pri tome je ovaj poslednji vid simulacije koji uključuje kompletan model mašine, koja radi po zadatom programu, vrlo značajan za petoosne obrade zbog mogućnosti uočavanja eventualnih kolizija koje se ne mogu uočiti prethodno pomenutim simulacijama. U okviru ove aktivnosti su razmatrane dve mašine i to: jedna troosna mini CNC mašina alatka struture X'OYZ (Slika 2.1a), i jedna petoosna sa dve obrtne ose na grani obratka struture C'B'VXYZ (Slika 2.1b).

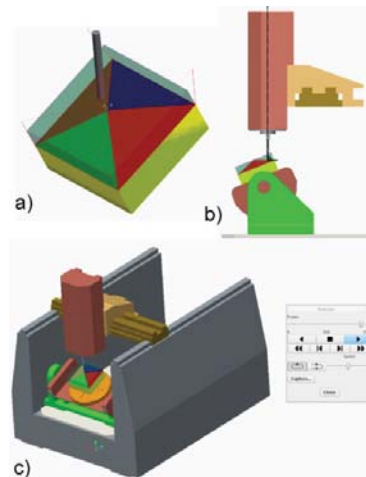
Programiranje razmatranih mašina je uobičajeno primenom CAD/CAM sistema. Intergacija virtuelnih mašina u sistem za programiranje omogućava simulaciju rada virtuelnih mašina koje rade po zadatom programu.

Faze za konfigurisanje virtuelne mašine alatke su: (1) Opis kinematičke strukture mašine alatke, odnosno njenog skeleton modela; (2) Kompletiranje CAD modela virtuelne mašine alatke, odnosno, modeliranje baznih komponentata modela mašine. Ako model mašine već postoji, koristi se model mašine alatke obično u STEP i STL formatima; (3) Definisanje kinematičkih veza i pokretljivosti osa mašine, podrazumeva analizu modela virtuelne mašine alatke i integrisanje odgovarajućih kinematičkih veza, koje će omogućiti pokretljivost elemenata mašine, slika 2.1. Ovde je potrebno i korektno definisati smerove i hodove pokretnih komponentata mašine, kako translatorskih tako i obrtnih. Na kraju ove faze neophodno je analizirati pokretljivost modela u definisanim granicama; (4) Simulacija rada virtuelne mašine alatke po zadatom programu, koji u zavisnosti od primenjenog okruženja za programiranje i metoda programiranja može najčešće biti, putanja alata (CLF – Cutter Location File) ili G kôd. Ovakva simulacija obrade omogućava učitavanje kompletnog modela virtuelne mašine alatke za potrebe verifikacije programa.

Primeri simulacije rada virtuelnih mašina u CAD/CAM okruženju PTC Creo, za obe razmatrane mašine je pokazani su na slikama 2.2 i 2.3.



Slika 2.2 Simulacija rada virtuelne troosne mašine

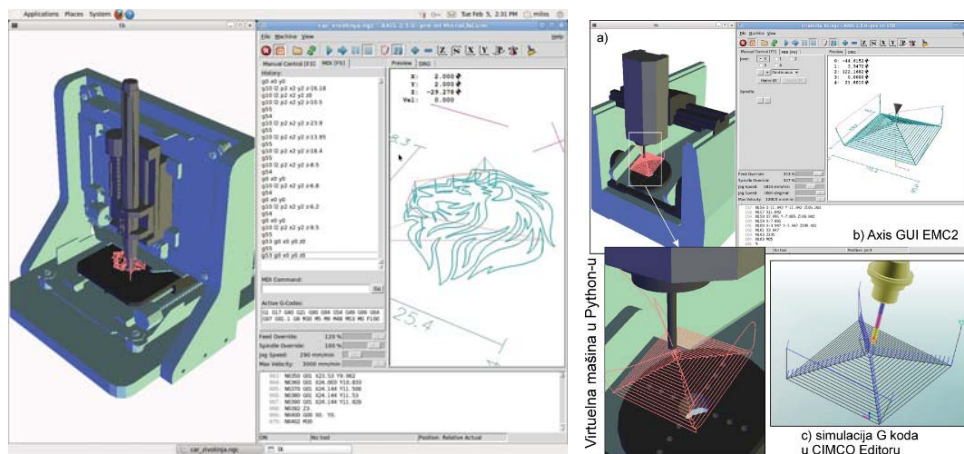


Slika 2.3 Simulacije rada petoosne mašine SSD za zadati program obrade

Cilj tokom istraživanja u ovoj aktivnosti je bio i da se ostvari simulacija rada virtuelne mašine alatke, koja se upravlja na isti način kao i stvarna mašina i koja je integrisana sa upravljačkim sistemom, ovde Linux CNC sistem EMC2, za krajnju verifikaciju programa pre puštanja mašine u rad. Pored toga, kada se vrši razvoj nove mašine alatke, virtuelna mašina integrisana sa upravljanjem je i način da se verifikuje upravljanje i kinematički model mašine koji je integrisan u sistem upravljanja. Na taj način je moguće imati testirano upravljanje i pre realizacije same mašine.

Konfigurisanje virtuelne mašine integrisane sa upravljanjem je realizovano primenom Python objektno orijentisanog programskog jezika, koji se koristi i za programiranje grafičkih korisničkih interfejsa i omogućava programiranje i povezivanje geometrijskih primitiva, kao i njihovu integraciju sa LinuxCNC sistemom upravljanja. U njemu je programirano i samo okruženje Axis, koje se koristi kao GUI (Graphical User Interface) za LinuxCNC upravljanje. Povezivanjem virtuelne mašine alatke sa upravljačkim jezgrom LinuxCNC sistema kompletira se i virtuelna mašina u OpenGL 3D grafičkom okruženju za simulaciju i verifikaciju upravljanja i programiranja.

Za potrebe konfigurisanja razmatranih virtuelnih mašina u ovoj aktivnosti iskorišćeni su kompletni modeli svih podsklopova mašina, koje su modelirane u CAD/CAM okruženju. Potrebno je sve podsklopove pripremiti u Ascii STL ili Ascii OBJ formatu, koje Python može direktno učitati u referentnom koordinatnom sistemu, nakon čega treba komponente orijentisati i postaviti na odgovarajuće mesto u sklopu virtuelne mašine. Kao rezultat se dobijaju virtuelne mašine u Python 3D okruženju, integrisane sa grafičkim interfejsom Axis, slika 2.4. Virtuelna mašina radi u posebnom prozoru i omogućava kretanje osa mašine, sa iscrtavanjem putanje alata. Ova simulacija je nastala kao rezultat izvršenja programa (G - kôda) u realnom vremenu, na isti način kao da se vrši upravljanje stvarnom mašinom.



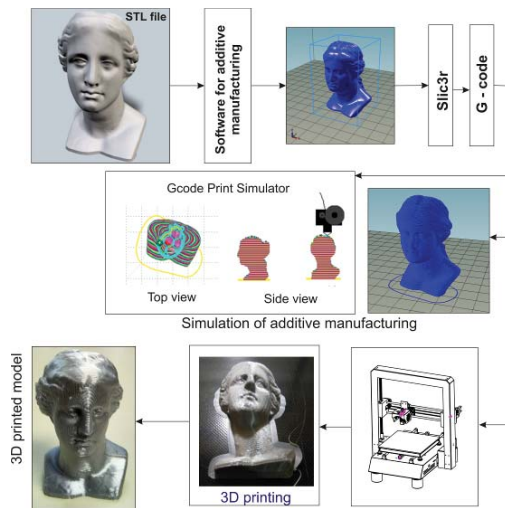
Slika 2.4 Simulacija rada virtuelnih mašina integrisanih sa sistemom upravljanja Linux CNC

3. PROGRAMIRANJE, VERIFIKACIJA I SIMULACIJA TEHNOLOGIJA DODAVANJA MATERIJALA

Ovaj odeljak se odnosi na istraživanja koja su obavljena u 2019. godini za Temu 1: Multifunkcionalna mašina alatka. U Aktivnosti 67, razmatrano je programiranje, verifikacija i simulacija tehnologija dodavanja materijala, za mašine koje se koriste za brzu izradu prototipova postupcima dodavanja materijala.

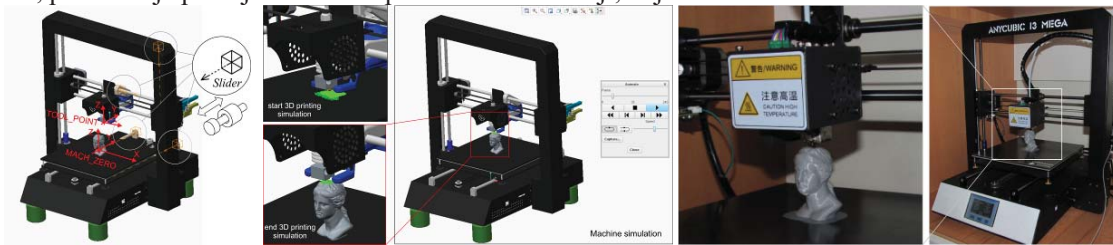
Brza izrada prototipova je danas jedna od ključnih tehnologija koje omogućavaju, skraćivanje vremena projektovanja i vreme razvoja proizvoda. Ove tehnologije omogućavaju brzu izradu fizičkih modela, funkcionalnih prototipova i malih serija delova direktno iz CAD modela. Ova tehnologije su poznate i kao aditivne tehnologije, proizvodnja u slojevima, izrada dodavanjem materijala ili 3D štampa. Primena novih tehnologija brze izrade prototipova dodavanjem materijala bazirana je na modelima u STL formatu. U okviru ove aktivnosti se razmatraju metodi za programiranje i simulaciju dodavanja materijala u cilju verifikacije programa upravljanja.

Kao model za analizu programiranja i simulacije dodavanja materijala, korišćen je model Afrodite (Venus) u STL formatu. Razmatrano je programiranje dodavanjem materijala pomoću tehnologije fuzionog deponovanja materijala (FDM – Fused Deposition Material), slika 3.1. Korišćeni su specijalizovani softveri za programiranje i simulaciju dodavanja materijala i oni mogu da simuliraju putanju mlaznice dodavanja

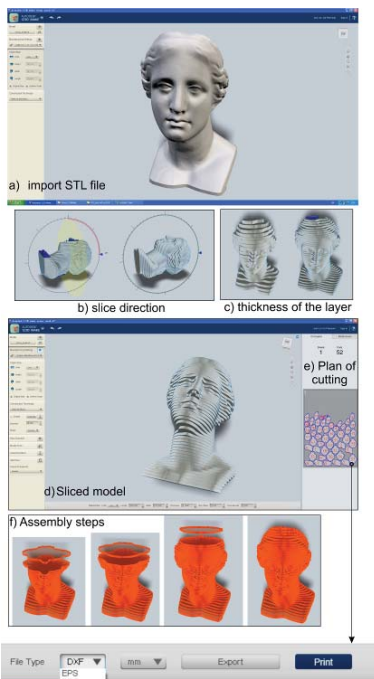


Slika 3.1 Programiranja i simulacija dodavanjem materijala na primeru FDM

3D štampača koji se koristi sve translacije i podrazumevaju definisanje veza tipa Slider. Potrebno je definisati odgovarajuće koordinatne sisteme obratka i radnog stola (MACH_ZERO) i koordinatni sistem alata (ovde mlaznice) - TOOL_POINT, slika 3.2. Za dobijanje putanje po kojoj će se kretati mlaznica mašine, potrebno je putanju iz G koda pretvoriti u DXF fajl, koji se učitava u CAM modul.



Slika 3.2 Simulacija rada 3D štampača u CAD/CAM okruženju i prikaz rada u realnom okruženju



Slika 3.3 Generisanje slojeva sečenja i simulacija dodavanja materijala sloj po sloj na primeru softvera 123Dmake

materijala, ali ne mogu da uključe u simulaciju i model virtualne mašine za aditivnu gradnju (3D štampač). Ovakve simulacije koriste generisani G kod za prikaz putanje mlaznice. Ovo je uobičajena opcija specijalizovanih softvera za 3D štampu, a takođe postoje i nezavisni programi za simulaciju već generisanog programa za 3D štampu kao što je G code Print Simulator. Sa druge strane, standardna karakteristika većine CAD/CAM sistema je mogućnost simulacije koja uključuje i virtualnu mašinu alatku koja radi na osnovu programa.

Za sada postoji mala mogućnost direktne simulacije virtualne mašine za postupke dodavanja materijala, ali je to moguće ostvariti indirektnim putem u CAD/CAM okruženju (PTC Creo), na sličan način kao i za glodalicu. Ova indirektna metoda podrazumeva da se mašina za aditivnu proizvodnju modelira na isti način kao i glodalica sa istom kinematikom, koja podrazumeva modeliranje mašine sa svim kinematičkim vezama, koje su ovom slučaju za primer

Kao drugi primer pripreme za izradu istog modela, koji se formira na bazi dodavanja kompletnih 2D slojeva, korišćene su mogućnosti softvera Autodesk 123D Make, koji omogućava izradu lejera, slično kao kod postupka dodavanja materijala u slojevima LOM (Laminated Object Manufacturing). Primer generisanja slojeva, i dobijanja plana sečenja, koja uključuje i simulaciju dodavanja materijala sloj po sloj, pokazan je na slici 3.3a. Nova verzija softvera je poznata pod imenom Slicer for Autodesk Fusion 360, koja ima iste mogućnosti kao i prvobitna verzija softvera.

Generisanje slojeva sečenja u softveru Autodesk 123D Make, je pokazano na slici 3.3a. Kao ulaz se koristi model u STL formatu (Import STL file). Program nudi nekoliko opcija za generisanje modela i načina gradnje. Za razmatrani primer je korišćena opcija sečenja modela paralelnim ravnima (Stacked slices), koje je moguće orijentisati prema najpovoljnijoj ravni modela za njegovu gradnju, slika 3.3b. Izborom opcije Manufacturing settings, zadaju se osnovni parametri za gradnju modela, od kojih je najznačajnija debljina sloja, slika 3.3c. Prikaz modela nakon konačno usvojene debljine jednog sloja je pokazan na slici 3.3d. Nakon toga je moguće generisati plan sečenja (Get Plans option), slika 3.3e. Moguće je izabrati dve opcije: Simple i Nested layers. Druga opcija je povoljnija jer pravi optimalni raspored slojeva na izabranoj veličini materijala. Na ovaj način se dobija 2D plan sečenja svih slojeva, koji se iz softvera mogu generisati u različitim formatima EPS, DXF i PDF, slika 3.3. Na osnovu izlaza u DXF formatu moguće je lako generisati i program za mašinu za sečenje



Slika 3.4 Model dobijen lepljenjem slojeva kartona

laserom kojom se mogu iseći svi potrebni slojevi za gradnju fizičkog modela, lepljenjem svih slojeva prema planu gradnje.

Softver takođe poseduje i mogućnost simulacije dodavanja materijala, korišćenjem opcije Assembly Steps, slika 3.3f, koji omogućava simulaciju dodavanja slojeva i virtuelno kreiranje modela. Dobijeni model sečenjem kartona debljine 1mm, po slojevima i lepljenjem svih slojeva prema rednom broju, pokazan je na slici 3.4. Svaki sloj se u odnosu na prethodni pozicionira pomoću markera koji su obeleženi na svakom sloju. Ovaj model je samo ilustracija metoda aditivne gradnje s

obzirom da je debljina slojeva velika, a samimi tim i dobijeni model ima vrlo grubi izgled. Korišćenjem tanjih slojeva papira može se dobiti verniji prikaz modela.

4. OFF-LINE OPTIMIZACIJA CNC OBRADNE NA BAZI SIMULACIONOG MODELA SILA REZANJA

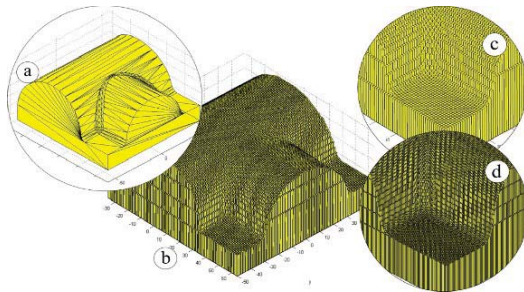
Ovaj odeljak se odnosi na istraživanja koja su obavljena u 2019. godini za Temu 2: Virtuelna proizvodnja i obrada robotima. U Aktivnosti 68, razmatrana je Off-line optimizacija CNC obrade na bazi simulacionog modela sila rezanja.

U okviru ove aktivnosti predstavljeno je istraživanje koje se odnosi na optimizaciju CNC obrade glodanjem ravanskih kontura ravnim vretenastim glodalima. Kako je u poslednje vreme sve više popularno programiranje primenom CAD/CAM sistema, optimizacija procesa obrade koju CAD/CAM sistemi nude, svodi se na definisanje različitih strategija obrade, koje mogu uticati na nivo proizvodnosti. Pravi pokazatelj stabilnosti obradnog sistema jesu sile u zoni obrade. Da bi jedan proizvodni proces bio stabilan, očekuje se da sile u toku procesa rezanja budu konstantne. Međutim često se zbog spoljašnjeg ili unutrašnjeg oblika konture sile u toku rezanja razlikuju zato što se alat programira tako da prati geometriju dela koji treba izraditi, a ne vodi se računa o trenutnoj zahvaćenoj površini materijala. Na nekim delovima putanje alata, najčešće na nekom pravom delu, ugao zahvata će biti mali i konstantan, pa se očekuje da sile rezanja budu konstantne. Na prelazima sa jednog dela konture na drugi, najčešće u čoškovima, ugao zahvata alata je veći i sile rezanja naglo rastu. Tada dolazi do oštećenja alata, što u nastavku procesa obrade znatno može uticati na kvalitet obrađene površine i tačnost definisanih mera. Optimizaciju procesa obrade moguće je izvršiti variranjem nekih od parametara kao što su dubina rezanja ili brzina pomoćnog kretanja.

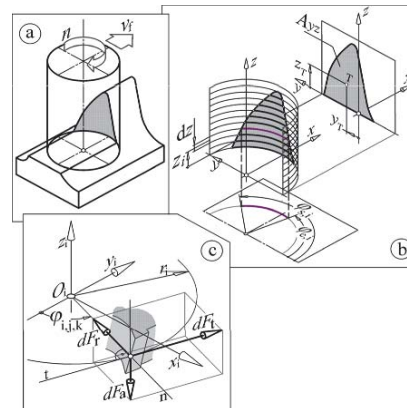
Da bi se odredile trenutne sile u zoni obrade, neophodno je definisati matematičke modele sila rezanja, kao i specifične sile rezanja koje na njih utiču. Matematički modeli sila rezanja definisani su u izrazu 1.

$$\begin{aligned} dF_t(i, j) &= u m (K_{TC} h_s(i, j) dz + K_{te} dL) \\ dF_r(i, j) &= u m (K_{rC} h_s(i, j) dz + K_{re} dL) \\ dF_a(i, j) &= u m (K_{ac} h_s(i, j) dz + K_{ae} dL) \end{aligned} \quad (1)$$

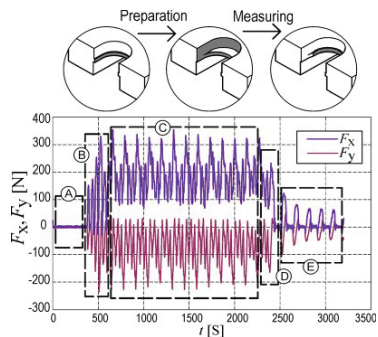
Ovako definisani matematičke modeli, predstavljaju elementarne vrednosti sila rezanja u zoni obrade, koje deluju na elementarno sečivo alata i na elementarnu zahvaćenu površinu obratka tim alatom (slika 4.2). Da bi se ove elementarne veličine definisale, neophodno je izvršiti diskretizaciju alata i obrtka. Diskretizacija obratka interpretirana je u pomoću Z-mape (slika 4.1).



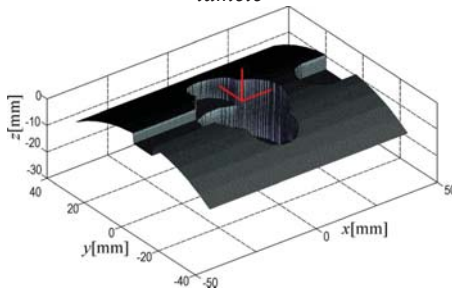
Slika 4.1 Interpretacija obratka pomoću Z-mape



Slika 4.2. Interpretacija diskretizovanog sečiva alata i trenutne zahvaćene površine materijala obratka



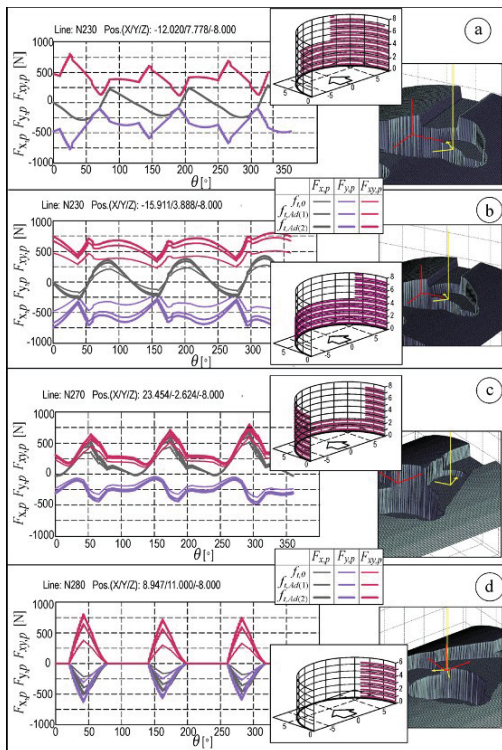
Slika 4.3 Prikaz rezultata obrade tanke lamele



Slika 4.4 Interpretacija izabranog dela pomoću Z-mape

Nakon definisanja matematičkog modela, potrebno je za date uslove obrade koje podrazumevaju izabrani tip materijala alata i obratka, kao i izabranu geometriju alata, odrediti specifične sile rezanja. Napravljen je pripremak u vidu tanke lamele, određene debljine (slika 4.3). Tako izrađen pripremak, postavljen je na šestokomponentni dinamometar i izvršena je obrada tanke lamele pri određenim režimima obrade. Dobijene vrednosti sile rezanja su naknadno obrađene i iz njih su prema odgovarajućim matematičkim modelima izvučene vrednosti specifičnih sile rezanja. Dobijene specifične sile, mogu se koristiti za predikovanje sile rezanja duž programirane putanje alata, pri istim uslovima obrade kao za tanku lamelu. Za potrebe verifikacije predstavljene metodologije, izvršena je obrada dela prikazanog na slici 4.4. Optimizacija G koda koja je primenjena u okviru ove aktivnosti, odnosila se na optimizaciju variranjem brzine pomoćnog kretanja. U okviru softverskog paketa matlab, izvučene su odgovarajuće mape zahvata i prema njima su predikovane sile rezanja.

Rezultati dobijeni predikcijom sile rezanja za odgovarajuće mape zahvata, prikazani su na slici 4.5, a na slici 4.6 može se videti program u G kodu sa prilagođenim vrednostima brzine pomoćnog kretanja, takve da sile rezanja u toku procesa obrade budu konstantnih vrednosti.



Slika 4.5 Interpretacija predikovanih sile rezanja za odgovarajuće mape zahvata

%	
:8022(S802SHED.TAP)	N44G3X0.Y-14.000R14.F570
(SHEDULINGFXY800N)	N45G3X0.500Y-13.991R14.F180
(RESHED.VFINCR=30MM/MIN)	N46G3X7.000Y-12.124R14.F150
N10G54G40G49G80G90	N47G1X8.7321Y-11.124F150
N11G0H00Z-50.M5	N48G1X17.392Y-6.124F120
N12M00	N49G1X19.558Y-4.874F150
N13(-MILL16MM3FHSS---H16)	N50G1X20.424Y-4.374F180
N14G56X0.Y0.B0.	N51G1X21.723Y-3.624F210
N15M03S796F191	N52G1X23.022Y-2.874F240
N16G43H16Z30.	N53G1X24.321Y-2.124F270
N17G0X0.Y10.	N54G1X24.754Y-1.874F300
N18G1Z-8.F200	N55G1X25.620Y-1.374F330
N19M00	N56G1X27.676Y-0.187F300
N20G1X0.Y14.000F570	N57G1X28.000Y0.F270
N21G3X-.500Y13.991R14.F360	N58G1X22.804Y3.000F120
N22G3X-999Y13.9643R14.F180	N59G1X19.340Y5.000F150
N23G3X-987Y11.4979R14.F150	N60G1X14.143Y8.000F180
N24G3X-543Y10.2436R14.F120	N61G1X13.277Y8.500F210
N25G3X-.899Y9.8990R14.F150	N62G1X12.844Y8.750F240
N26G1X-11.313Y8.485F150	N63G1X11.978Y9.250F270
N27G1X-12.374Y7.424F180	N64G1X11.545Y9.500F300
N28G1X-13.435Y6.364F210	N65G1X11.112Y9.750F330
N29G1X-13.788Y6.010F240	N66G1X10.679Y10.000F360
N30G1X-14.495Y5.303F270	N67G1X10.246Y10.250F390
N31G1X-15.203Y4.596F300	N68G1X9.813Y10.500F420
N32G1X-16.617Y3.182F330	N69G1X9.380Y10.750F450
N33G1X-16.970Y2.828F180	N70G1X8.947Y11.000F510
N34G1X-19.799Y0.F150	N71G1X8.514Y11.250F540
N35G1X-16.970Y-2.828F150	N72G1X7.000Y12.124F570
N36G1X-13.081Y-6.717F180	N73G3X0.Y14.000R14.F570
N37G1X-12.020Y-7.778F210	N74G1X0.Y10.000F570
N38G1X-10.960Y-8.838F240	N75G0Z30.
N39G1X-9.899Y-9.899F270	N76(--ENDOFPROG--)
N40G3X-9.540Y-10.247R14.F330	N77G54G40G49G80G90
N41G3X-9.168Y-10.581R14.F390	N78G0H00Z-50.M5
N42G3X-8.784Y-10.901R14.F420	M30
N43G3X-8.389Y-11.208R14.F480	%

Slika 4.6 Interpretacija optimizovanog G koda

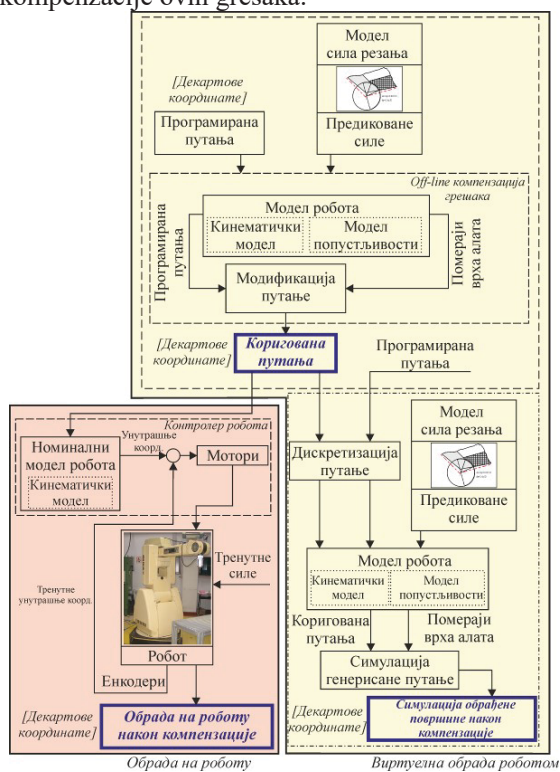
U ovoj aktivnosti prikazana je jedna uspešna primena postupka rasporeda brzine pomoćnog kretanja. Set potrebnih funkcija razvijen je u matlab softverskom okruženju. Čitav problem bio je podeljen u dve faze: off-line prilagođavanje brzine pomoćnog kretanja duž putanje alata i optimizacija brzine pomoćnog kretanja duž ove staze, u pogledu specifičnih kriterijuma. Približavanje zapremine radnog komada pomoću Z-mape omogućava njegovu relativno jednostavnu manipulaciju. Nedostatak ovog pristupa je nemogućnost obrade

složenijih oblika radnog komada. Takođe, promene rezolucije Z-mape uzrokuju porast vremena obrade. Eksperiment takođe pokazuje ograničenja primenjenih modela. Jedan od njih je odsustvo dinamičnog modela mašine, alata i procesa. Stoga, predloženi postupak ne može sprečiti vibracije u izvođenju NC programa, modifikovanog na ovaj način.

5. VERIFIKACIJA KORIGOVANE PUTANJE ALATA PRIMENOM MODELA VIRTUELNOG ROBOTA KOJI UKLJUČUJE I SILE REZANJA

Ovaj odeljak se odnosi na istraživanja koja su obavljena u 2019. godini za Temu 2: Virtuelna proizvodnja i obrada robotima. U Aktivnosti 69, razmatran je razvoj modela virtuelnog robota za verifikaciju korigovane putanje alata.

Industrijski roboti su prepoznati kao uspešna alternativa 5-osnim mašinama alatkama za obradu glodanjem velikih delova složene geometrije od mekših materijala niže i srednje klase tačnosti. Međutim, nedovoljna krutost strukture robota predstavlja jedan od ograničavajućih faktora za širu upotrebu robota u zadacima višeosne obrade glodanjem. Sile i momenti rezanja, koji su po pravilu dinamički, izazivaju značajne deformacije pri obradi delova robotom što veoma utiče na tačnost obrade. Na veličinu ovih grešaka utiče popustljivost robota i veličina sila rezanja. U cilju rešavanja problema nedovoljne krutosti robota za zadatke višeosne obrade pored analize popustljivosti robota u radnom prostoru i izbora režima obrade, čime se može uticati na veličinu sila rezanja, danas se razvijaju i različiti off-line i on-line algoritama kompenzacije ovih grešaka.



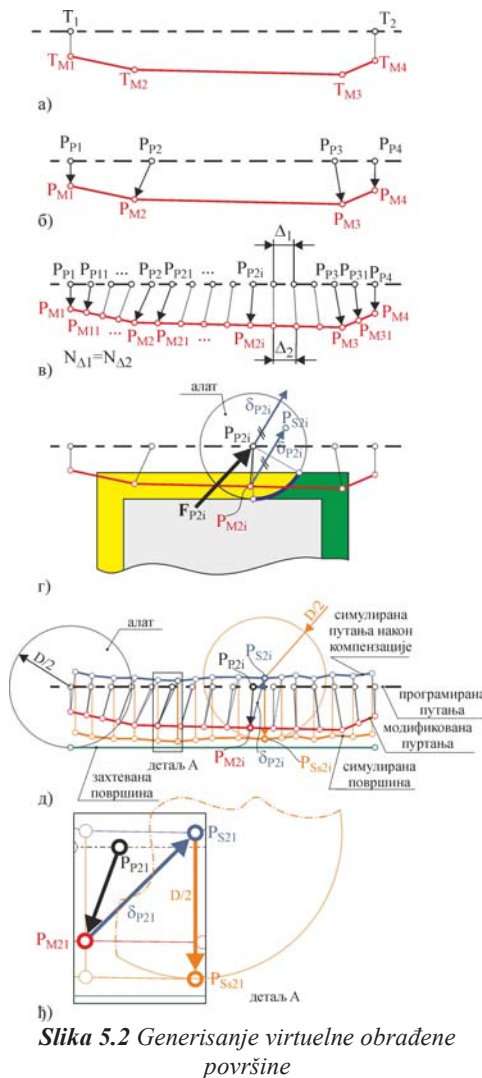
Слика 5.1 Обрада на реалном роботу и виртуелни модел робота за обраду

U okviru ovih istraživanja razmatran je razvoj modela virtuelnog robota za verifikaciju korigovane putanje alata dobijene primenom razvijenog off-line algoritma za kompenzaciju grešaka usled statičke popustljivosti robota izazvanih silama rezanja. Kao osnova za razvoj virtuelnog modela robota za obradu, slika 5.1, koji se koristi za simulaciju kompenzovane putanje alata, korišćen je razvijeni obradni sistem na bazi robota, koji je rezultat prethodnih istraživanja u okviru ovog projekta vezanih za temu 2, a koja se odnosi na virtuelnu proizvodnju i obradu robotima. Razvoj obradnog sistema na bazi robota je obuhvatio: (i) razvoj sistema upravljanja otvorene arhitekture sa programiranjem u G-kodu, i (ii) rešavanje problema tačnosti i popustljivosti robota kroz razvoj off-line algoritma kompenzacije grešaka nastalih usled statičke popustljivosti robota izazvanih silama rezanja. Obradni sistem je baziran na raspoloživom 6-osnom robotu LOLA50 vertikalne zglobne konfiguracije nosivosti 50kg koji je opremljen motornim vretenom sa maksimalnim brojem obrtaja od 18000min^{-1} .

Razvijeni virtuelni model robota za obradu, slika 5.1, se u suštini sastoji iz dva dela: (i) generisanja korigovane putanje, i (ii) generisanja simulirane obrađene površine nakon kompenzacije grešaka izazvanih silama rezanja.

Generisanje korigovane putanje je bazirano na: (i) kinematičkom modelu robota, (ii) modelu popustljivosti robota, i (iii) modelu sila rezanja. Modifikacija putanje alata na osnovu koje se generiše korigovana putanja se vrši na osnovu razvijenog algoritma za modifikaciju programiranog linearnog segmenta.

Kompletna procedura generisanja simulirane obrađene površine nakon kompenzacije grešaka na osnovu programirane i korigovane putanje se sastoji iz nekoliko koraka. Primer generisanja virtuelne obrađene površine, slika 5.2, je razmatran za slučaj proizvoljno izabranog linijskog segmenta T1T2 i njegove pripadajuće modifikovane putanje alata, dobijene primenom razvijenog algoritma za kompenzaciju grešaka. Proizvoljno izabrani linijski segment T1T2 i njegova pripadajuća modifikovana putanja alata, koja se sastoji iz tri segmenta definisanih tačkama TM1, TM2, TM3 i TM4, su prikazani na slici 5.2a. Prvi korak predstavlja identifikaciju tačaka modifikovane putanje alata PMi kao i tačaka na programiranoj putanji alata PPi, slika 5.2b. Za primer sa slike 5.2b se vidi da postoje po četiri tačke PPi i odgovarajuće tačke PMi, odnosno da se programirani linearni segment i modifikovana putanja alata sastoje iz 3 dela.



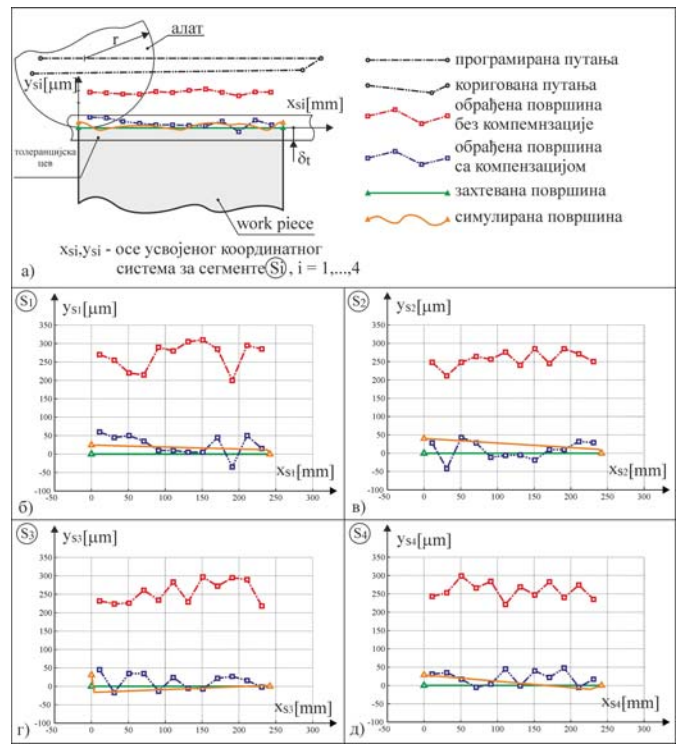
Slika 5.3 Obrada konture kvadrata test radnog dela na robotu LOLA50

U sledećem koraku se svaki od ova 3 dela programiranog linearnog segmenta diskretizuju na željeni broj podeoka, slika 5.2v. Sa slike 5.2v se vidi da svakoj čvornoj tački ili diskretizovanoj među tački odgovara jedna čvorna ili diskretizovana među tačka na modifikovanoj putanji alata. Kao što je pokazano na slici 5.2g, nakon izvršene diskretizacije programirane i modifikovane putanje potrebno je odrediti za svaku čvornu tačku i među tačku programiranog linearnog segmenta vektor sila rezanja, koji se izračunava na osnovu mehanističkog modela za predikciju sila rezanja. Nakon toga se, na osnovu vektora sila rezanja i popustljivosti robota u Dekartovim koordinatama izračunava se vektor pomeraja vrha alata. Zatim se generiše odgovarajuća tačka simulirane putanje alata, npr. P_{S2i} , prema sledećoj jednačini:

$$P_{S2i} = \begin{bmatrix} x_{PS2i} \\ y_{PS2i} \\ z_{PS2i} \end{bmatrix} = P_{M2i} + \delta_{P2i} = \begin{bmatrix} x_{PM2i} \\ y_{PM2i} \\ z_{PM2i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta x_{P2i} \\ \delta y_{P2i} \\ \delta z_{P2i} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Na slici 5.2d je dat prikaz, na ovaj način generisanih svih tačaka simulirane putanje alata nakon kompenzacije. Detalj A sa slike 5.2d, je uvećano prikazan na slici 5.2đ i pokazuje kako se, na osnovu generisane tačke simulirane putanje alata dobija odgovarajuća tačka na projekciji virtualne obrađene površine. Za verifikaciju razvijenog virtuelnog modela robota za obradu vršeni su eksperimenti obrade na test radnim delovima od aluminijuma, slika 5.3, u cilju poređenja generisane simulirane površine nakon kompenzacije i dobijene stvarne površine obradom na realnom robotu.

Uporedni prikaz rezultata obrade segmenata kvadrata, sa i bez kompenzacije, na robotu i rezultata generisanja projekcije virtualne obrađene površine su prikazani na slici 5.4.



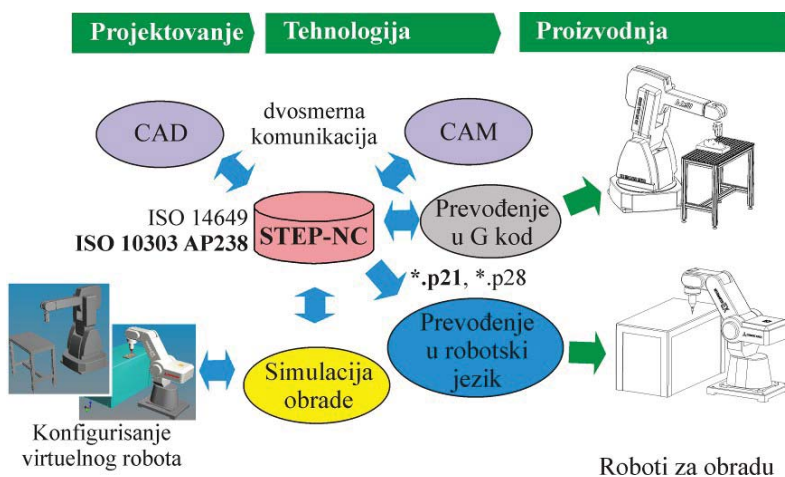
Slika 5.4 Uporedni grafički prikaz rezultata dobijenih na izdvojenim segmentima kvadrata

6. PRISTUP PRIMENE STEP-NC STANDARDA ZA PROGRAMIRANJE ROBOTA ROBOTSKIM PROGRAMSKIM JEZIKOM

Ovaj odeljak se odnosi na istraživanja koja su obavljena u 2019. godini za Temu 2: Virtuelna proizvodnja i obrada robotima. U Aktivnosti 70, razmatrana je pristup primene STEP-NC standarda za programiranje robota robotskim programskim jezikom.

Danas se novi standard, poznatiji kao STEP-NC (Standard for Product Model Data Exchange for Numerical Control), koristi kao osnova za razvoj nove generacije upravljačkih jedinica mašina alatki. Novi standardi su ISO 14649 i ISO 10303-238, i oba se primenjuju paralelno. S obzirom da se industrijski roboti sve više i više uključuju u zadatke višeosne obrade određene klase delova, neophodno je njihovo programiranje prilagoditi STEP-NC standardu u cilju približavanja programiranja industrijskih robota programiranju višeosnih mašina alatki. Prikazani pristup obuhvata programiranje i simulaciju industrijskih robota u zadacima obrade robotima. U okviru metodologije je razvijen i translator jezika koji prevodi STEP-NC program, po standardu ISO 10303-238, u odgovarajući jezik za programiranje industrijskih robota za slučaj 3-osne obrade. Verifikacija razvijene metodologije je izvršena prvo, kroz simulacije na virtuelnim robotima konfigurisanim u STEP-NC Machine softveru, a potom i eksperimentalno na raspoloživim robotima.

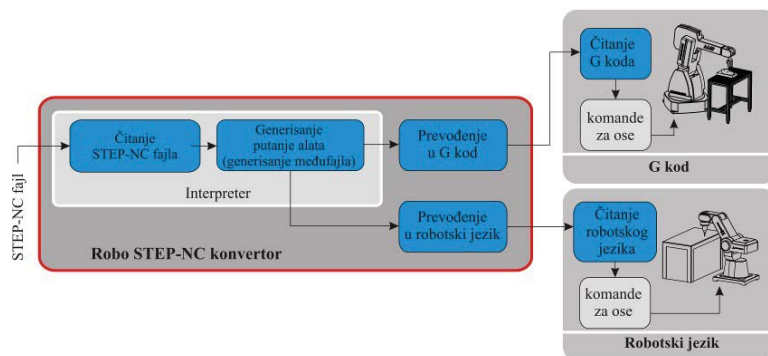
Program u STEP-NC formatu bi bilo moguće pokrenuti i na robotima za obradu samo uz uslov da robot ima upravljačku jedinicu koja podržava interpretiranje STEP-NC programa. Kao što je prikazano na slici 6.1, drugi način je indirektni metod programiranja koji je baziran na STEP-NC programu. Ovo se može uraditi na dva načina: (i) korišćenjem opcije izvoza u softveru STEP-NC Machine za izvoz programa u G-kod ako kontroler robota može direktno interpretirati G-kod, ili (ii) pomoću odgovarajućeg translatora radi prevođenja STEP-NC programa na programski jezik robota.



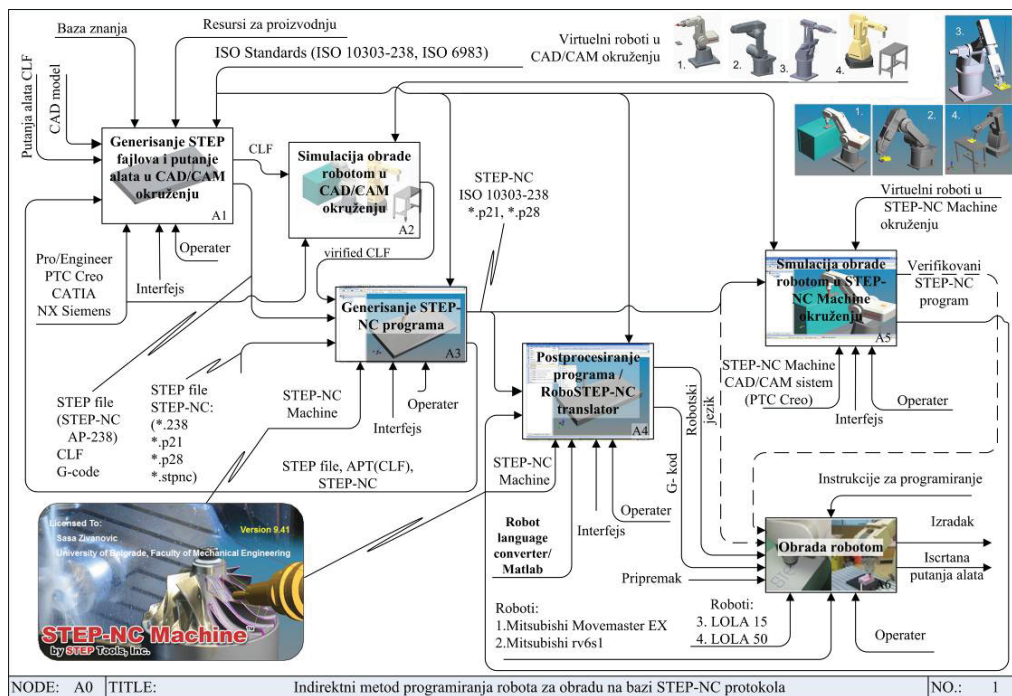
Slika 6.1 Programiranje robota za obradu primenom STEP-NC protokola

Razmatrani metod indirektnog programiranja, zasnovan na standardu ISO 10303-238, koristi razvijeni translator, slika 6.2, koji se koristi za prevođenje STEP-NC fajla u formatu p21 na odgovarajući programski jezik robota. Kao što je prikazano na slici 6.2, translator jezika se sastoji od tri osnovna dela koji se odnose na: (i) čitanje i analizu STEP-NC fajla, (ii) generisanje putanje alata (generisanje među fajla) i (iii) prevođenje među fajla na robotski jezik. Translator jezika je program koji čitanjem kompletnog p21 fajla generiše među fajl, koji sadrži sve informacije neophodne za generisanje programskog jezika robota. Tako generisan među fajl se može u opštem slučaju prevesti na odgovarajući programski jezik robota, uz poznavanje njegove sintakse. U ovim istraživanjima je on prevođen na programski jezik raspoloživog robota Mitsubishi Movemaster EX.

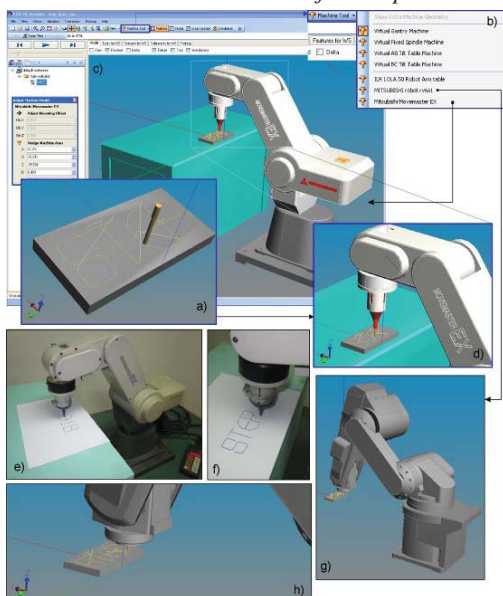
Metodologija za programiranje robota za obradu na bazi STEP-NC protokola opisana je korišćenjem IDEF0 dijagrama. Ilustracija kontekstnog dijagrama A0 najvišeg nivoa koja opisuje osnovni tok aktivnosti pokazana je na slici 6.3. Osnovni redosled aktivnosti za realizaciju indirektnog metoda programiranja robota za obradu na bazi STEP-NC protokola je: A1: Generisanje STEP fajlova i putanje alata u CAD/CAM okruženju, A2: Simulacija obrade robotom u CAD/CAM okruženju, A3: Generisanje STEP-NC programa, A4: Post procesiranje programa primenom translatora, A5: Simulacija obrade robotom u STEP-NC Machine okruženju i A6: Obrada robotom.



Slika 6.2 Indirektni metod programiranja robota na bazi STEP-NC protokola



Slika 6.3 Metodologija indirektnog metoda programiranja robota na bazi STEP-NC protokola



Slika 6.4 Eksperimentalna verifikacija razvijene metodologije

Verifikacija razvijene metodologije kroz isctavanja putanja alata, slika 6.4, je izvršena na raspoloživom robotu Mitsubishi Movemaster EX uz programiranje, simulaciju i prevođenje programa u formatu p21 na odgovarajući jezik za programiranje robota korišćenjem razvijenog translatora. Pre izvođenja eksperimenata za svaki eksperiment su, korišćenjem softvera PTC Creo 2.0, pripremljeni putanja alata, STEP fajlovi priprema, obratka i alata koji su potom učitani u softver STEP-NC Machine. Softver STEP-NC Machine je iskorišćen za pripremu programa u formatu p21. Nakon simulacije i verifikacije programa na generisanom virtuelnom robotu u STEP-NC Machine softveru, izvršeno je prevođenje programa razvijenim translatorom na programski jezik robota Mitsubishi Movemaster EX, koji je potom korišćen pri isctavanju putanju na robotu.

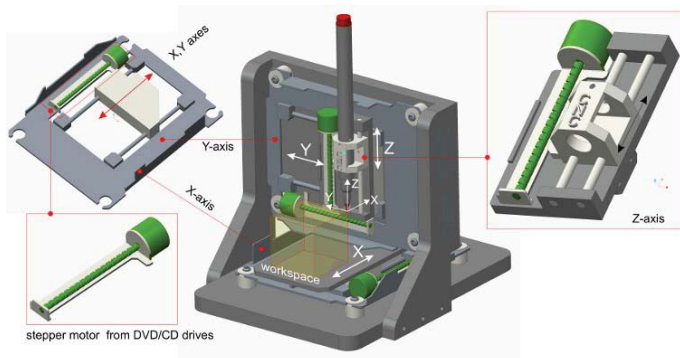
7. MINI CNC MAŠINA ALATKA SA SISTEMOM UPRAVLJANJA OTVORENE ARHITEKTURE

Ovaj odeljak se odnosi na istraživanja koja su obavljena u 2019. godini za Temu 3: Istraživanje i razvoj mini laboratorijske i edukacione troosne glodalice sa paralelnom kinematikom. U Aktivnosti 71, razmatrano je konfigurisanje i realizacija mini CNC mašine alatke sa sistemom upravljanja otvorene arhitekture.

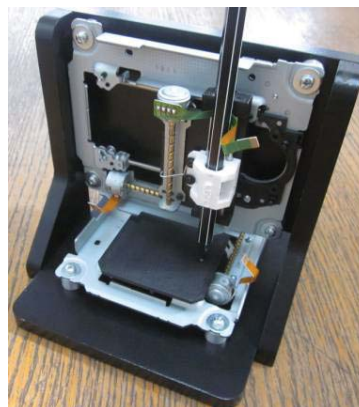
U okviru ove aktivnosti mini CNC mašina alatka je konfigurisana i napravljena od postojećih komponenata pogona DVD/CD uređaja, kao troosna mašina. Oformljeno je okruženje za njeno programiranje i simulaciju rada virtuelne mašine (u okviru aktivnosti 66), koja radi po zadatom programu u CAD/CAM okruženju. Napravljen je i prvi prototip masine za koju je realizovano upravljanje na bazi LinuxCNC sistema otvorene arhitekture i ostvaren probni eksperimentalni rad za verifikaciju upravljanja i programiranja mašine.

Konfigurisanje mašine bazirano na ideji realizacije mašine sa pogonskim osama od DVD/CD uređaja, uslovele su geometrijske i kinematičke parametre mašine, tako da ima mašina ima mali radni prostor, oblika kocke čije su dimenzije 35x35x35 mm. CAD model virtuelnog prototipa troosne mini CNC mašine alatke je pokazan na slici 7.1. Usvojena kinematička struktura mašine je X'OYZ. Po osi X' se kreće radni sto, dok se po osi Y kreće klizač koji nosi Z osu. Za usvojenu koncepciju mini CNC mašine alatke osnovni funkcionalni zahtevi za njeno konfigurisanje su: (i) niskobudžetna mini CNC mašina alatka, (ii) laboratorijska i edukaciona mašina alatka, (iii) mašina koja iscertava programiranu konturu i/ili vrši lasersko graviranje, (iv) upravljanje otvorene arhitekture, (v) programiranje mašine na uobičajeni način u G-kodu.

Fizički prototip mašine sa nosećom strukturom i povezanim komponentama svih osa je pokazan na slici 7.2. Ovako pripremljeni hardver mašine je spreman za implementaciju upravljanja, što se objašnjava u nastavku.



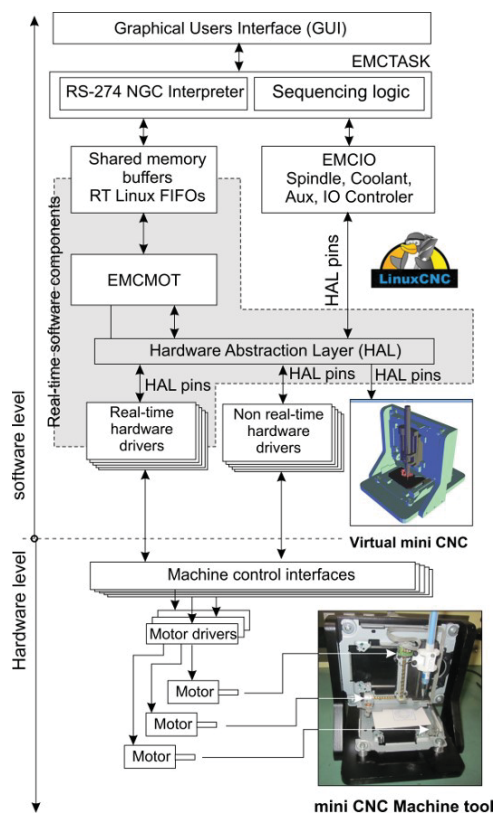
Slika 7.1 CAD model troosne mini CNC mašine alatke



Slika 7.2 Prototip troosne mini CNC mašine alatke, bez upravljanja

LinuxCNC predstavlja real-time upravljački softver otvorene arhitekture, koji se može iskoristiti za upravljanje najrazličitijih mašina alatki i robota. Obiman rad i iskustvo koji su godinama ulagani u razvoj LinuxCNC-a, u svetskim razmerama predstavljaju dobru tehnološku osnovu za implementaciju sopstvenog sistema upravljanja mašina alatki i robota. Uprošćena struktura sistema upravljanja za primer razmatrane mini CNC mašine alatke na bazi LinuxCNC sistema prikazana je na slici 7.3. Kao što se sa slike 7.3 može videti, LinuxCNC sistem sadrži četiri osnovna modula: (1) Kontroler kretanja EMCOT; (2) Kontroler ulazno/izlaznih diskretnih signala EMCIO; (3) Kontroler procesa EMCTASK i (4) Grafički korisnički interfejs GUI (Graphical User Interface).

EMCMOT je softverski modul koji radi u realnom vremenu. Zadužen je za interpolaciju programirane putanje, proračun direktne i inverzne kinematike, kao i generisanje odgovarajućih vrednosti signala koji se predaju regulatorima motora u sukcesivnim vremenskim trenucima. EMCIO modul procesira sve operacije nad periferijama koje nisu u direktnoj vezi sa motorima za pogon osa mašine. EMCTASK modul je odgovoran za interpretiranje instrukcija G-kôda i koordinaciju aktivnosti modula EMCOT i EMCIO. Ove aktivnosti su sadržane u programu obrade, odnosno nizu instrukcija G kôda, koje kontroler procesa interpretira i u odgovarajućim vremenskim trenucima prosleđuje kontroleru kretanja ili ulazno/izlaznom kontroleru diskretnih signala. Kao što se sa slike 7.3 može videti, komunikacija između modula koji rade u realnom vremenu (real-time) EMCOT modula i modula koji ne rade u realnom vremenu (non-real time) EMCTASK, se obavlja preko deljenog memorijskog bafera posredstvom RTLinux FIFO mehanizma.



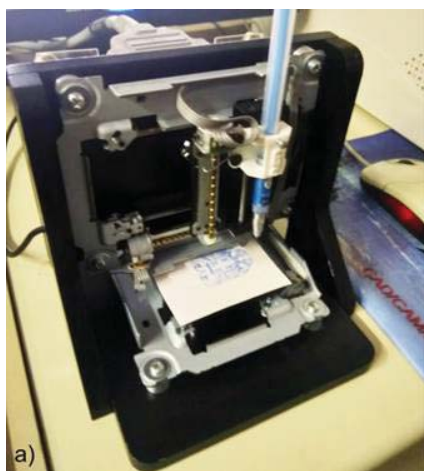
Slika 7.3 Arhitektura LinuxCNC upravljanja otvorene arhitekture za troosnu mini CNC mašinu alatku

sistema primenom raspolozivoh OpenGL-Python 3D okruženja (pokazano u aktivnosti 66).

GUI spada u eksterne programske module i predstavlja grafički korisnički interfejs za preuzimanje i pokretanje programa obrade, inicijalizaciju kao i praćenje rada mašine posredstvom grafičkog prikazaputanje alata i virtuelnog okruženja mini CNC mašine alatke. LinuxCNC na raspolaganju ima različite korisničke grafičke interfejse: TkLinuxCNC, Mini GUI, Axis GUI, GMOCCAPY GUI. Najčešće je u upotrebi Axis korisnički grafički interfejs, koji je korišćen za pokazano upravljanje mini CNC mašine alatke.

Značajan doprinos širenju i popularizaciji LinuxCNC doneo je razvoj HAL-a (Hardware Abstraction Layer) koji omogućava jednostavnu integraciju funkcija inverzne i direktne kinematike u sistem za upravljanje, kao i uniformni interfejs za povezivanje sa hardverskim i softverskim modulima sistema.

Razvoj upravljačkog sistema je obuhvatio: (1) Formiranje direktorijuma koji objedinjuje sve konfiguracione datoteke upravljačke jedinice; (2) Definisane konfiguracionih *.ini datoteka koja sadrži parametre mašine, kao sto su: opsezi kretanja radnih osa, maksimalne i radne brzine i ubrzanja za pojedine ose, parametri za rad sistema u realnom vremenu itd; (3) Definisane konfiguracionih *.hal datoteka koje sadrže elemente i parametre za vezu sa drajverima koračnih motora, odnosno sa odgovarajućim komponentama virtuelne mašine; (4) Konfigurisanje hardvera upravljačkog sistema na odabranoj računarskoj platformi koja je zasnovana na PC arhitekturi ili jednoj od kompaktnih računarskih platformi, kao što su Raspberry Pi ili BeagleBone black. Konfigurisanje virtuelne mini CNC mašine alatke u okviru LinuxCNC

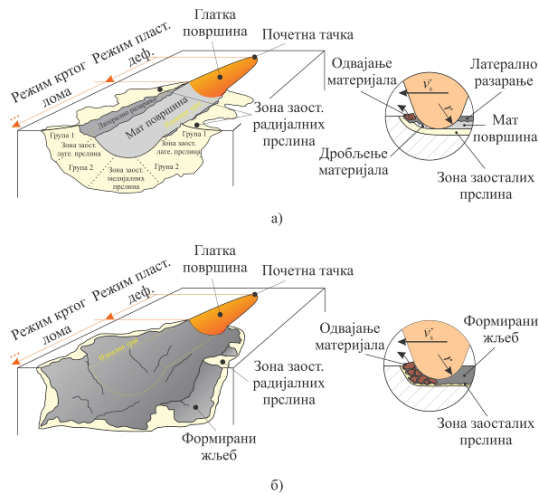


Slika 7.4 Radno okruženje i probni eksperimentalni rad

okruženje za mini CNC mašinu alatku je pokazano na slici 7.4b, dok je na slici 7.4a pokazana jedna od programiranih i iscertanih kontura. Neki od detalja prilikom probnog rada mašine su sledeći: (1) izgled nacrtane i programirane konture potvrđuju ostvareni koncept upravljanja i programiranja, (2) pozicioniranje u granicama radnog prostora je bilo dobro, (3) ostvarivanje poklapanja pozicije vrha alata (pisača) sa nultom tačkom pokazalo je dobro pozicioniranje i određivanje nulte tačke, (4) izgled nacrtanih elemenata geometrije programiranih kontura, potvrđuje ispravnost postavki referentnih tačaka na pogonskim osama i uspešan rad realizovane mašine.

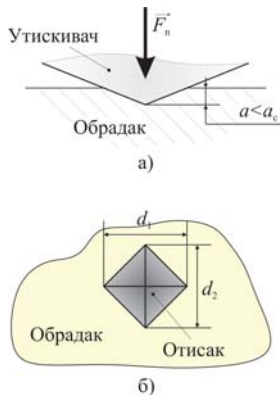
Za realizovanu mini CNC mašinu alatku posle integracije upravljanja sa hardverom mašine, usledio je njen probni rad, slika 7.4. Tokom probnog rada planirano je iscertavanje programiranih kontura. Tako je postavljeno prvo i najvažnije ispitivanje: provera da li sistem za upravljanje korektno planira putanju alata (pisača) i da li alat (pisač) zaista vodi po toj putanji. Elementi geometrije su planirani tako da se mogu nacrtati u raspoloživom radnom prostoru. Radno

8. ANALIZA INTERAKCIJE ALATA I OBRATKA PRI MIKRO REZANJU MATERIJALA NA BAZI MERMERA I GRANITA

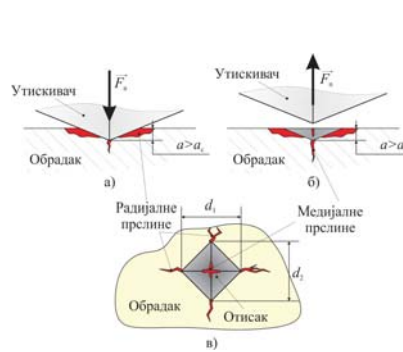


Слика 8.1 *Механизам микро резања а) мермера Плави ток и б) гранита Јошаница и Буковик*

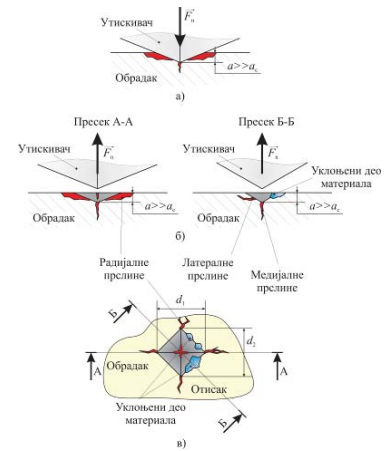
резања, међу којима су: брзина микро резања, дубина продирања алата и вредност радијуса заобљенја врха алата. Методом утискивања утискивача при статичком дејству силе утискивања, предложен је, а касније и експериментално потврђен механизам на основу којег се, са једне стране долази до формирања отиска у режиму платичног деформисања, док је са друге стране објашњен развој прслина које доводе до кртог одвајања материјала унутар материјала у режиму кртог лома.



Слика 8.2 *Фаза 1 на самом крају утискивања а) и изглед отиска након растерећења материјала б)*



Слика 8.3 *Фаза 2 на самом крају утискивања а), након растерећења материјала б) и крајњи изглед отиска утискивача в)*

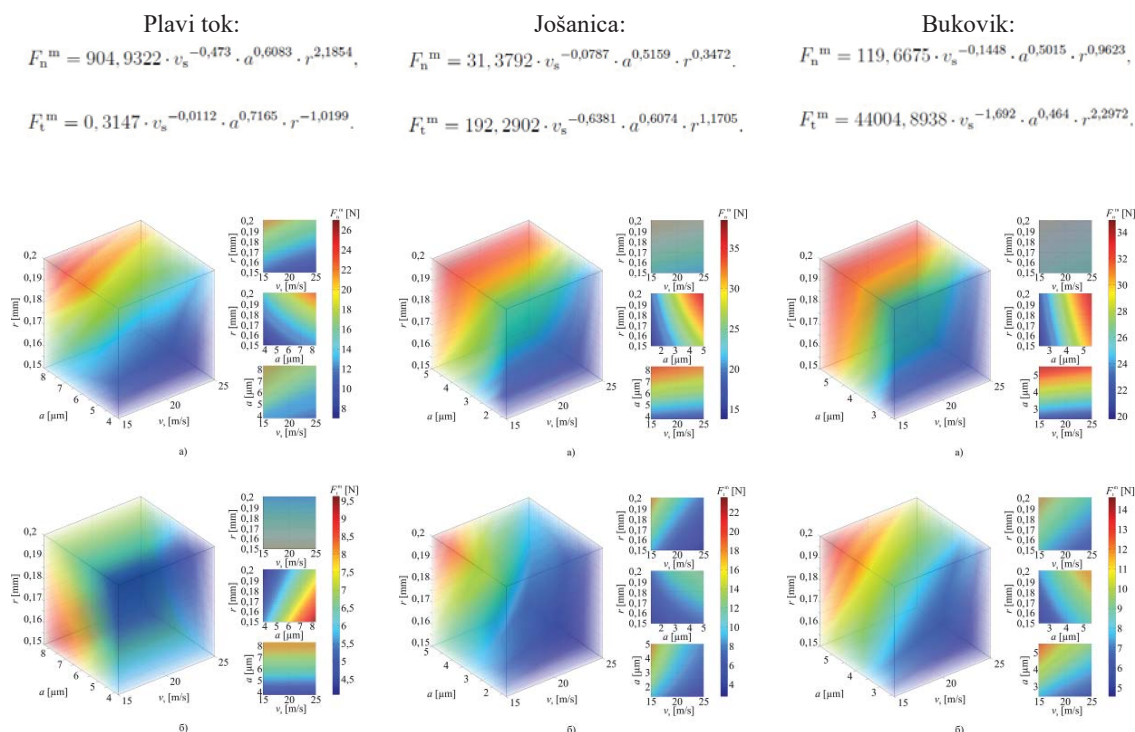


Слика 8.4 *Фаза 3 на самом крају процеса утискивања а), након растерећења материјала б) и крајњи изглед отиска утискивача в)*

Критичне вредности дубина у зависности од дејства само нормалне компоненте силе микро резања, а које раздвајају ова два режима, дефинисане су за сва три материјала. Механизам који, поред нормалне компоненте силе резања, у себи има укључен и утицај тангенијалне компоненте, предложен је у оквиру спроведених истраживања, а затим и потврђен експериментима микро резања (гребанја). Установљено је да услед промене геометрије врха дијамантског алата (вредности радијуса врха алата) долази до промене критичне вредности дубине продирања. Ово настаје као последица промене ефективне вредности грудног угла. У режиму кртог лома, интензитет разарања материјала различит је међу материјалима, а на њега додатно утичу геометрија алата и брзина микро резања. При овом режиму, мермер Плави ток се има другачији механизам уклањања материјала у поређењу са микро резањем гранита Јошаница и Буковик. Установљено је да поред геометрије врха алата и брзина микро резања утиче на вредности критичне дубине продирања, а које се разликују међу овим материјалима. Измерене су вредности интензитета компоненти сила микро резања и дате су криве које најближе

opisuju njihovu promenu u funkciji od brzine mikro rezanja, dubine prodiranja i vrednosti radijusa zaobljenja vrha alata.

Pored ovoga, određene su i krive specifične energije mikro rezanja za sva tri materijala, a u funkciji od istih parametara. Uočeno je da se najveći deo energije troši na plastično deformisanje materijala, dok, u znatno manjem procentu, deo energije odlazi na inicijalizaciju i dalji rast prslina u režimu krtoq loma. Poslednja faza istraživanja obuhvatila je formiranje matematičkog modela komponenta sile mikro rezanja određivanjem parametara obradljivosti, čije se računске vrednosti u granicama tolerancije poklapaju sa stvarnim.



Slika 8.5 Računske vrednosti komponenta sile rezanja a) F_n^m i b) F_t^m u funkciji od vrednosti brzine mikro rezanja v_s , dubine prodiranja a i radijusa zaobljenja vrha alata r , za mermer Plavi tok

Slika 8.6 Računske vrednosti komponenta sile rezanja a) F_n^m i b) F_t^m u funkciji od vrednosti brzine mikro rezanja v_s , dubine prodiranja a i radijusa zaobljenja vrha alata r , za granit Jošanica

Slika 8.7 Računske vrednosti komponenta sile rezanja a) F_n^m i b) F_t^m u funkciji od vrednosti brzine mikro rezanja v_s , dubine prodiranja a i radijusa zaobljenja vrha alata r , za granit Bukovik

9. RAZVOJ AUTONOMNOG SISTEMA ZA OPTIMIZACIJU PROCESA OBRADE GLODANJEM DELOVA SA SLOŽENIM POVRŠINAMA

Ovaj odeljak se odnosi na istraživanja koja su obavljena u 2019. godini za Temu 5: Istraživanje interakcije između reznog alata i savremenih konstrukcionih materijala na bazi prevlaka, keramike i kamena (granita i mermera). U Aktivnosti 73, razmatran je razvoj autonomnog sistema za optimizaciju procesa obrade glodanjem delova sa složenim površinama.

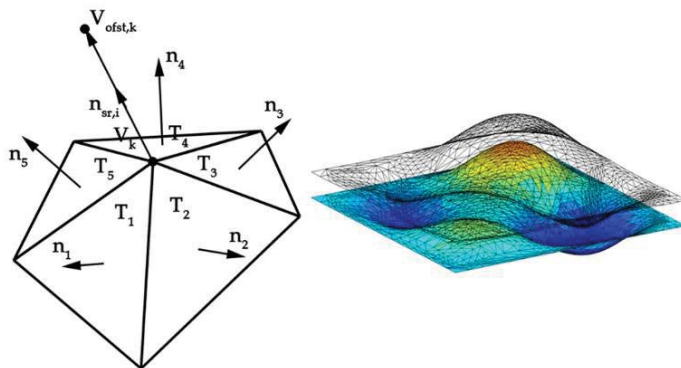
Prisutnost delova sa složenim površinama je u porastu u svim granama inženjerstva. Kako cena gotovih delova direktno zavisi od vremena obrade to je neophodno razviti nove metode za generisanje i optimizaciju procesa obrade delova sa složenim površinama. Najzastupljeniji metod obrade ovakvih delova je glodanjem loptastim glodalima na numerički upravljanim mašinama alatka. U okviru sprovedenih istraživanja aktivnosti su išle u smeru razvoja CAD/CAM sistema koji bi bio u stanju da sam odredi tehnologiju kojom bi se obrađivao konkretan deo. Istraživanjima je obuhvaćena klasa delova kod kojih je baza oblika pravougaonika ili kvadrata, a složena površina se nalazi samo sa jedne strane dela. Proces generisanja i optimizacije putanje alata se odnosi samo na proces grube obrade složene površine gde je potrebno ukloniti što što veću količinu materijala u što kraćem vremenskom roku.

Celokupna procedura generisanja i optimizacije procesa obrade započinje učitavanjem 3D CAD modela izratka i priprema. Sistem je koncipiran tako da omogućava učitavanje CAD modela u STL formatu. Nakon učitavanja CAD modela sistem iste konvertuje u interni zapis kako bi se matematičke operacije lakše i brže sprovođile i time bi sistem radio efikasnije. Kada se govori o konverziji CAD modela priprema on se u ovom slučaju konvertuje u model Z mape. Takođe se izračunavaju zapremine učitanih CAD modela priprema i izratka, a nakon toga računa njihova razlika i time se dobija vrednost zapremine koju je u procesu obrade potrebno rezanjem ukloniti. Korisnik dalje u ovoj fazi projektovanja tehnologije definiše materijal priprema, zahtevani kvalitet obrade i metod optimizacije putanje alata koji može biti jedno ili više kriterijumski.

Sledeća faza u procesu projektovanja tehnologije obrade je određivanje tačaka preseka složene površine i paralelnih ravni u odgovarajućoj rezoluciji i to u dva upravna pravca koji odgovaraju vodećim ravnima putanje alata, a sve u cilju određivanja potrebnog prečnika alata kojim će se vršiti obrada. Za svaku od presečnih ravni sistem formira interpolacione polinome koji aproksimiraju krivu koja prati skup tačaka preseka. Za tako formirane interpolacione polinome, sistem vrši izračunavanje minimalnog radijusa krivine na konveksnom delu putanje, a na osnovu toga se vrši odabir alata kojim će se vršiti obrada iz prethodno formirane baze podataka izabranog obradnog sistema. Ukoliko u bazi podataka izabranog obradnog sistema ne postoji alat kojim bi se vršila obrada sistem vrši izbor prvog približnog alata i daje odgovarajuće upozorenje da će se obradom dobiti približni oblik površine. Ukoliko korisnik sistema nije zadovoljan automatskim izborom alata u ovoj fazi projektovanja tehnologije ima mogućnost ručnog definisanja geometrije alata.

Sledeća faza u procesu projektovanja tehnologije obrade je određivanje vodećih ravni kojim je definisana putanja alata. Predviđene vodeće ravni su paralelne ravnima XZ i YZ osnovnog koordinatnog sistema. Osnovni cilj ove faze je određivanje vrednosti poprečnog i uzdužnog koraka. Vrednost poprečnog koraka se određuje na osnovu kriterijuma maksimalne dozvoljene hrapavosti obrađene površine dok se vrednost uzdužnog koraka određuje na osnovu maksimalnog dozvoljenog odstupanja složene površine.

Da bi proces više kriterijumske optimizacije koji podrazumeva i optimizaciju obrade variranjem brzine pomoćnog kretanja bio moguć, sistem u sledećoj fazi projektovanja tehnologije vrši izračunavanje dubine i širine glodanja duž putanje alata. Metod obrade variranjem brzine pomoćnog kretanja podrazumeva da se u svakoj tački putanje alata obrada vrši drugačijom brzinom pomoćnog kretanja kako bi sila glodanja imala konstantnu vrednosti i time se izbegao eventualni lom alata koji može prouzrokovati dodatne troškove ili čak nastanak škarta. U svrhu formiranja modela za predikciju sila glodanja, a koji je u sklopu modula za simulaciju procesa obrade razvijenog sistema izvršeno je eksperimentalno određivanje skupa koeficijenata rezanja za izabranu geometriju i materila alata/obratka. U ovom slučaju je vršena obrada aluminijuma AlMg4.5Mn loptastim glodalom prečnika 10, 12 i 14mm sa dva zuba, ugla nagiba zavojnice 30°, materijala HSSE 8%Co.



Slika 9.1 Osrednjavanje vektora normale i ofsetovana površina

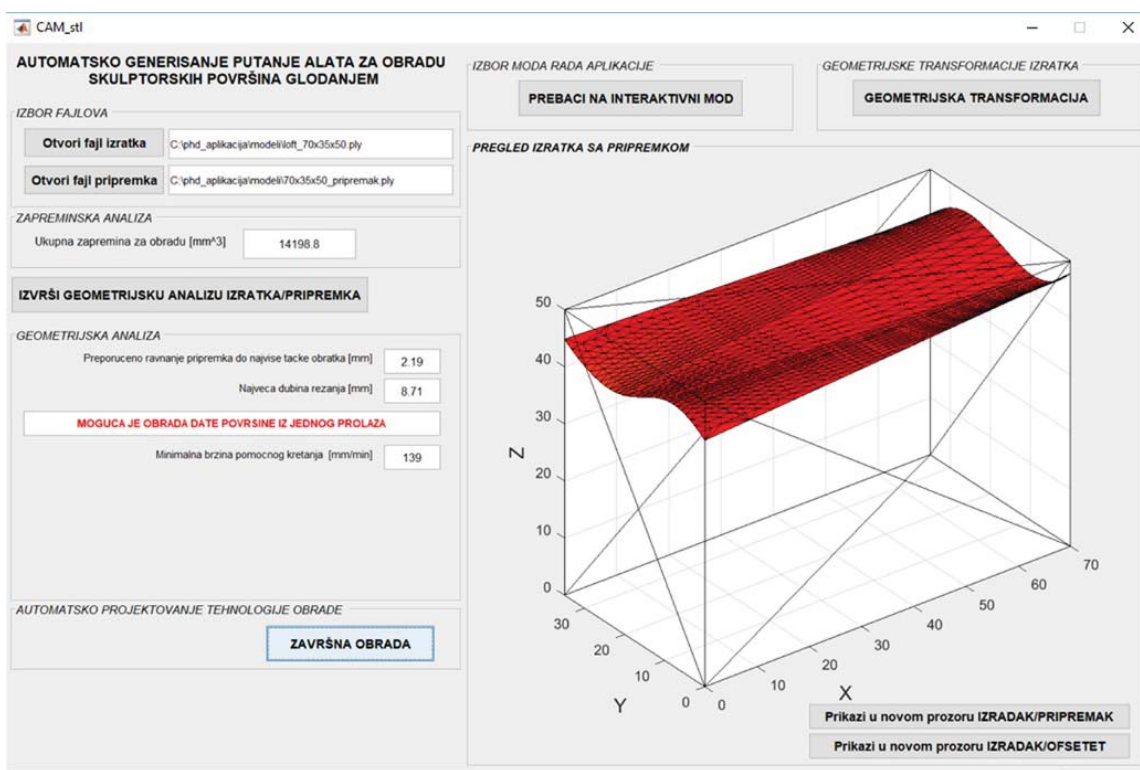
koju se ofsetuje složena površina.

Na bazi prethodno opisanih procedura sistem vrši analizu topologije putanje alata. U zavisnosti za koju se topologiju putanje alata dobija minimalno vreme obrade sistem generiše odgovarajući upravljački kod za izabranu numerički upravljaju mašinu alatku. U sistem su ugrađene sledeće topologije putanje alata: (1) obrada u jednom smeru, (2) ZIG-ZAG i (3) spiralna topologija.

Sve prethodno opisane faze, tj procedure su pomoću MatLab softverskog paketa ugrađene u jedinstveno softversko rešenje koje predstavlja CAD/CAM aplikaciju za automatsko projektovanje tehnologije obrade

Na bazi izabranog prečnika alata, sistem dalje vrši ofsetovanje složene površine u pravcu vektora normale na površinu za vrednost radijusa loptastog dela glodala. Na bazi ove generisanje ofsetovane površine sistem će kasnije odrediti tačke lokacije alata. Kako je složena površina aproksimirana skupom trouglova to jedno teme može da bude zajedničko za više trouglova. Iz tog razloga je potrebno izvršiti osrednjavanje vektora normale na složenu površinu, slika 9.1. Pored svega ovoga, omogućeno je i uključivanje vrednosti dodatka za finu obradu u vrednost za

delova sa složenim površinama glodanjem loptastim glodalom na 3-osnim numerički upravljanim mašinama alatkama, slika 9.2.

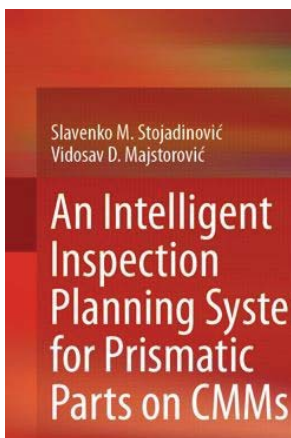


Slika 9.2 Razvijeno softversko rešenje

Eksperimentalna verifikacija razvijenog softverskog rešenja je sprovedena obradom delova na obradnom centru na bazi generisanih upravljačkih kodova pomoću razvijene aplikacije. Nakon obrade vršeno je merenje geometrije izrađenih delova na numerički upravljanoj mernoj mašini čime je verifikovano da je obrada izvedena u zadatim tolerancijama i predviđenom kvalitetu obrađene površine.

10. VERIFIKACIJA MERNE PUTANJE PRI INSPEKCIJI PRIZMATIČNIH DELOVA NA NUMM BAZIRANA NA MODIFIKOVANOM HEMERSLEJEVOM ALGORITMU

Ovaj odeljak se odnosi na istraživanja koja su obavljena u 2019. godini za Temu 6: Digitalna kompanija/kvalitet. U Aktivnosti 74, verifikovana je merna putanja pri inspekciji prizmatičnih delova na NUMM bazirana na modifikovanom Hemerslejevom algoritmu.



Slika 10.1 Monografija
izdanja su sledeće:

Nakon aktivnosti sprovedenih u prethodnoj istraživačkoj 2018. godini, a koje su se odnosile na razvoj metodologije konfigurisanja mernih senzora pri inspekciji prizmatičnih delova na NUMM u okviru digitalne kompanije/kvaliteta, a kojima je prethodio razvoj novog modela generisanja putanje mernog senzora pri planiranju putanje na mernoj mašini i razvoja metode za optimizaciju merne putanje primenom optimizacionog algoritma na bazi kolonije mrava logičan nastavak je i nova aktivnost tj. verifikacija merne putanje pri inspekciji prizmatičnih delova na NUMM bazirana na modifikovanom Hemerslejevom algoritmu. Sve ove tri aktivnosti, kao i aktivnosti sprovedene u prethodnim istraživačkim temama (godinama) su objedinjene u 2019. godini i objavljene u međunarodnoj monografiji (slika 10.1) pod naslovom: An Intelligent Inspection Planning System for Prismatic Parts on CMMs, autora doc. dr Slavenka Stojadinovića i prof. dr Vidosava Majstorovića u izdanju renomiranog svetskog izdavača poznatog u naučnoj i stručnoj javnosti pod nazivom Springer International Publishing (nosilac: Springer Nature Switzerland AG). Bibliografske informacije

- elek. adresa stranica izdavača:
<https://www.springer.com/gp/book/9783030128067>
- godina izdanja: 2019.
- ISBN elektronskog izdanja: 978-3-030-12807-4
- ISBN štampanog izdanja - meki povež: 978-3-030-12809-8
- ISBN štampanog izdanja - tvrdi povež: 978-3-030-12806-7
- DOI: 10.1007/978-3-030-12807-4
- broj stranica: 139
- broj poglavlja: 6
- broj izdanja: 1.

Ukratko, predmet istraživanja u objavljenoj međunarodnoj monografiji je inteligentni sistem za planiranje inspekcije prizmatičnih delova na numerički upravljanim mernim mašina. Istraživanja su nova i sprovedena kroz razvoj četiri glavne celine: (1) inženjerska ontologija i ontološka baza znanja za klasifikaciju, ponovnu upotrebu i deljenje znanja u oblasti metrologije, (2) model planiranja inspekcije prizmatičnih delova na NUMM, koji se sastoji iz: definisanja metoloških primitiva, matematičkog modela distribucije mernih i čvornih tačaka, analize pristupačnosti mernog senzora, principa izbegavanja kolizije i automatskog generisanja merne putanje, (3) model optimizacije merne putanje primenom optimizacionog algoritma na bazi kolonije mrava, (4) modela postavljanja prizmatičnih mernih delova i konfigurisanja mernih senzora primenom genetskih algoritama. Naučno delo je potvrđeno u praksi kroz izvršen eksperiment za dva dela koja su obrađena (proizvedena) u svrhe ovog istraživanja. Rezultati inspekcije su potvrdili teorijske pretpostavke tj. pokazuju da su sva odstupanja za oba dela u unapred propisanim granicama. Dobijena optimizovana putanja se poredi sa mernom putanjom dobijenom pri *on-line* programiranju merenja na NUMM i sa mernom putanjom dobijenom u modulu za merne mašine u komercijalnom softveru PTC Creo (raniji naziv Pro/Engineer). Rezultati poređenja pokazuju da je optimizovana putanja, razvijena i implementirana u ovom naučnom delu, najmanje 20% kraća od putanje dobijene pogonskim programiranjem (*on-line*) NUMM i najmanje 10% kraća od putanje dobijene generisanje pomoću modula za merne mašine u softveru PTC Creo (PRO/Engineer).

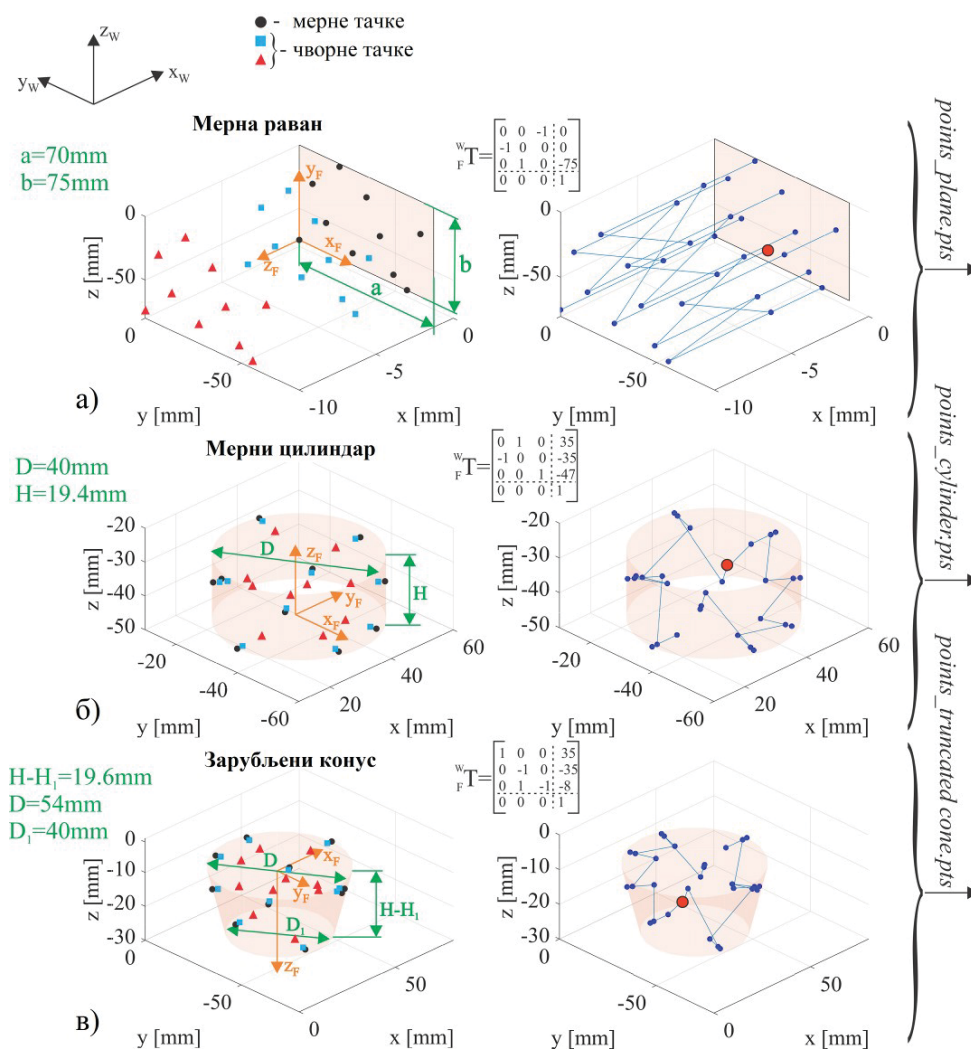
Numerički upravljane merne mašine (NUMM) su prepoznate kao fleksibilni element proizvodne metrologije, i kao takve primenljive su za širok spektar metroloških zadataka. Sa druge strane, metrološki zadaci zavise od geometrijske i metrološke kompleksnosti mernih delova i vrlo je važno da se verifikuje merna putanja pre izvršenja procesa merenja na NUMM.

Verifikacija merne putanje za planiranje inspekcije na NUMM ima za cilj vizuelnu proveru kolizije između mernog senzora, mernog predmeta i pomoćnog pribora. Predložena verifikacija je realizovana na konfigurisanoj virtuelnoj NUMM u CAD/CAM okruženju. Polazi od modeliranja mernog predmeta u odgovarajućem CAD sistemu, a potom generisanja merne putanje za planiranje inspekcije uz pomoć modifikovanog Hemerslejevog algoritma koji putanju definiše uz pomoć tri skupa tačaka. Prvi skup tačaka su merne tačke, drugi skup predstavljaju čvorne tačke i treći skup tačaka su tačke za izbegavanje kolizije. Koordinate ovih tačaka su definisane u prethodnim, a verifikovane u ovoj aktivnosti. Potom je izvršeno sortiranje (klasifikacija po pravilnom redosledu) tačaka u MatLab okruženju u svrhe generisanja point-to-point merne putanje. Sledeći korak je simulacija putanje na virtuelnoj NUMM u CAD/CAM sistemu za šta je prethodno potrebno, kao što je rečeno, modeliranje mernog dela, potom učitavanje point-to-point merne putanje, modeliranje komponenti NUMM koje obuhvata i definisanje kinematskih veza između njih i podešavanje koordinatnih sistema. Zajedno sa uvozom pomoćnog pribora i mernog predmeta u softver i podešavanjem mernih parametara kreira se virtuelni merni sistem i virtuelna NUMM. Izlaz iz virtuelnog mernog sistema je CL datoteka (DMIS program).

Koncept verifikacije potvrđen je kroz nekoliko primera generisanih mernih putanja za odabrane primitive koji učestvuju u kreiranju tolerancija za posebno dizajniran prizmatičan merni deo dat na slici u nastavku (slika 10.3 pod v)). Za metrološke primitive su odabrani ravan (slika 10.2 pod a)), cilindar (slika 10.2 pod b)) i zarubljeni konus (slika 10.2 pod v)). Crnom bojom su pokazane merne tačke, dok su plavom i crvenom bojom pokazane čvorne tačke merne putanje. Za jedan trenutni položaj u procesu simulacije na slici 10.2, plavom bojom je pokazana merna putanja sa mernim pipkom uprošćeno predstavljenim u obliku kruga ispunjenog crvenom bojom. Vizuelizacija je izvršena u softveru MatLab i na izlazu generiše sekvence putanje po primitivima. U ovom slučaju su to prema slici 10.2 *points_plane.pts*, *points_cylinder.pts* i *points_truncated_cone.pts*.

Simulacija putanje na virtualnoj NUMM zasniva se na generisanju point-to-point merne putanje kao jedinstvene sekvence u formatu (datoteci) pogodnom za učitavanje u CAD/CAM sistem. Merna putanja koja se simulira na virtuelnoj NUMM je najkraća moguća (optimizovana) i sa stanovišta troškova

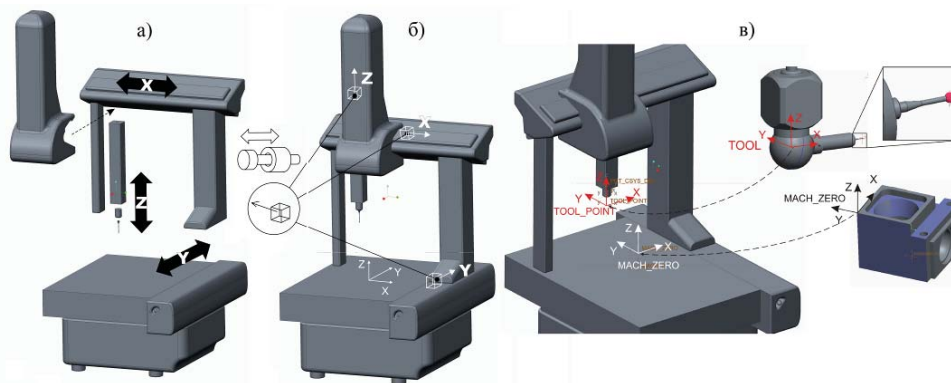
najekonomičnija, kao i najsigurnija zbog izbegavanja kolizije. Za programiranje merne putanje koristi se CMM podmodul, modula za CAD/CAM u okviru softvera PTC Creo.



Slika 10.2 Vizuelizacija merne putanje u MatLab okruženju za primitive: a) ravan, b) cilindar i, v) zarubljeni konus

Za generisanje merne putanje u CMM podmodulu CAD/CAM sistema kao što je PTC Creo, potrebno je realizovati nekoliko aktivnosti: (1) učitavanje referentnog CAD modela mernog dela za inspekciju, (2) modeliranje komponenti i sklopa NUMM, (3) definisanje mernih operacija i odabir koordinatnih sistema, (4) konfigurisanje mernih senzora, (5) izbor primitiva za inspekciju u skladu sa zadatim tolerancijama, (6) podešavanje mernih parametara, (7) uvoz mernih tačaka, dat kao rezultat izlaza MatLab koda za vizuelizaciju za primitive koji se mere, (8) generisanje merne putanje za sve metrološke primitive; (9) simulacija merne putanje, uključujući i senzor, i (10) simulacija merne putanje na konfigurisanoj virtualnoj NUMM, koristeći opciju Machine Play Option.

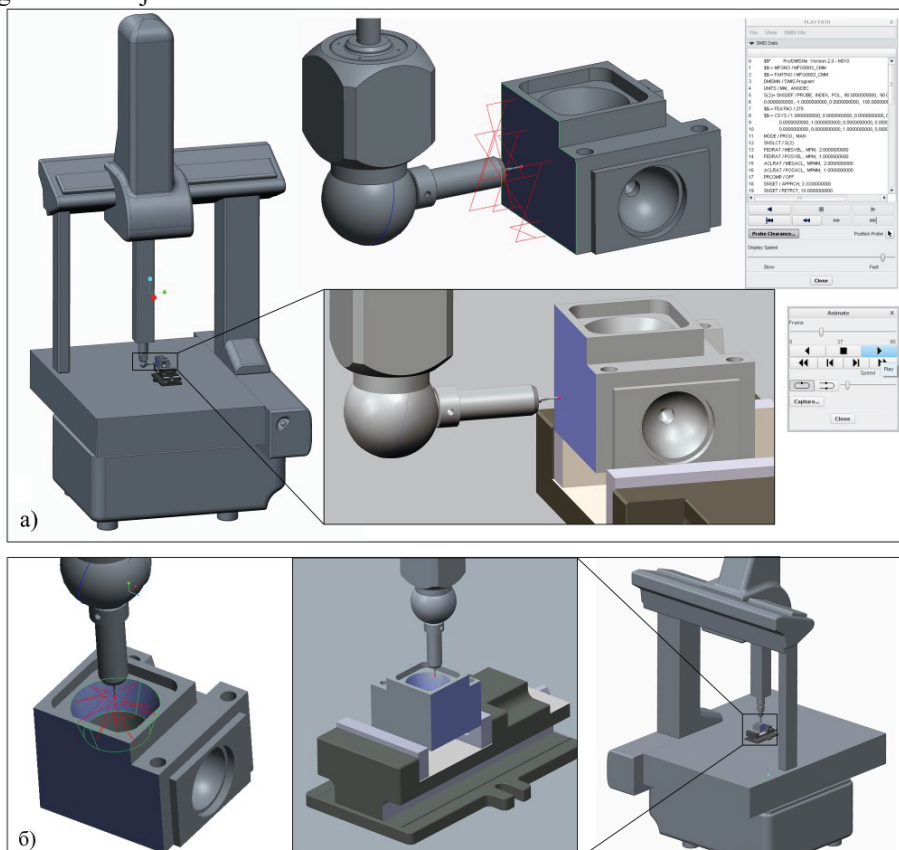
Na osnovu prethodnih istraživanja i rezultata u konfigurisanju virtuelnih mašina alatki i robota, što je u okviru projekta dato u ranijim istraživanjima i aktivnostima, konfigurirše se i virtuelna NUMM u ovoj aktivnosti. Osnovna namena konfigurisane virtualne NUMM je provera programirane merne putanje u CAD/CAM okruženju na bazi putanje dobijene modifikovanim Hemerslejevim algoritmom i vizuelizacijom u MatLab softveru, kao i generisanje izlazne datoteke pogodne za dalju obradu i postprocesiranje. Simulacija merne putanje je sprovedena u cilju: (1) konfigurisanja off-line NUMM okruženja za programiranje, (2) verifikaciju programa pre procesa merenja, i (3) izbegavanje kolizije mernog senzora sa pomoćnim priborom i mernim delom. Detaljan prikaz virtuelne NUMM u softveru PTC Creo, sa osnovnim komponentama, sklopom i kinematskim vezama između pokretnih i nepokretnih komponenti je prikazano na slici 10.3. Pokretne veze (klizači) se koristi za sva translatorna kretanja (X, Y, Z). One omogućavaju kretanje komponenti NUMM u dozvoljenim granicama za svaku osu i ostvaruju programiranu putanju mernog pipka kao završnog uređaja.



Slika 10.3 CAD model NUMM za simulaciju merne putanje: a) osnovne komponente NUMM, b) sklop merne mašine sa tipovima kinematskih veza, v) koordinatni sistemi mernog predmeta i senzora

Kao što se može videti na slici 9.3 neophodno je definisati koordinatne sisteme: (i) radnog stola, obeleženog sa MACH_ZERO, (ii) mernog dela, obeleženog sa MACH_ZERO, (iii) nosača senzora, obeleženog sa TOOL_POINT, čije ose zauzimaju isti pravac i orijentaciju kao i ose koordinatnog sistema mernog predmeta, i (iv) mernog pipka, obeleženog sa TOOL, ukoliko je neophodno kreirati naknadno modeliran merni pipak. Poklapanjem koordinatnog sistema MACH_ZERO mernog dela i koordinatnog sistema MACH_ZERO radnog stola omogućava se postavljanje mernog dela na sto konfigurisane virtuelne merne mašine tokom simulacije. Ista procedura je i za podešavanje koordinatnih sistema TOOL i TOOL_POINT za podešavanje pipka u nosaču mernog senzora.

Za vreme simulacije merne putanje na virtuelnoj NUMM, slika 10.4, za ostvarivanje zadate putanje pored mernog predmeta i mernog senzora koristi se i pomoćni pribor. Pribor se može modelirati iznova (nestandardni pribor) ili učitati kao postojeći (standardni pribor), a od velikog značaja je za verifikaciju merne putanje sa stanovišta kolizije i tokom izvođenja programa. Nakon simulacije na virtualnoj NUMM, verifikovana je merna putanja i snimljena u CL datoteku (DMIS program) za dalju distribuciju u svrhe izvršenja programa merenja na realnim NUMM.



Slika 10.4 Simulacija merna putanja na virtuelnoj NUMM u CAD/CAM okruženju: a) ravna površina sa delom DMIS programa, i b) zarubljeni konus sa prikazom stezanja u pomoćnom priboru

Sumarno, u ovoj aktivnosti verifikovana je merna putanja, na bazi modifikovanog Hemerslejevog algoritma za distribuciju mernih tačaka za osnovne geometrijske primitive. Najpre se merna putanja vizualizuje u MatLab softveru, a zatim simulira u CMM modulu PTC Creo softvera. Simulacija merne putanje realizovana je na konfigurisanoj virtuelnoj NUMM u CAD/CAM okruženju. Izlaz iz simulacije na virtualnoj NUMM je CL datoteka (DMIS program). Generisanjem ove datoteke i razvojem odgovarajućeg postprocesora ostavlja se mogućnost kreiranja liste upravljačkih podataka za različite NUMM. Imajući u vidu da se NUMM programiraju u jeziku svog proizvođača, predloženi koncept simulacije i njegov izlaz (datoteka) mogao bi biti koristan u smislu formata unifikacije softvera za programiranje NUMM različitih proizvođača.

11. ZAKLJUČAK

Osnovni cilj ovih istraživanja je ojačavanje tehnologija u domaćim malim i srednjim preduzećima, radi podizanja konkurentnosti privrede Republike Srbije. Ovim preglednim radom pokazani su ostvareni rezultati istraživanja u 2019. godini, kao završnoj devetoj godini istraživanja.

Ciljevi ovog projekta su bili pojedinačni doprinosi razvoju domaće industrije: (1) razvoj novih domaćih obradnih sistema za izradu složenih proizvoda i za obradu složenih delova niže klase tačnosti, (2) znanja o višeosnim obradnim sistemima i o objektnom programiranju tih sistema, (3) razvoj domaćih mini obradnih sistema sa paralelnom kinematikom, (4) razvoj domaćih sistema za pakovanje i montažu na bazi robota sa paralelnom kinematikom, (5) povećavanje proizvodnosti i bolje energetske dejstvo alata na obradak i maksimalno iskorišćenje sistema mašina alatka-obradak-alat, obradom bez ekoloških posledica i (6) povećanje agilnosti i fleksibilnosti domaćih kompanija u pogledu kvaliteta na osnovu kreiranog digitalnog modela kvaliteta, zasnovanog na ontološkom modelu.

Značaj istraživanja u ovom projektu je u razvoju i implementaciji jedne strategije bazirane na istraživanju i inoviranju radi ubrzanja reinženjeringa industrije putem uvođenja nove generacije obradnih sistema. Ostvareni rezultati u devetoj godini istraživanja koji su prezentovani u časopisima sa SCI liste, vodećim nacionalnim časopisima, međunarodnom monografijom, međunarodnim i domaćim konferencijama, daju nam za pravo da smatramo izvedena istraživanja veoma uspešnim i da ona predstavljaju osnovu za dalje aktivnosti tokom nastavka realizacije budućih projekata.

12. IZJAVA ZAHVALNOSTI

Predstavljeni rezultati istraživanja su nastali tokom realizacije projekta, koji je podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Vlade Republike Srbije, po Ugovoru 451-03-68/2020-14/200105.

13. LITERATURA

Ovo je spisak literature koja predstavlja ostvarene rezultate u devetoj godini istraživanja koji su prezentovani u časopisima sa SCI liste, vodećim nacionalnim časopisima, međunarodnoj monografiji, međunarodnim i domaćim konferencijama, i koja je korišćena za sastavljanje ovog preglednog rada.

- [1] Pjevic, M., Stojadinović, S., Tanović, Lj., Popović, M., Mladenović, G., Puzović, R.: *Determination of the Optimal Regression Model for the Measurement Quality Characteristics of the Micro Cutting Stone-Based Materials*, Proceedings of the 12th International Conference on Measurement and Quality Control - Cyber Physical Issue, pp.185 - 200, 2019.
- [2] Stojadinovic, S., Zivanovic, S., Slavkovic, N.: *Verification of the CMM Measuring Path Based on the Modified Hammersly's Algorithm*, Proceedings of the 12th International Conference on Measurement and Quality Control - Cyber Physical Issue, pp. 25 - 38, 2019.
- [3] Mladenovic, G., Milovanovic, M., Tanovic, Lj., Puzovic, R., Pjevic, M., Popovic, M., Stojadinovic, S.: *Development of application software for automatic manufacturing technology design of free form surfaces*, 3rd International Conference of Experimental and Numerical Investigations and New Technologies – CNN TECH 2019, pp. 65 - 65, Zlatibor, Jul 2019.
- [4] Vasilic, G., Zivanovic, S., Kokotovic, B., Dimic, Z.: *Configuring and analysis of a class of generalized reconfigurable 2-axis parallel kinematic machine*, Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 33, No.7, pp. 3407 - 3421, 2019.
- [5] Pjević M., Popović M., Tanović Lj.: *Determination of the mathematical model of the micro cutting force for the granite jošanica in the ductile mode*, XX International Scientific and Technical Conference "Progressive

- Engineering, Technology and Engineering Education", pp. 210 - 212, Kyiv - Kherson, Ukraine, Sep, 2019.
- [6] Slavkovic, N., Zivanovic, S. Milutinovic, D.: *An indirect method of industrial robot programming for machining tasks based on STEP-NC*, International journal of computer integrated manufacturing, Vol.32, No.1, pp. 43 - 57, 2019.
- [7] Živanović, S., Dimić, Z.: *Virtuelna petoosna mašina alatka integrisana sa sistemom programiranja i upravljanja*, Tehnika – Mašinstvo, Savez inženjera i tehničara Srbije, Beograd, Vol. 68, No.3, pp. 397 - 404, 2019.
- [8] Zivanovic, S. Dimic, Z., Vorkapic, N., Mitrovic, S.: *Configuring of 3 axis mini CNC machine tool with control system based on LINUXCNC*, 14th International Conference on Accomplishments in Mechanical and Industrial Engineering DEMI 2019, pp. 15 - 28, Banjaluka, May 2019.
- [9] Toquica, JS., Zivanovic, S., Bonnard, R., Rodriguez, E., Alvares, AJ., Ferreira, JCE.: *STEP- NC based machining architecture applied to industrial robots*, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Vol.41, pp. 314.1 - 314.18, 2019.
- [10] Popović, M., Pjević, M., Mladenović, G., Tanović, Lj., Milošević, M., Milovanović, A., Milošević, N., *Experimental Determination of Type of Fracture PLA Specimens in the Function of Printing Conditions*, International Conference of Experimental and Numerical Investigations and New Technologies - CNN Tech 2019, pp. 42 - 42, Zlatibor, Srbija, 2019.
- [11] Živanović, S., Vorkapić, N., Dimić, Z.: *Konfigurisanje sistema za programiranje i upravljanje 3-osne mini CNC mašine alatke na Raspberry Pi platformi*, Tehnika – Mašinstvo, Savez inženjera i tehničara Srbije, Beograd, Vol.68, No.6, pp. 823 - 831, 2019.
- [12] Pjević, M.: *Istraživanje uticaja radijusa zaobljenja vrha alata i brzine rezanja na pokazatelje kvaliteta pri mikro rezanju materijala na bazi mermera i granita*, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 2019.
- [13] Mladenovic, G., Milovanovic, M., Tanovic, Lj., Puzovic, R., Pjevic, M., Popovic, M., Stojadinovic, S.: *The Development of CAD/CAM System for Automatic Manufacturing Technology Design for Part with Free Form Surfaces*, Computational and Experimental Approaches in Materials Science and Engineering within Series Title Lecture Notes in Networks and Systems, 90, pp. 460 - 476, 2019.
- [14] Stojadinovic, S., Majstorovic, V.: *An Intelligent Inspection Planning System for Prismatic Parts on CMMs*, Springer International Publishing, Switzerland, 2019.
- [15] Kokotovic, B., Vorkapic, N.: *Feedrate Optimization for 2.5D Milling Operations*, FME Transactions, Vol. 47, No. 3, pp. 613 - 623, 2019.
- [16] Majstorovic, V., Durakbasa, N., Takaya, Y., Stojadinovic, S.: *Advanced Manufacturing Metrology in Context of Industry 4.0 Model*, Proceedings of the 12th International Conference on Measurement and Quality Control - Cyber Physical Issue, pp. 1 - 11, 2019.
- [17] Zivanovic, S., Tabakovic, S., Randjelovic, S.: *Rapid Prototyping of Art Sculptural Shapes According to the Sample*, Journal for Technology of Plasticity, Fakultet tehničkih nauka, Vol. 44, No.1, pp. 27 - 32, 2019.

Lj. Tanović, S. Živanović, R. Puzović, B. Kokotović, M. Popović, N. Slavković,
G. Mladenović, S. Stojadinović, M. Pjević, N. Vorkapić

The development of a new generation of domestic machining systems The results of research activities in 2019.

Abstract

The subject of research activities is a new generation of domestic machining systems, together with manufacturing technologies that are needed for development of these machining systems and for their undisturbed functioning. The key research areas in these technologies are machine tools, robots, tools, manufacturing processes and digital quality. The research activities are focused to the open architecture technologies regarding the control systems and programming, but regarding the structures of these systems, up to date research in these areas is followed. In this way we provide the flexibility of manufacturing resources and agility of the company for which these new manufacturing systems together with accompanying technologies are developed. In this paper we give a review of the research results in 2019. that round out this nine-year project cycle.

Key words: *machining system, technologies, machine tool, machining by robot, microcutting, digital quality*