



Lj. Tanović, P. Bojanić, M. Glavonjić, D. Milutinović, V. Majstorović, R. Puzović,
B. Kokotović, M. Popović, S. Živanović, N. Slavković, G. Mladenović, S. Stojadinović¹

RAZVOJ NOVE GENERACIJE DOMAĆIH OBRADNIH SISTEMA² REZULTATI ISTRAŽIVANJA ZA 2011. 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 2011. godinu.

Ključne reči: obradni sistem, tehnologije, mašina alatka, obrada robotom, DELTA robot, 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 predmeta istraživanja za ključnu oblast *mašine* (mašine alatke i robote), za *tehnologije* (alate i tehnološke procese) i *kvalitet* (digitalnu kompaniju i digitalni kvalitet).

Mašine. Specifičnost mašina alatki i robota nove generacije je dvostruka: omogućavaju fleksibilnu proizvodnju zasnovanu na znanju, a i sami su kompleksni sistemi zasnovani na znanju. Istraživanja u oblasti mašina alatki i robota nove generacije odnose se na razvoj ovih sistema u domenu serijskih i u domenu paralelnih struktura. U domenu serijske i hibridne kinematike istražuje se razvoj višeosnih mašina alatki i robota za višeosnu obradu rezanjem. Osvajanje tehnologije višeosne obrade glodanjem složenih estetskih i funkcionalnih površina danas je još uvek veoma izazovan istraživački zadatak, kako u pogledu razvoja novih mašina i robota, tako i u razvoju sistema za upravljanje i programiranje. I u domenu paralelne kinematike istražuju se mašine alatke i roboti, koji se danas mogu eksplicitno smatrati mašinama nove generacije, jer predstavljaju najznačajniji pomak u ovoj oblasti od pojave numeričkog upravljanja. Istražuju se i razvijaju jedna specifična kompleksna petoosna mašina alatka sa hibridnom kinematikom, jedna troosna glodalica sa paralelnom kinematikom i jedan specifičan robot sa paralelnom kinematikom.

Tehnologije. Istraživanjima u domenu reznih alata ide se u ova dva pravca: (1) razvoj novih konstrukcija, koji obuhvata nove oblike, novu geometriju i koncept modularnog sistema projektovanja i (2) razvoj i primena novih alatnih materijala, prevashodno na bazi sintetičkih dijamanta i kubnog bornitrida. U procesu transformacije polaznog materijala, ili pripremake, u gotove proizvode, u pogonima metaloprerađivačke industrije koriste se metali i nove sorte prevlaka, kao i nemetali na bazi keramike i kamena, tipa mermera i granita. Analizira se i interakcija mašine i procesa u obradnom sistemu za objašnjavanje fenomena koji se javljaju u procesima obrade novih materijala. Najvažnija mera te interakcije su sile rezanja. Posebno se

¹ Prof dr Ljubodrag Tanović, ltanovic@mas.bg.ac.rs, Prof dr Pavao Bojanić, pbojanic@mas.bg.ac.rs, Prof dr Miloš Glavonjić, mglavonjic@mas.bg.ac.rs, Prof dr Dragan Milutinović, dmilutinovic@mas.bg.ac.rs, Prof dr Vidosav Majstorović, vmajstorovic@mas.bg.ac.rs, Prof dr Radovan Puzović, rpuzovic@mas.bg.ac.rs, mr Branko Kokotović, bkokotovic@mas.bg.ac.rs, mr Mihajlo Popović, mpopovic@mas.bg.ac.rs, doc dr Saša Živanović, szivanovic@mas.bg.ac.rs, Nikola Slavković, dipl.mas.inž, nslavkovic@mas.bg.ac.rs, Goran Mladenović, dipl. maš.inž, gmladenovic@mas.bg.ac.rs, Slavenko Stojadinović, dipl. maš.inž., sstojadinovic@mas.bg.ac.rs, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

² Rezultati istraživanja na projektu TR35022 Razvoj nove generacije domaćih obradnih sistema, za 2011. godinu

istražuje proces brušenja odabranih specifičnih nemetalnih materijala do dobijanja adekvatnih modela. Ti modeli se potom mogu koristiti i kao paradigma virtuelne proizvodnje, a onda i digitalne fabrike.

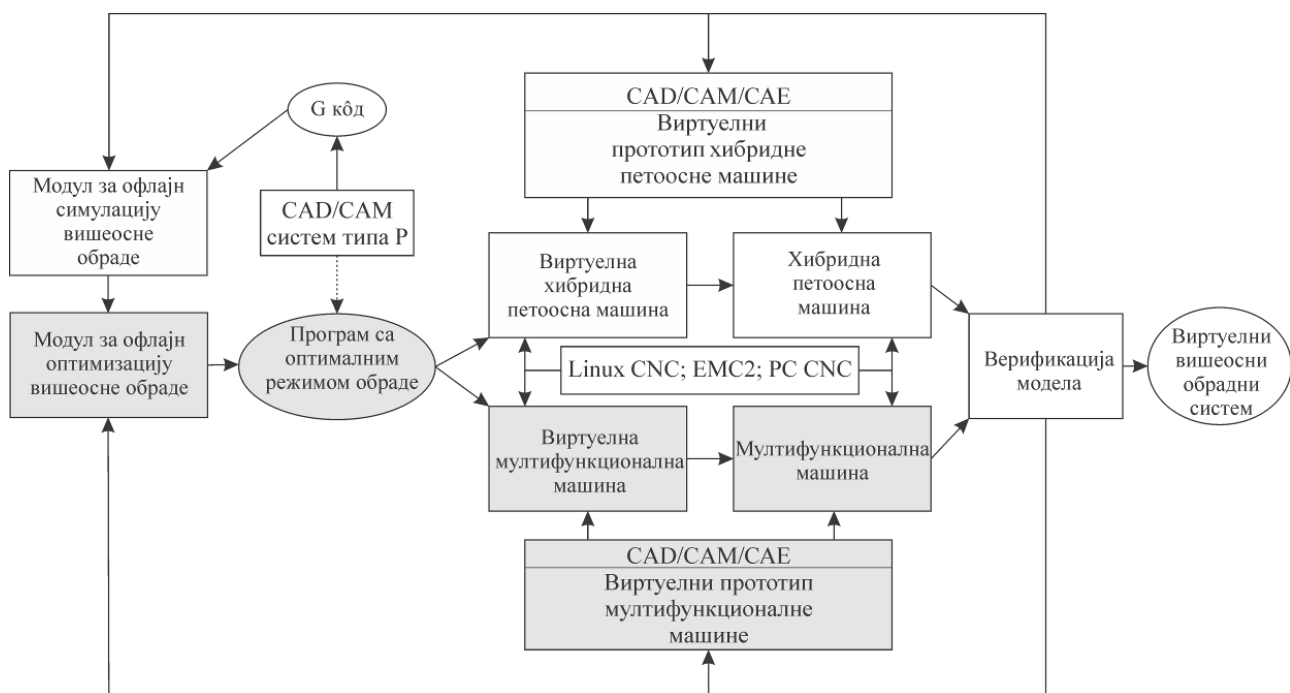
Kvalitet. Digitalni kvalitet obuhvata virtuelnu simulaciju i inspekciju kompleksne metrologije u digitalnoj kompaniji. Razvoj sistema digitalnog kvaliteta, zasnovanog na znanju, baziran je na konceptu ontologije. Predmet ovog istraživanja je digitalna kompanija, koja integriše generisanje, memorisanje i isporuku svih relevantnih podataka o proizvodu i procesu u njegovom životnom veku - od najranijeg planiranja do proizvodnje za pojedinačnog kupca. Koncept digitalne kompanije podržava model kooperativnog inženjerstva, koje se razvilo iz modela simultanog inženjerstva, pa omogućava umrežavanje tehnoloških resursa nove generacije, koji se, kao *mašine* i kao *tehnologije* istražuju i razvijaju u ovom projektu.

Sadržaj istraživanja. Projekat se realizuje kroz ovih šest tema: **Tema 1:** Multifunkcionalna mašina alatka. Istraživanje obuhvata: (1)koncipiranje multifunkcionalne petoosne rekonfigurabilne stone mašine alatke, (2)projektovanje i izradu mašine, (3)konfigurisanje i izradu sistema za upravljanje i programiranje i (4)probni rad. **Tema 2:** Virtuelna proizvodnja i obrada robotima. Istraživanje obuhvata: (1)razvoj modula za off-line simulaciju višeosne obrade, (2)razvoj modula za off-line optimizaciju višeosne obrade, (3)modeliranje statičke popustljivosti robota za obradu, (4)modeliranje struktura obradnog sistema za višeosnu obradu na bazi robota i (5)eksperimentalnu identifikaciju parametara u cilju analize popustljivosti i ponašanja robota u procesu višeosne obrade glodanjem. **Tema 3:** Istraživanje i razvoj mini laboratorijske i edukacione stone troosne glodalice sa paralelnom kinematikom. Istraživanje obuhvata: (1)kinematičko modeliranje, (2)razvoj sistema upravljanja otvorene arhitekture na PC platformi, (3)konfigurisanje virtuelne mašine za simulaciju i verifikaciju upravljanja i programiranja, (4)definisanje projektnih parametara i projektovanje mašine i (5)razvoj prototipa. **Tema 4:** Istraživanje i razvoj prototipa paralelnog DELTA robota za pakovanje proizvoda konditorske i farmaceutske industrije i montažu u mikroelektronici. Istraživanje obuhvata: (1)analizu paralelnih mehanizama tipa DELTA, (2)kinematičko modeliranje, (3)statičku i dinamičku analizu i razvoj simulacionih i upravljačkih algoritama i (4)projektovanje i razvoj prototipa DELTA robota. **Tema 5:** Istraživanje interakcije između reznog alata i savremenih konstrukcionih materijala na bazi prevlaka, keramike i kamena (granita i mermera). Istraživanje obuhvata: (1)izradu stenda za izvođenje procesa mikrorezanja, (2)određivanje relevantnih fizičko-mehaničkih svojstava ispitivanih materijala, (3)brzu izradu etalon alata na modularnom principu i (4)primenu CAD/CAM sistema u brzjoj izradi alata. **Tema 6:** Digitalna kompanija/kvalitet-ontološki prilaz. Istraživanje obuhvata: (1)modeliranje i razvoj koncepta upravljanja lancima snabdevanja u digitalnoj kompaniji, (2)savremene pristupe za 3D digitalno kreiranje i izradu proizvoda sa složenom geometrijom i (3)digitalni kvalitet.

2. RAZVOJ MODULA ZA OFLAJN SIMULACIJU VIŠEOSNE OBRADNE

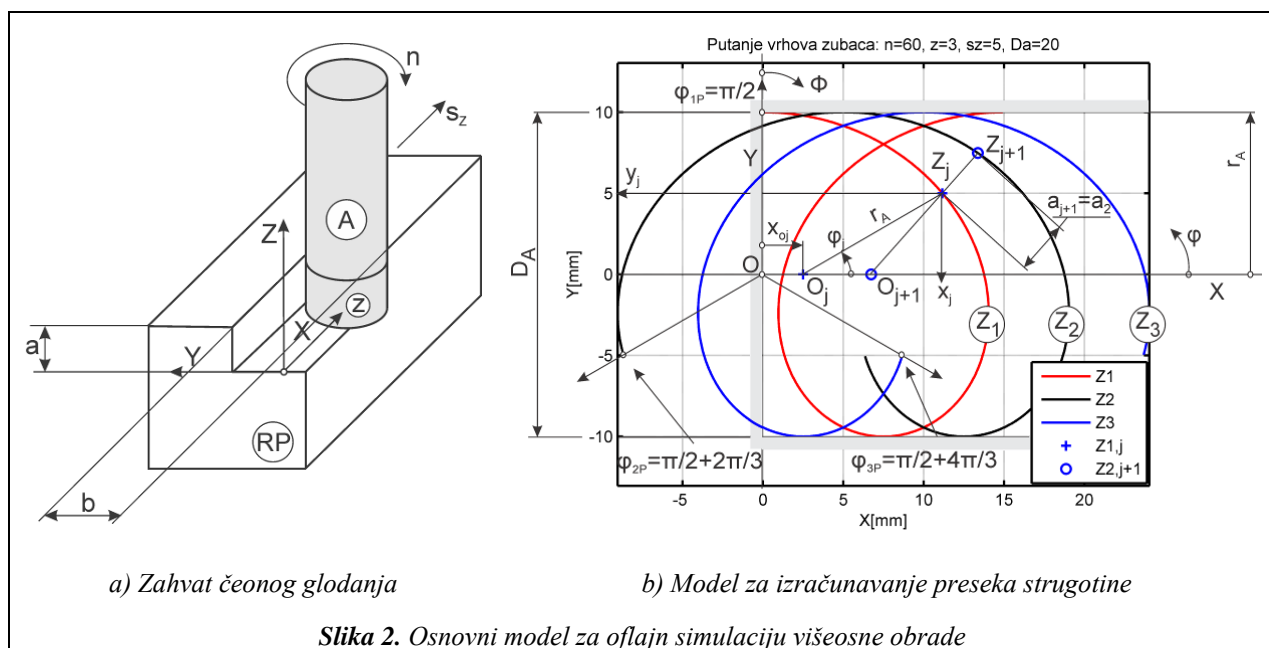
Celina *Virtuelna proizvodnja* u temi 2 ima dve tačke: (i) *Razvoj modula za oflajn simulaciju višeosne obrade* (realizovanu u 2011. godini) i (ii) *Razvoj modula za oflajn optimizaciju višeosne obrade* (po planu istraživanja realizuje se u 2012. godini), slika 1. Završni rezultat ove celine je virtuelni višeosni obradni sistem. Elementi ovog istraživanja su sledeći:

- Oflajn simulacija višeosne obrade vrši se za program (G kôd), napravljen pomoću CAD/CAM sistema tipa P. To je sistem koji se koristi za programiranje mašinske obrade u virtuelnom i stvarnom višeosnom obradnom sistemu. Za simulaciju obrade koristi se poznati mehanistički model: sile rezanja se izračunavaju po proširenim izrazima stepenog oblika.
- Potom se koristi modul za oflajn optimizaciju višeosne obrade. Izlaz iz tog modula je nova verzija programa (G kôda) sa optimalnim režimom obrade. Kriterijum za optimizaciju režima može biti ili maksimalna zapreminska proizvodnost, ili konstantna sila, odnosno, konstantan moment rezanja. Za potrebe testiranja sistema može se koristiti i program koji je napravljen u CAD/CAM sistemu tipa R, gde je već izvršena neka optimizacija režima obrade, koju taj sistem nudi.
- Verifikacija modula za oflajn simulaciju višeosne obrade i neke procedure optimizacije režima obrade sada se vrši na virtuelnom prototipu, virtuelnoj hibridnoj i stvarnoj hibridnoj petoosnoj mašini, koje su dobijene kao rezultati istraživanja u prethodnim projektima.
- Kompletiranje jednog virtuelnog obradnog sistema teče ovako: (i) pomoću CAD/CAM/SAE sistema, namenjenog za projektovanje proizvoda i tehnologija, kompletira se virtuelni prototip zadate mašine; (ii) konfiguriše se virtuelna mašina, koja se upravlja našim sistemom otvorene arhitekture tipa PC CNC (Linux CNC, EMC2); (iii) sprovodi se verifikacija programa sa optimalnim režimom obrade na virtuelnoj mašini; (iv) pokreće se i stvarna mašina, ako postoji, za završnu verifikaciju sistema za optimizaciju višeosne obrade; (v) za verifikaciju modela koristi se i kinematički model virtuelnog prototipa u okruženju CAD/CAM/CAE, pomoću kojeg se vrše probe dobijenog programa. U svetlim pravougaonicima na slici 1. su dati obavljeni poslovi.



Slika 1. Plan istraživanja za celinu Virtuelna proizvodnja u temi 2

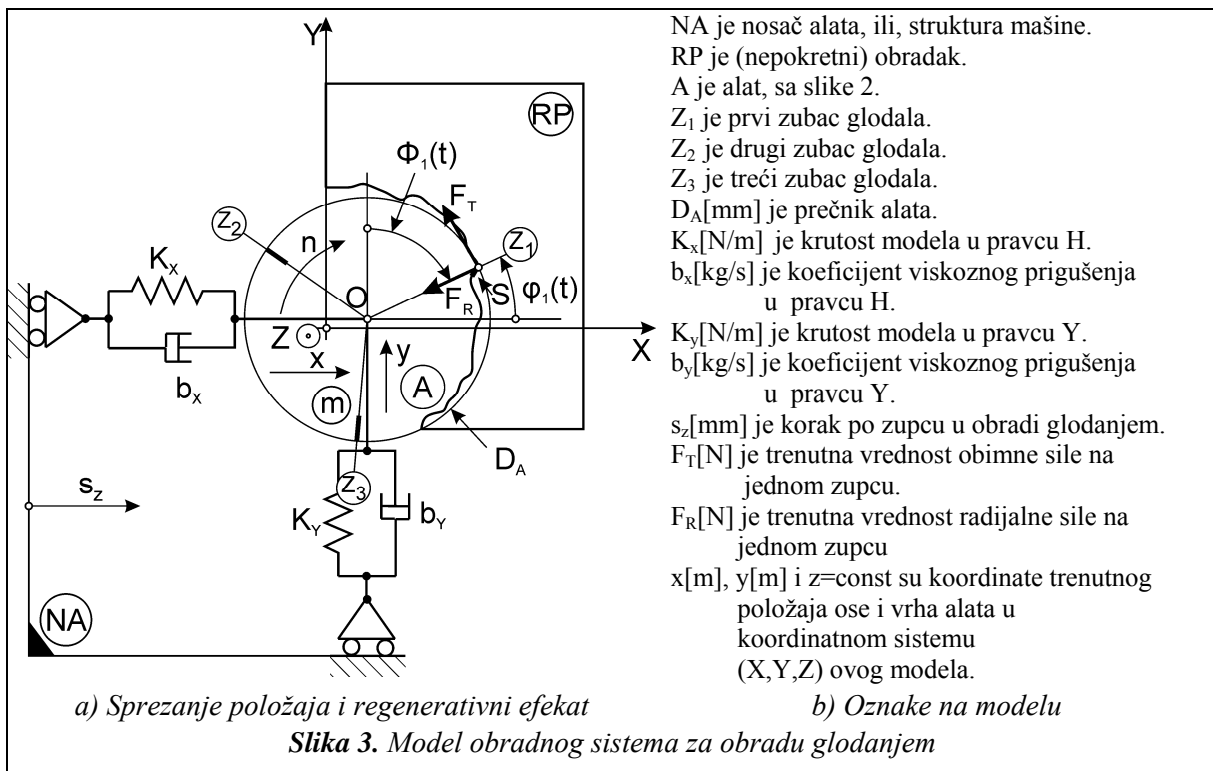
Predmet istraživanja je višeosna obrada čeonim glodanjem. Za probe je korišćeno vretenasto glodalo sa zavojnim zupcima, slika 2a). U toku obrade sistem može biti stabilan, kada se presek strugotine može odrediti po modelu pokazanom na slici 2b). Ako proces nije stabilan, onda je potrebno uračunati i relativno kretanje alata u odnosu na obradak, uključujući i slučaj da zupci alata i izađu iz zahvata sa obratkom, zbog velike amplitude oscilovanja u pravcu normale na obrađenu površinu.



Slika 2. Osnovni model za oflajn simulaciju višeosne obrade

Naš virtuelni obradni sistem ima noseću strukturu tipa sprežanja položaja, sa dva uzajamno ortogonalna stepena slobode i proces sa regenerativnim efektom, slika 3.

Model za određivanje trenutne dubine rezanja po slici 2b) dat je jednačinama (a), a mehanistički model za otpore rezanja na zupcu sa rednim brojem j dat je u sistemu jednačina (b). Funkcija $g_j(\phi_j(t))$ služi za odabiranje slučaja kada zubac nije u zahvatu zbog jake oscilacije, ili zato što je izašao iz zahvata ($g_j(\phi_j(t)) = 0$) i slučaja kada je zubac u zahvatu ($g_j(\phi_j(t)) = 1$). Trenutna debljina strugotine ima svoj statički i svoj dinamički deo, jednakost (s) i izračunava se po pažljivo pripremljenoj proceduri.

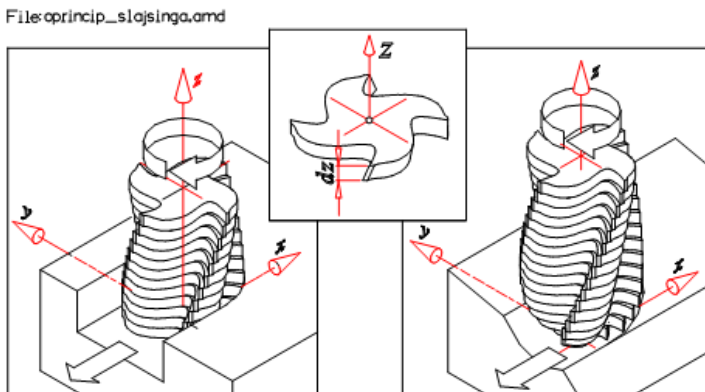


Pobuda modela noseće strukture sa slike 3a) su trenutne vrednosti ukupnih sila u pravcima X i Y: $F_x(t)$ i $F_y(t)$, respektivno. Diferencijalne jednačine kretanja pod dejstvom tih sila su sistem (d). Oznake mera i konstanta modela sa slike 3a) popisane su na slici 3b). Njihov bliži opis je sledeći:

$$\begin{aligned}
 x_j &= x_{oj} + r_A \cos(\varphi_{jP} - \omega_A t_j), & (a) \quad F_{Tj} &= a \cdot (K_{TC} \cdot a_j(t)^{x_i} + K_{TE}) \cdot g_j(\phi_j(t)), \\
 y_j &= r_A \sin(\varphi_{jP} - \omega_A t_j), \quad x_{oj} = v_s t_j. & (b) \quad F_{Rj} &= a \cdot (K_{RC} \cdot a_j(t)^{x_i} + K_{RE}) \cdot g_j(\phi_j(t)) \\
 a_j(t) &= a_{jS}(t) + a_{jD}(t) & (s) \quad m\ddot{x} + b_x \dot{x} + K_x x &= F_x(t) \text{ i } m\ddot{y} + b_y \dot{y} + K_y y = F_y(t) & (d)
 \end{aligned}$$

F_{Tj} [N] je trenutna obimna sila na zupcu Z_j ; F_{Rj} [N] je trenutna vrednost radijalne sile na zupcu Z_j ; a [mm] je dubina rezanja, slike 2 i 3; K_{TC} [N/mm²] je koeficijent rezanja za obimnu silu, K_{RC} [N/mm²] je koeficijent rezanja za radijalnu silu; $a_j(t)$ [mm] je trenutna debljina strugotine na zupcu Z_j ; x_i je eksponent za debljinu strugotine; K_{TE} [N/mm] je koeficijent gubitaka za trenutnu obimnu silu; K_{RE} [N/mm] je koeficijent gubitaka za trenutnu radijalnu silu; $g_j(\phi_j(t))$ je pravilo – funkcija odabiranja rezultata izračunavanja trenutnih sila ($g_j(\phi_j(t)) = 1$ ako je $a_j(t) > 0$ i ako je $\phi_j(t)$ u granicama širine glodanja (b) sa slike 3, inače je $g_j(\phi_j(t)) = 0$).

Po ovako postavljenom modelu, za potrebe simulacije procesa obrade glodanjem, najviše posla se obavlja u određivanju trenutne debljine strugotine. To se vrši po tačnijem modelu, pokazanom na slici 3a), a ređe po približnom, pokazanom na slici 2b). Izračunavaju se dve komponente te debljine. Prva je statička ($a_{jS}(t)$), a druga dinamička ($a_{jD}(t)$), pa sabiraju, kao u jednakosti (s).



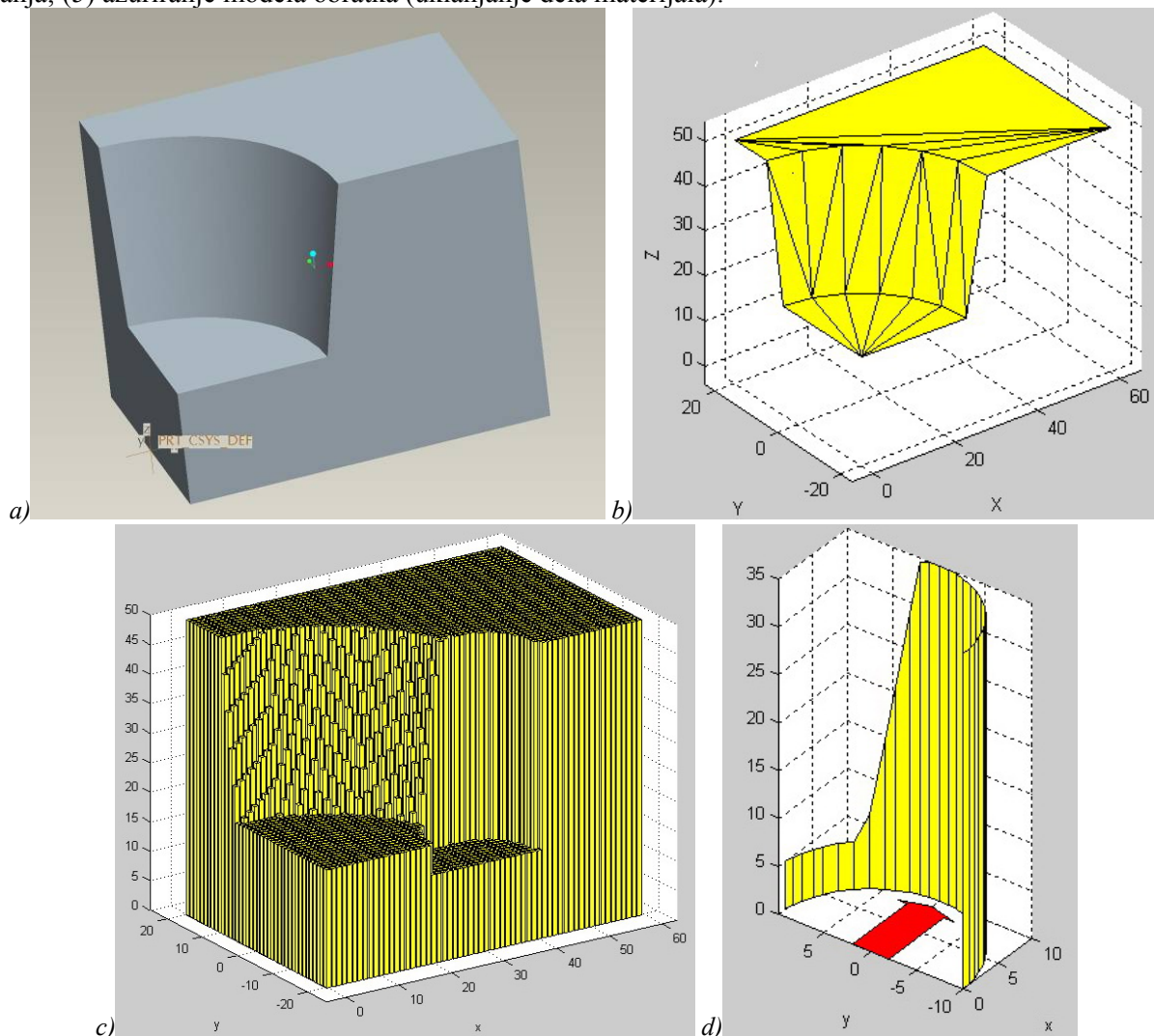
Slika 4. Princip diskretizacije reznog dela alata na diskove

Za višeosnu obradu oblici glodala mogu biti raznoliki: loptasti, torusni, konusni, ravni itd. Zbog toga je uobičajeno da se jedno čeonu glodalo izdela na slog tankih segmenata debljine dz , slika 4. Na svaki od tih segmenata primenjuju se računice, slične već datim (b) i (s), za izračunavanje trenutnih vrednosti sila, uzimajući u obzir i lučnu poziciju svakog zupca, ali i ugao obrtanja

glodala, oblik i mere priprema i preuzeti program (G kôd), čiji režim obrade treba poboljšati. Simulacija trenutnih vrednosti komponentata sile rezanja i momenta pri obradi glodanjem polazi od diskretizovanog reznog dela alata.

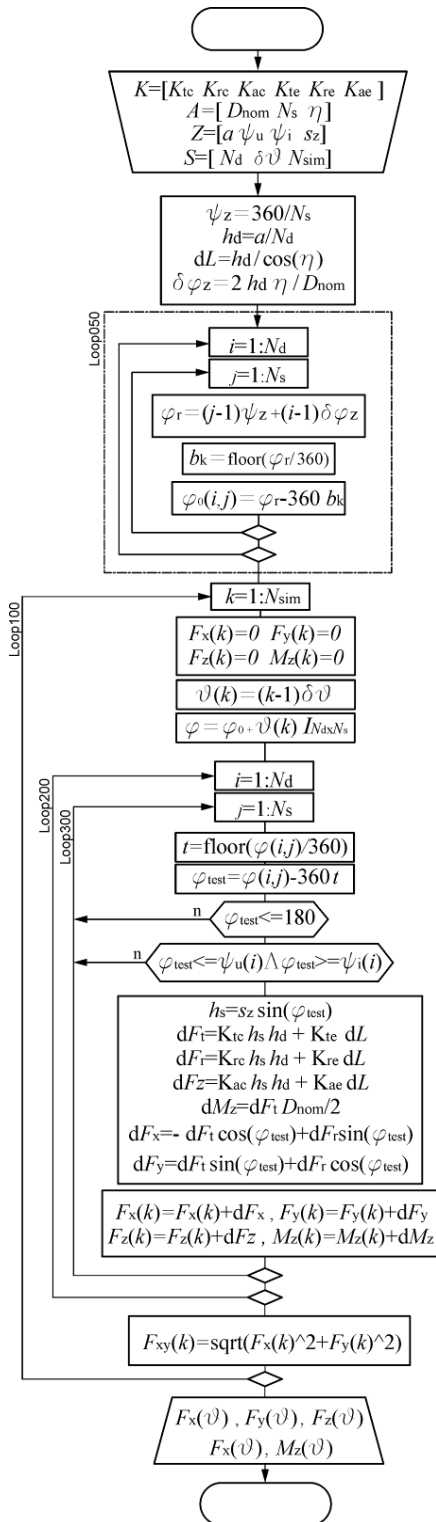
Diskretizacija (slika 4) podrazumeva da se, ako je o vretenastim glodalima reč, rezni deo izdeli, duž ose alata, na diskove konačne debljine. Elementarni delovi sečiva, koji odgovaraju takvim diskovima, mogu se, bez obzira na tip glodala, uz dovoljno poverenja, smatrati pravolinijskim, sa definisanim uglovima reznog klina. Diskretizacija alata je dobar način da se simulacija obrade, sa stanovišta sile rezanja, primeni i na alate proizvoljne makrogeometrije (vretenasta, lotasta, torusna i sl.). Plan sile rezanja za svako elementarno sečivo odgovara modelu kosog rezanja. Do komponentata sile, koja deluje na deo sečiva, koji odgovara jednom disku, dolazi se ili kalibracijom (eksperimentalno, u testovima obrade sa razmatranim alatom i materijalom obratka), ili na osnovu koeficijenata sile rezanja iz jednostavnijih testova ortogonalnog rezanja i transformacija plana sile iz ortogonalnog u koso rezanje. U istraživanju, u okviru ovog projekta, korišćen je drugi navedeni pristup, iz razloga manjeg potrebnog broja eksperimenata u odnosu na moguću raznorodnost geometrije alata, za koju se obrada simulira, slika 5.

Karakteristični koraci u simulaciji NC obrade, koja za cilj ima predikciju sile rezanja, podrazumeva sledeće osnovne korake: (1) dekompozicija putanje alata, na osnovu izvornog G kôda, generisanog u nekom od dostupnih CAD/CAM sistema tipa R i arhiviranje tako dekomponovane putanje u formatu pogodnom za primenu u modulu za simulaciju; (2) formiranje modela priprema u digitalnom obliku, pogodnom za simulaciju; (3) lociranje alata u odnosu na obradak, u tačkama koje su određene putanjom alata u programu; (4) rekonstrukcija površine kontakta alata i obratka i izračunavanje trenutnih vrednosti komponentata sile rezanja; (5) ažuriranje modela obratka (uklanjanje dela materijala).

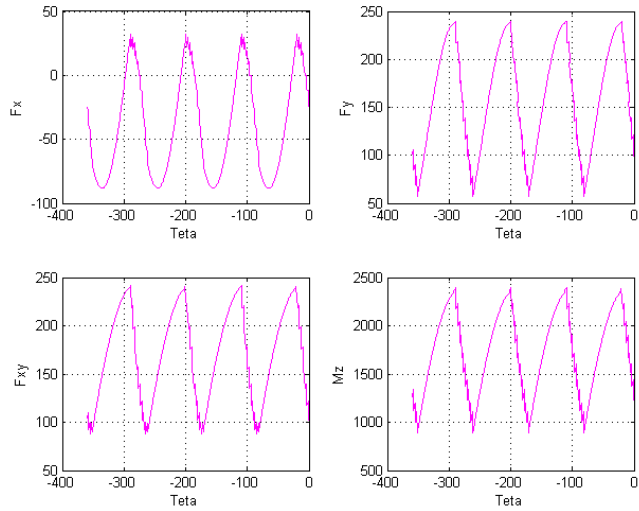


a) solid model priprema, b) redukovani STL model proipremka, c) ažurirana Z-mapa obratka, d) rekonstruisana kontaktna površina alata u zahvatu

Slika 5. Faze u formiranju diskretizovanog modela obratka i njegovo ažuriranje



Slika 6. Dijagram toka određivanja trenutnih vrednosti komponenata sile glodanja na jednom njegovom obrtu



Slika 7. Simulirana promena komponenata sile i momenta glodanja na jednom njegovom obrtu

Simulacija, kojom se dobija promena trenutnih vrednosti komponenata sile i momenta rezanja, na jednom punom obrtu alata, izvodi se saglasno dijagramu toka pokazanom na slici 6. Radi preglednosti, pokazan je dijagram toka koji se odnosi na obradu ravnim vretenastim glodalom i na zahvat sa zahvaćenim pravougaonim profilom nedeformisane strugotine. Skup ulaznih parametara čini: podskup atributa alata (A: prečnik, broj zubaca, ugao zavojnice zupca), podskup koeficijenata komponentnih sila rezanja (K), podskup parametara zahvata (Z: korak po zupcu, vektori ulaznih i izlaznih uglova za svaki disk alata, saglasno zahvaćenoj površi) i, konačno, podskup parametara same simulacije (S: rezolucija diskretizacije alata na diskove i ugaona rezolucija emulacije obrta alata). Prva petlja (Loop050) izračunava inicijalne položaje sečiva svakog diska alata. Unutrašnja petlja (Loop300) izračunava doprinos komponentama sile i momenta svakog pojedinačnog sečiva na određenom disku. Petljom (Loop200) se taj postupak ponavlja za sve diskove. Sumiranjem se dobijaju trenutne vrednosti sile i momenta u određenom trenutku (jedna ugaona pozicija pri obrtanju glodala). Petljom (Loop100) se postupak ponavlja za sve ugaone položaje pri obrtanju alata. Primer identifikovanih promena ovih veličina za jedan skup ulaznih parametara pokazan je na slici 7. Uobičajeno je da se za praktične analize ne koristi čitav profil promene komponenata sile i momenta, na punom obrtu, već da se vrši ekstrakcija relevantnih vrednosti. Za zahvate grube obrade, to je maksimalna sila u ravni (X,Y), i maksimalna vrednost obrtnog momenta. Za analize u domenu završnih obrada (odstupanja oblika i kvalitet obrađene površi) to su maksimalne vrednosti komponenata sile po pravcima X, odnosno Y.

Simulacija NC obrade glodanjem je, u ovom slučaju, zasnovana na diskretnom modelu obratka, čija se geometrija aproksimira pomoću takozvane Z-mape. Neke karakteristične faze manipulacije modelom priprema, i kasnije obratka, pokazane su na slici 5.

Razvijenom aplikacijom u Matlab-u omogućeno je generisanje mapa za jednostavnije oblike priprema, uz mogućnost da se, u slučaju složenijeg oblika priprema, može prihvatiti i STL datoteka, kao izlaz iz nekog od solid modelera. Program najpre redukuje STL model, uklanjajući sve vertikalne trouglove, a zatim generiše Z-mapu priprema, sa izabranom rezolucijom. Saglasno putanji alata, njegova obvojnica se pomera

u odgovarajući položaj u odnosu na model obratka. U takvom međusobnom položaju se vrši rekonstrukcija površi zahvata alata i obratka, imajući u vidu pravac i smer vektora brzine pomoćnog kretanja. Površ kontakta se aproksimira skupom pravougaonika na poluobimu obvojnice alata. U analiziranom položaju alata u odnosu na obradak uklanja se deo materijala zahvaćen obvojnicom alata, radi ažuriranja geometrije obratka. Uz dodatne, prethodno definisane parametre, rekonstruisana površ zahvata je osnova za simulaciju komponenta sile rezanja u datoj fazi rada NC programa. Postupak se nastavlja ciklično, pomeranjem alata u sledeću tačku na putanji alata, sve do okončanja ukupne putanje.

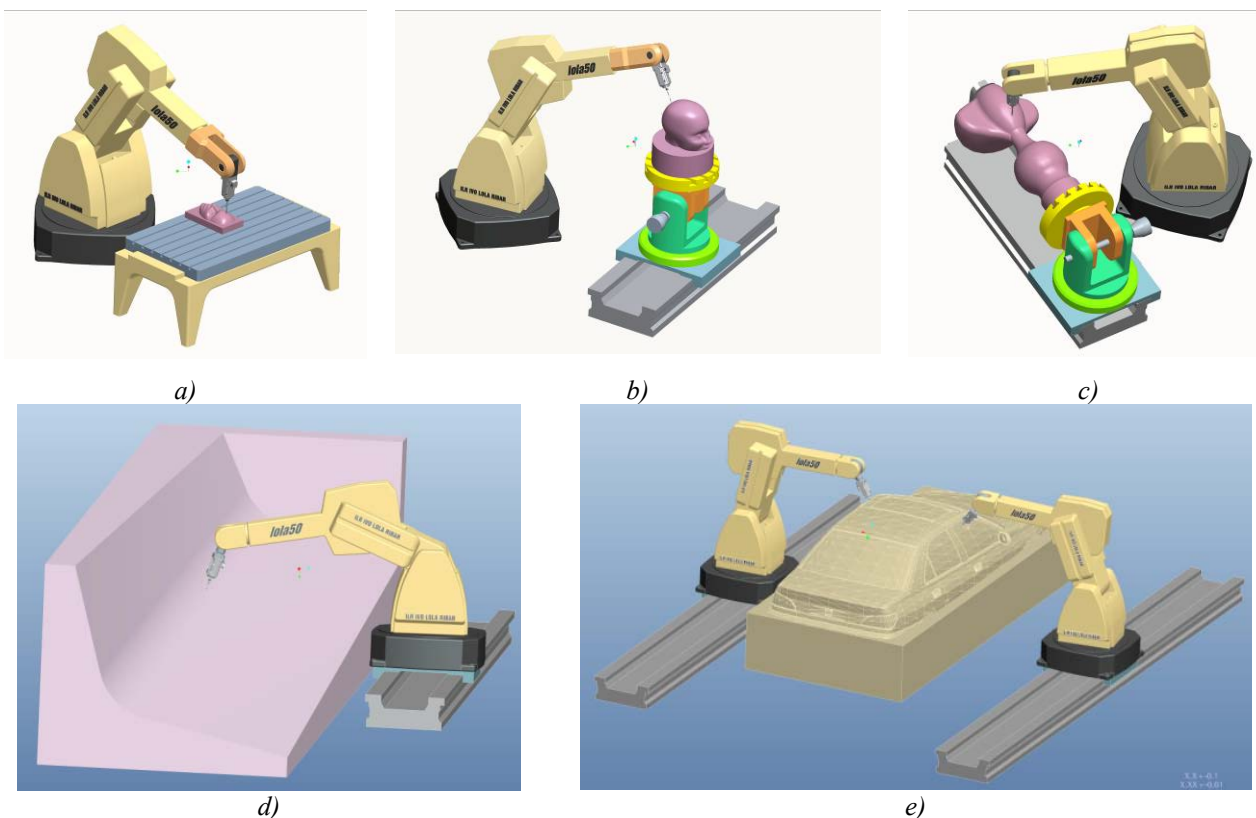
U analiziranoj tački, na putanji alata, vrši se simulacija jednog obrta glodala. Rekonstruisana površ kontakta je dovoljna da se pri simulaciji odrede ulazni i izlazni ugao zahvata, za svaki disk, kojim je alat diskretizovan. Kako sam G kôd ne sadrži podatke o pripremkama i trenutnim presecima strugotine, potrebno je da se ova simulacija započne pogodno zadatim pripremkom (slika 5a) da bi se mogli pratiti oblik i mere kontakta alata i obratka u toku simulacije obrade. Pomoću Z-mape se profil površi za obradu u novom prolazu dobija pomoću profila glodala i preostalog pripremkama.

3. MODELIRANJE STRUKTURA OBRADNIH SISTEMA ZA VIŠEOSNU OBRADU NA BAZI ROBOTA

Potrebu za obradnim sistemima na bazi robota, odnosno potrebu za tehnologijom višeosne obrade složenih estetskih i funkcionalnih površina, imaju preduzeća u oblastima: izrade delova od lakih legura, obrade drveta, obrada drugih nemetala (kamen, plastika, staklo, kompozit), livenja metala (modeli, kalupi za jezgra i sl.), izradi alata za proizvode od kompozita (korita čamaca, kabine vozila, ljske lopatica, branika i sl.). Takođe, značajan prostor za primenu ovakvih obradnih sistema predstavljaju i potrebe za restauracijom objekata kulturne baštine (crkve, manastiri, spomenici i sl.), kao i pozorišna i filmska scenografija.

Obradni sistemi na bazi robota za izabrane klase delova treba da obezbede brzu izradu, na jednom mestu, složenih delova velikih gabarita od mekših materijala srednje i niže klase tačnosti sa složenim površinama generisanim raspoloživim CAD/CAM sistemima i metodama reverznog inženjerstva.

Ovakvi sistemi bi imali višestruko nižu cenu od postojećih petoosnih mašina alatki i zadovoljili bi zahteve u pogledu obrade srednje i niže klase tačnosti. Postavka konceptata obradnih sistema na bazi robota, koji su predmet istraživanja na ovom projektu, pokazani su na slici 8.



Slika 8. CAD modeli obradnih sistema za višeosnu obradu na bazi robota

Kinematičko modeliranje obradnih sistema na bazi robota, pokazanih na slici 8, u cilju simulacija, razvoja rekonfigurabilnog upravljačkog sistema i projektovanja dodatnih obrtnih i translatorskih osa je osnovni rezultat u ovoj istraživačkoj godini. Kao primeri za ovu fazu istraživanja se navode kinematički modeli varijanti sa slika 8b) i 8d), koji su i fizički u fazi realizacije.

Kinematičko modeliranje ovih obradnih sistema izvršeno je po konvenciji za petoosne vertikalne glodalice (X,Y,Z,A,B) koristeći Denavit-Hartenberg-ov pristup, slika 9.

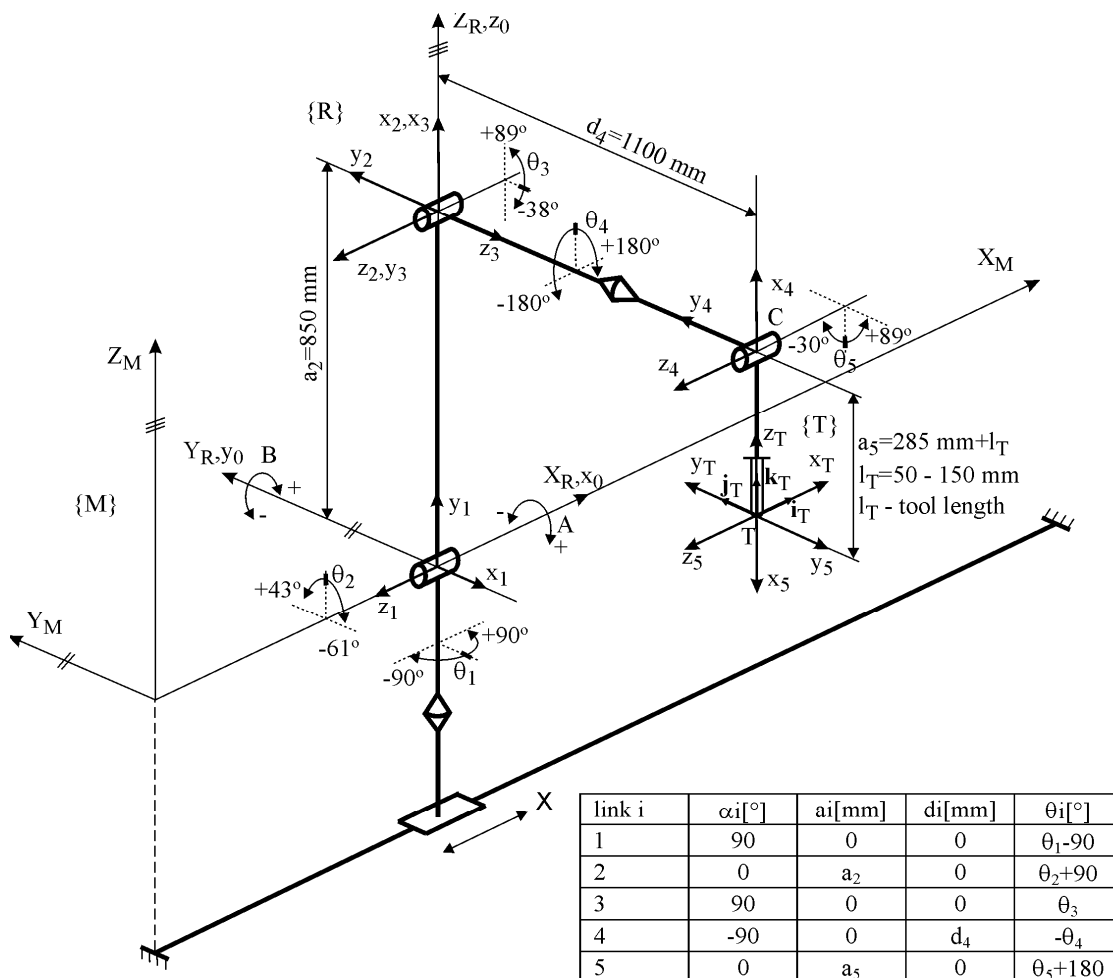
Činjenica da sistemi treba da omoguće korišćenje postojećih CAD/CAM sistema i programiranje u G-kôdu, to je pored koordinatnih sistema koji se odnose na sam robot $\{O\}$, $\{R\}$, $Tx_5y_5z_5$, neophodno uvesti i koordinatne sisteme koji se odnose na bazu obradnog sistema $\{M\}$ i vrh alata $\{T\}$.

Kako je

$${}^R_T T = {}^0_1 A \cdot {}^1_2 A \cdot {}^2_3 A \cdot {}^3_4 A \cdot {}^4_5 A \cdot {}^5_T T$$

odnosno,

$${}^M_T T = {}^M_R R \cdot {}^R_T T = \begin{bmatrix} {}^M_R R = {}^R_T R & & & {}^M \mathbf{p}_T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{Tx} & j_{Tx} & k_{Tx} & X_M \\ i_{Ty} & j_{Ty} & k_{Ty} & Y_M \\ i_{Tz} & j_{Tz} & k_{Tz} & Z_M \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



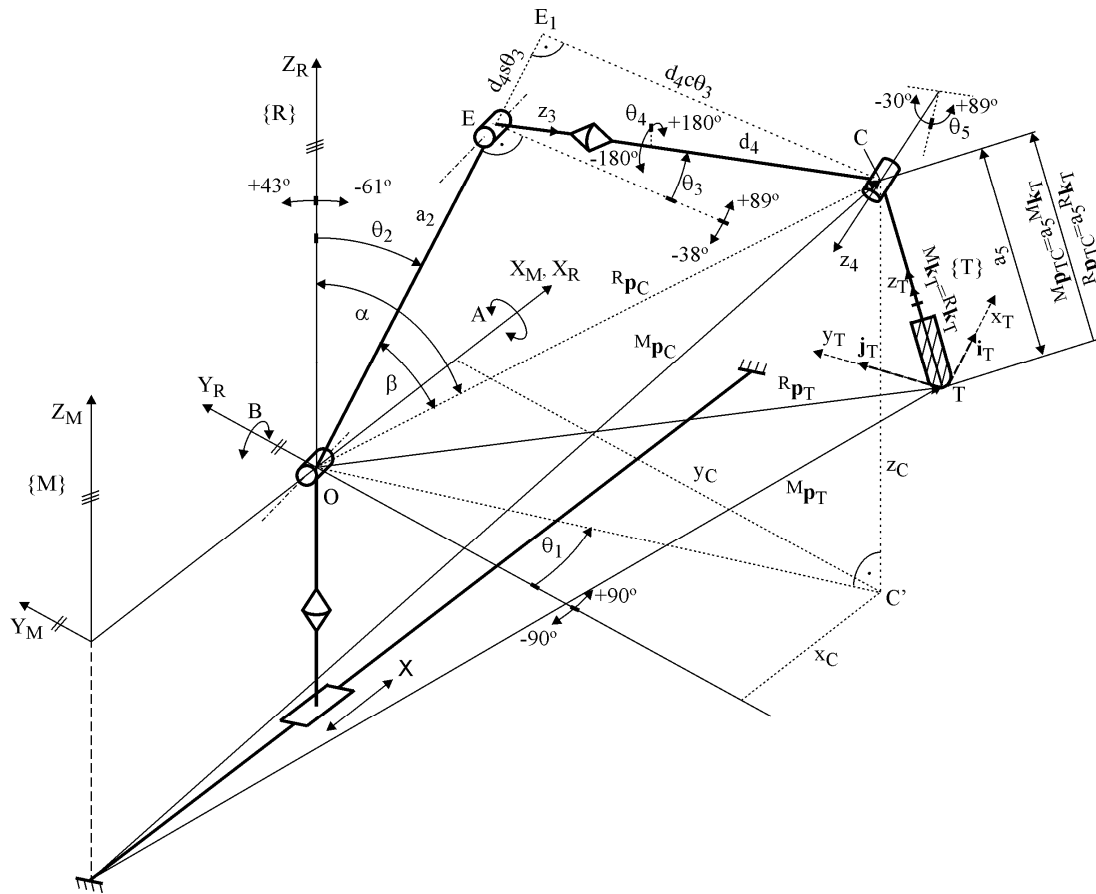
Slika 9. Kinematički model obradnog sistema na bazi robota sa slike 8d)

to su na osnovu modela kinematičkog dekuplovanja, slika 10, rešeni direktni i inverzni kinematički problem obradnog sistema sa slike 9, koji su zbog obimnosti izostavljeni.

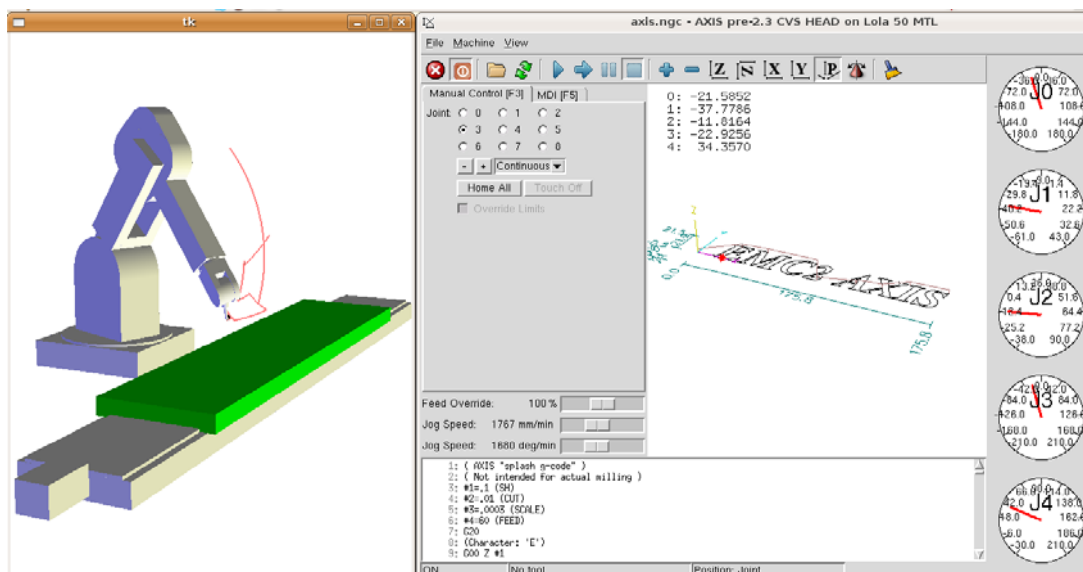
Osnovu postavljenog pristupa kinematičkog modeliranja čini specifičan način rešavanja inverzne kinematike ove, u suštini redundantne strukture, tako što rotacija osnove robota θ_1 učestvuje samo u ostvarivanju zahtevane orijentacije alata, dok dodatna translatorna osa X ostvaruje poziciju alata X_M .

Kinematičko modeliranje obradnih sistema na bazi robota sa slike 8, odnosno, rešenja direktnog i inverznog kinematičkog problema, osnova su za izbor projektnih parametara, analizu radnog prostora, simulacije i rekonfigurabilno upravljanje, čiji je razvoj u toku.

Pored CAD modela obradnih sistema na bazi robota sa slike 8 izvršeno kinematičko modeliranje je predstavljalo osnovu i za razvoj virtuelnih obradnih sistema na bazi robota u objektno orijentisanom jeziku Python, slika 11, koji omogućavaju realističnu simulaciju i verifikaciju programa višeosne obrade pomoću robota.



Slika 10. Model kinematičkog dekuplovanja



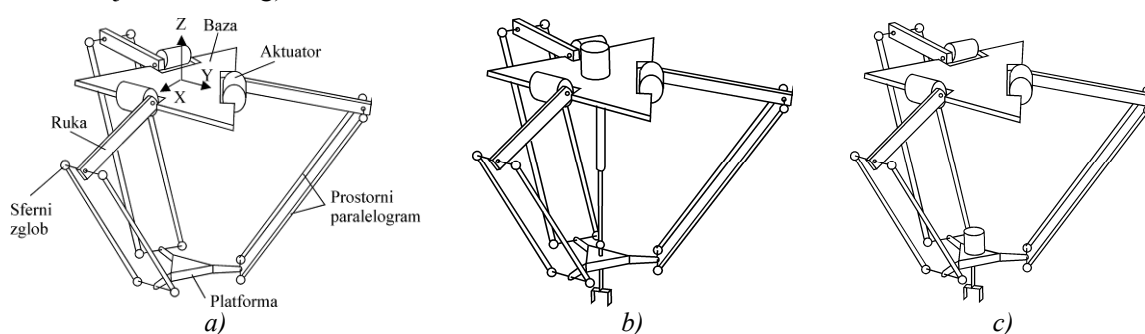
Slika 11. Virtuelni obradni sistem na bazi robota sa slike 8b,c)

4. ANALIZA PARALELNIH MEHANIZAMA TIPRA DELTA I KINEMATIČKO MODELIRANJE

Ova istraživanja pokrivaju prve dve tačke Teme 4: Istraživanje i razvoj prototipa paralelnog DELTA robota za pakovanje proizvoda konditorske i farmaceutske industrije i montažu u mikroelektronici.

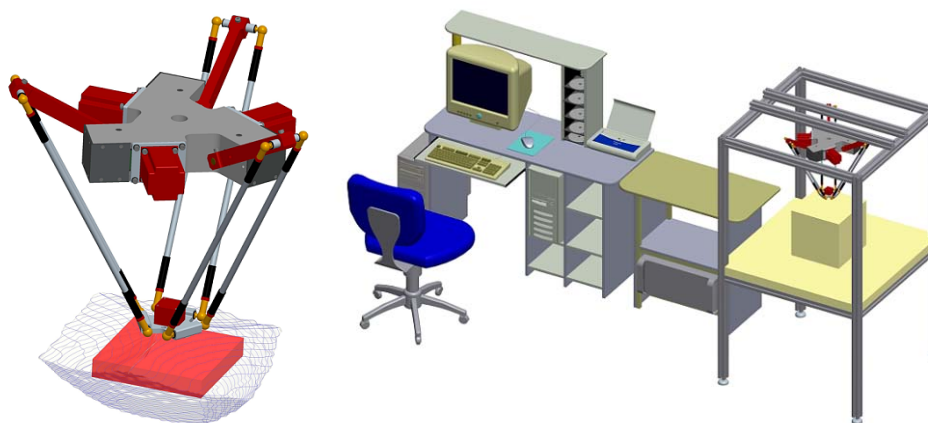
DELTA robot je osnova savremenih linija i sistema za manipulaciju i pakovanje proizvoda prehrambene, konditorske i farmaceutske industrije. Takođe ima primenu i u montaži u mikroelektronici. Zahtevani standardi produktivnosti, pouzdanosti i higijene u ovim industrijama potiskuju postojeće serijske robote iz procesa proizvodnje.

DELTA paralelni koncept je razvijen sa idejom da nema potrebe koristiti robote sa motorima od po nekoliko kilovata za manipulaciju delovima mase od nekoliko grama. Originalni shematski prikaz DELTA robota pokazan je na slici 12. Ovakva, na prvi pogled kompleksna struktura mehanizma sa većim brojem segmenata, slika 12a), omogućava da pokretna ploča ima samo 3 stepena slobode. Četvrti stepen slobode, odnosno orijentacija, obezbeđuje se aktuatorom na nepokretnoj ploči, čiji se moment prenosi pomoću dva kardanska zgloba i teleskopskog vratila, slika 12b), ili pomoću aktuatora na unutrašnjoj strani platforme, slika 12c). Sa aspekta kinematičkih mogućnosti DELTA robot može biti posmatran kao SCARA robot, s tim što mu je odnos nosivost/masa višestruko veći kao i brzine nego kod SCARA robota (brzine vrha preko 10 m/s, uz ubrzanja i iznad 10g).



Slika 12. DELTA mehanizam sa obrtnim zglobovima

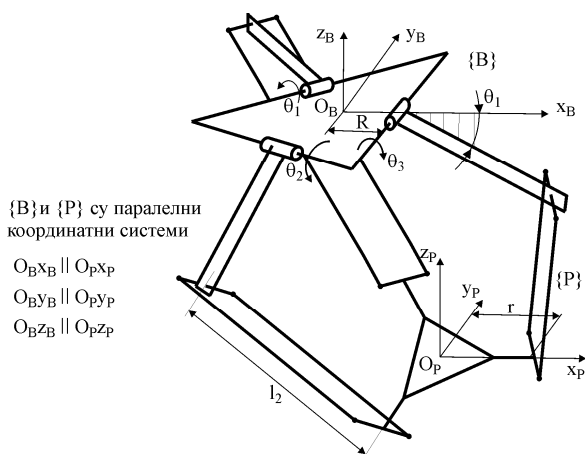
Na složenost modeliranja, projektovanja i izrade ukazuje činjenica da mali broj proizvođača robota uključuje DELTA robot u svoj proizvodni program. S obzirom na potrebe za ovakvim robotima i u domaćoj industriji, kao i za potrebe nastave i istraživanja, pokrenut je projekat razvoja domaćeg DELTA robota koji je u toku. Na slici 13 pokazan je CAD model usvojenog koncepta DELTA robota sa radnim prostorom i okruženjem, čiji će prototip biti jedan od praktičnih rezultata ovog projekta.



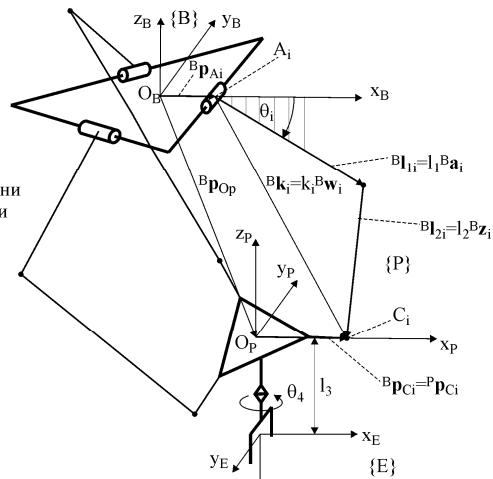
Slika 13. Postavljeni koncept domaćeg DELTA robota

Osnovu za projektovanje, upravljanje i izradu DELTA robota (u ovom projektu) sa izuzetnim karakteristikama čini razvoj kinematičkih modela koji su veoma složeni. Naša dosadašnja istraživanja su rezultirala razvojem kinematičkog modela DELTA robota na bazi minimalnog broja parametara, što ga čini efikasnijim od postojećih pristupa ne samo u pogledu upravljanja već i u pogledu efikasnih algoritama za kalibraciju i kompenzaciju čiji je razvoj takođe u toku.

Slika 14 predstavlja geometrijski model osnovne strukture DELTA mehanizma sa tri stepena slobode sa osnovnim parametrima i koordinatnim sistemima {B} i {P} pridruženih bazi i platformi, respektivno.



Slika 14. Geometrijski model DELTA mehanizma



Slika 15. Kinematički model DELTA mehanizma

Kinematički model DELTA robota, pokazan na slici 15 omogućava kinematičko modeliranje na bazi minimalnog broja parametara. Ovo znači da su inverzni i direktni kinematički problem rešeni analitički, ali omogućavaju i paralelno procesiranje, što znači da će upravljački sistem moći da realizuje izuzetno brza CP kretanja sa izuzetno velikim ubrzanjima. Postavljeni pristup modeliranja takođe omogućava i izračunavanje ukupne Jakobijan matrice, kao i Jakobijan matrica inverzne i direktne kinematike. Vektori \mathbf{v} definisani u koordinatnim sistemima $\{B\}$ i $\{P\}$ su označeni sa ${}^B\mathbf{v}$ i ${}^P\mathbf{v}$. Vektori položaja centara obrtnih zglobova na bazi su ${}^B\mathbf{p}_{Ai}$ dok su vektori položaja središta između centara zglobova na platformi ${}^B\mathbf{p}_{Ci} = {}^P\mathbf{p}_{Ci}$, $i=1,2,3$. Vektor spoljašnjih koordinata ${}^B\mathbf{p}_{Op} = [x_p \ y_p \ z_p]^T$ predstavlja koordinate centra O_p pokretne platforme dok vektor unutrašnjih koordinata čine upravljana ugaona zakretanja spojki ramena $\boldsymbol{\theta} = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T$. Jedinичni vektori ${}^B\mathbf{a}_i$, ${}^B\mathbf{z}_i$, ${}^B\mathbf{w}_i$, $i=1,2,3$ se koriste kao pomoćni vektori. Iz kinematičkog modela sa slike 2.4 postavljene su sledeće dve vektorske jednačine:

$$k_i {}^B\mathbf{w}_i = {}^B\mathbf{p}_{Op} + {}^{B=P}\mathbf{p}_{Ci} - {}^B\mathbf{p}_{Ai} \quad (1)$$

$$k_i {}^B\mathbf{w}_i = l_1 \cdot {}^B\mathbf{a}_i + l_2 \cdot {}^B\mathbf{z}_i \quad (2)$$

Kvadriranjem druge jednačine se dobija skalarna jednačina

$$l_1^2 - 2l_1 ({}^B\mathbf{a}_i \cdot k_i \cdot {}^B\mathbf{w}_i) + k_i^2 - l_2^2 = 0 \quad (3)$$

iz koje su izračunavanjem i zamenom vektora $k_i \cdot {}^B\mathbf{w}_i$ rešeni inverzni kinematički problem, odnosno, vektor unutrašnjih koordinata $\boldsymbol{\theta} = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T$ i direktni kinematički problem, odnosno, vektor spoljašnjih koordinata ${}^B\mathbf{p}_{Op} = [x_p \ y_p \ z_p]^T$, tj. vektor položaja centra platforme O_p . Rešenja, koja su ovde zbog obimnosti izostavljena, osnova su za izbor projektnih parametara, analizu radnog prostora i upravljanje, čiji je razvoj u toku.

4. SISTEM ANALIZA SAVREMENIH KONSTRUKCIONIH MATERIJALA I IZRADA STENDA ZA IZVOĐENJE PROCESA MIKROREZANJA

4.1 Klasifikovanje arhitektonsko-građevinskog kamena

Razmatrani su osnovni aktuelni problemi klasifikovanja arhitektonsko građevinskog kamena, (AG kamena) kroz kompleksnu klasifikaciju zasnovanu na sledećim kriterijumima: obliku i dimenzijama, obradi i nameni proizvoda od kamena. Treba napomenuti da u današnje vreme u svetu i kod nas postoji više klasifikacija nemetalnih mineralnih sirovina, ali sa druge strane ne postoji neka univerzalna i opšte prihvaćena klasifikacija, već se ona ostvaruje na različite načine u zavisnosti od toga kojoj svrsi služi i na kojim kriterijumima se temelji.

Važno je reći da su u predloženoj klasifikaciji granice između pojedinih grupa, podgrupa kao i jedinica nižeg reda, umnogome konvencionalne i da su moguće različite kombinacije između pojedinih predstavnika. Tako, na primer, lomljen kamen (pogotovo ako je prirodno pločast) čini prelaz od neoblikovanog ka oblikovanom kamenu; rezne površine (vezne i vidne) kod istog komada kamena mogu biti različito obrađene – na primer, sečenje se može kombinovati sa razdvajanjem ili odlamanjem.

Klasifikacije arhitektonsko građevinskog kamena:

I Prema obliku i dimenzijama:

1. neoblikovan (nedimenzioniran) kamen
2. oblikovan (dimenzioniran) kamen

II Prema obradi:

1. neobrađen kamen
2. obrađen kamen

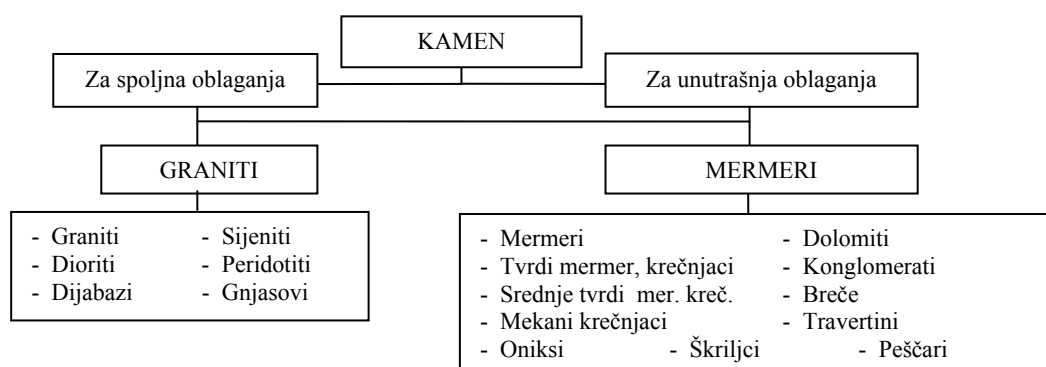
III Prema nameni:

1. tehnički kamen
2. ukrasni (arhitektonski) kamen

4.2 Komercijalna klasifikacija AG kamena

Pod arhitektonskim kamenom podrazumeva se kamen koji, pored osnovne funkcionalne uloge, ima izraženo dekorativno svojstvo, sadržano u opštem izgledu, obliku i rasporedu bojenih elemenata površine kamene ploče. U zidanim kamenim konstrukcijama, kamen predstavlja osnovni funkcionalni element gradnje, dok u betonskim ili čeličnim konstrukcijama, kamen predstavlja samo oblogu funkcionalnog elementa. U ovom poslednjem slučaju, kamenu je namenjene uloge: zaštite, izgleda i dekorativnog elementa.

Kada se kamen primenjuje kao konstrukcioni element, on se izrađuje u masivnim komadima, a kada predstavlja oblogu funkcionalnog elementa, izrađuje se u tanjim kamenim pločama debljine 2-4 cm. Na slici 16 data je opšta klasifikacija arhitektonskog kamena.



Slika 16. Opšta klasifikacija arhitektonskog kamena

Pod GRANITOM se podrazumevaju ne samo graniti nego i sve druge tvrde silikantne stene (magnatske i metamorfne), koje se standardnim tehnološkim postupkom obrade poliraju.

Pod MERMEROM se podrazumevaju, pored pravih mermera i sve druge karbonantne stene, pa i netipične stene, koje se lako i dobro poliraju.

4.3 Osvrt na strukturu genetskih tipova ležišta mineralnih sirovina Srbije

Savremena primena prirodnog kamena sve više je zastupljena plemenitim vrstama visokih estetskih kvaliteta i načina obrade kako podnih površina, tako i u primeni kod urbanog inventara i na fasadama zgrada. Korišćenje više vrsta različitih boja, oblika, veličina i stvaranje raznolikih matrica urbanog partera predstavlja više od običnog popločavanja. Kod nas su karakteristična sledeća ležišta AG kamena vrste kamena: mermer "Venčac plavi" i "Venčac beli"; granit "Bukuljski", granit "Ploče"- Arandelovac; mermer "Venčac roze" – Brezovac; AG kamen područja "Granit-Pešćar" - Ljig; dacit "Ljuta stena" – Ljig; AG kamen područja Novog Pazara; mermerna breča "Grab" – Guča; roze mermer "Suva Čuprija" – Novi Pazar; dolomit "Bela ruža" – Novi Pazar – beli; mermer "Plavi tok" – Užice; crveni krečnjak "Sirogojno" – Užički revir; krečnjak "Skržuti" – Užički revir; krečnjak crni "Yu porto" – Užice; AG kamen "Crna Reka" - Žagubica; AG kamen, mermer, gabro, granit i sijenit - lokaliteta Bor; granit "Ravno Bučje" – Knjaževac; crveni krečnjak "Tijovac" Knjaževac; AG kamen "Koral" – Lazovi (Kosjerić); daciti i dacito-andenziti "Vidačevica" – Planina Rudnik; gabropegmatiti – područje Porečke Reke; mikrocrveni krečnjak "Labukovo" – Niški revir; AG kamen biomikritksi krečnjak "Virovo" – Arilje; bazalt "Crni Vrh" – Kučevo; granit "Jošanica" – Jošanička Banja; oniks "Sijarina oniks" – Sijarinska Banja; AG kamen – područje Istočne i Jugoistočne Srbije; gnjasevi i migmatiti – donji kompleks Srpsko-Makedonskog područja; mermerne breče "Dečani" – lokalitet Peći; lerzolititi "Drenovac"- područje Orahovca; krečnjaci buloške formacije – područje Zapadne Srbije; crvene krečnjačke breče "Jabuka" – Prijepolje.

4.4 Određivanje fizičko mehaničkih svojstava kamena na bazi mermera i granita

Mehanika stena, kao naučna disciplina, proučava stenske materijale, u cilju upoznavanja njihovih fizičko-mehaničkih i tehnoloških svojstava:

Specifična težina mermera i granita. Ispitivanjem uzoraka granita i mermera oblika kocki dobijene su srednje vrednosti specifičnih težina, pri čemu je merenje ponavljano tri puta respektivno (tabela 1):

Specifična težina γ

Tabela 1

	Dimenzije			Masa uzorka	Zapremina uzorka	Specifična težina
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>			
Granit	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[cm ³]	[kN/m ³]
“Jošanica”	50.00	50.00	49.00	375.16	122.50	30.04
“Bukovik”	50.00	50.00	48.00	312.17	120.00	25.22
Mermer						
“Venčac beli”	50.00	50.00	48.00	322.92	120.00	26.40
“Plavi tok”	49.00	50.00	48.00	319.59	117.60	26.66

Čvrstoća na pritisak. Čvrstoća na pritisak pri jednoaksijalnom opterećenju je, zapravo, odnos sile koja je dovela uzorak do loma i površine uzorka koja je bila izložena dejstvu sile. Ispitivanje ovog mehaničkog svojstva vrši se, po pravilu, na probnim uzorcima pravilnog oblika, valjaka ili kocke, različitih dimenzija, iz uslova da je odnos visine i prečnika valjka za čvrste stenske materijale 1, a za plastične materijale 2. Za razmatrane materijale je prikazana u tabeli 2.

Čvrstoća na pritisak σ_c

Tabela 2

Dimenzije		Sila koja dovodi do loma	Površina poprečnog preseka	Čvrstoća na pritisak
<i>a</i> [mm]	<i>h</i> [mm]	<i>F</i> [N]	<i>A</i> [m ²]	σ_c [MN/m ²]
Granit “Jošanica”				
50	50	600000	0.0025	240.00
Granit “Bukovik”				
49	49	262000	0.002401	109.12
Mermer “Venčac – beli”				
50	50	172000	0.0025	68.80
Mermer “Plavi tok”				
50	50	196000	0.002475	79.19

Čvrstoća na zatezanje. Čvrstoća na zatezanje probnog tela oblika kocke određuje se kao: $\sigma_t = 0,734 \cdot \frac{F}{d \cdot a}$, gde je: *d*[m] - dijagonala kvadrata, osa simetrije kocke i *a*[m] - stranica kocke, a vrednosti za navedene materijale date su u tabeli 3.

Čvrstoća na zatezanje σ_t

Tabela 3

Dimenzije		Sila koja dovodi do loma	Površina poprečnog preseka	Čvrstoća na istezanje
<i>a</i> [mm]	<i>b</i> [mm]	<i>F</i> [N]	<i>A</i> [m ²]	σ_t [MN/m ²]
Granit “Jošanica”				
50	50	60000	0.003405995	17.62
Granit “Bukovik”				
50	50	35000	0.003405995	10.28
Mermer “Venčac – beli”				
50	50	33000	0.003405995	9.69
Mermer “Plavi tok”				
50	50	28000	0.003405995	8.22

Ispitivanje mikrotvrdoće ukrasnog kamena “Knoop” metodom. Merenje mikrotvrdoće *Knoop* metodom vrši se utiskivanjem dijamantskim utiskivačem sa piramidalnim vrhom koji na površini materijala ostavlja romboidalni otisak sa lako merljivom dužom dijagonalom. Rezultati mikrotvrdoće po *Knoop-u* navedenih vrsta kamena prikazani su u tabeli 4.

Uzorak	NK	NK25	NK50	NK75	NK75/NK25
Granit "Jošanica"	4166	2000	4300	200	3.1
Granit "Bukovik"	3566	1900	3900	4900	2.6
Mermer "Venčac-beli"	2766	1800	2700	3800	2.1
Mermer "Plavi tok"	3066	2100	3100	4000	1.9

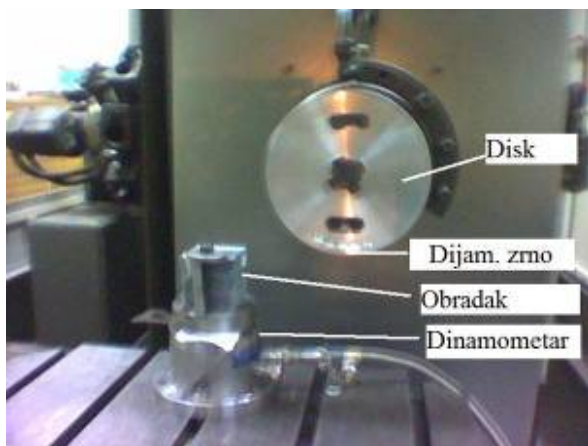
Dobijeni rezultati ukazuju da relativno jednobraznu tvrdoću imaju mermer "Venčac beli" i mermer "Plavi tok", što je u saglasnosti sa malim razlikama u tvrdoći glavnih minerala koji grade ova vrste kamena.

4.5 Izvođenje procesa mikrorezanja granita i mermera sa lokaliteta RS

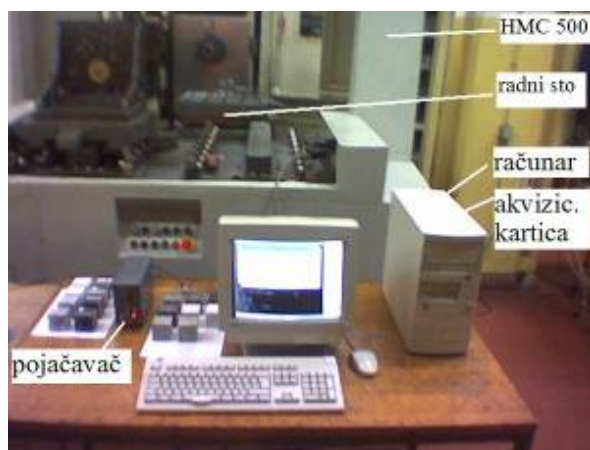
Važan aspekt ovoga istraživanja je da rezultati eksperimenta budu primenljivi za proces brušenja. Eksperiment mikrorezanja je izvođen na uzorcima postavljenim na stendu, koji se nalazi na mašini HMC 500. Obradak je oblika kocke stranice $a = 50$ mm, gde su sve strane predhodno ispolirane. U prva dva eksperimenta obradak stoji pod nagibom 1:90, a u preostalim pod nagibom 1:190, gde visinska razlika na polovini dužine odgovara maksimalnoj dubini rezanja. U trećem eksperimentu obrađivana površina je postavljena paralelno u odnosu na dinamometar. Dijamantsko zrno je oblika konusa sa uglom pri vrhu od 120° . Postavlja se i učvršćuje kruto na aluminijumski disk na rastojanju $r_z=75$ mm, koji je dinamički balansirani na specijalnom uređaju. Na radnom stolu HMC 500 postavlja se dinamometar i na njega uzorci od kamena na kojima se izvodi proces mikrorezanja. Pomoćnim kretanjem radnog stola brzinom $v_p = 5$ m/min uspostavlja se proces mikrorezanja sa promenom dubine rezanja. Kod eksperimenta mikrorezanja sa glavnim uzdužnim translatornim kretanjem brzine radnog stola iznosile su: $v_p = 1 - 2 - 4 - 5$ m/min. Obimne brzine tocila kod ostalih eksperimenata iznosile su: $v_s = 7,85 - 11,1 - 17,7 - 22$ m/s.

Za izvođenje eksperimenta korišćeni su sledeći merni pribori i uređaji (slike 17 i 18):

- dvokomponentni dinamometar Kistler 9271 posredstvom koga je merena komponenta otpora prodiranja F_n
- pojačavač tipa Kistler 5007
- akviziciona kartica $\pm 10V$, 105 kHz
- računar Intel Pentium II, sa operativnim sistemom Quinex za zapis podataka merenja u realnom vremenu
- Laptop računar, HP Compaq nx9010 Intel Pentium IV za grafički prikaz dijagrama otpora rezanja F_n
- Laserski mikroskop LSM 510 sa Axioskop F32mot konfokalnom sekcijom, proizvođač Carl Zeiss, za merenje tragova i veličine prslina pri mikrorezanju.



Slika 17. Mikrorezanje izdvojenim dijamantskim zrnom



Slika 18. Izgled platforme sa mernom opremom za izvođenje eksperimenta

4.6 Analiza uticaja brzine rezanja i dubine rezanja na sile nastale pri mikrorezanju

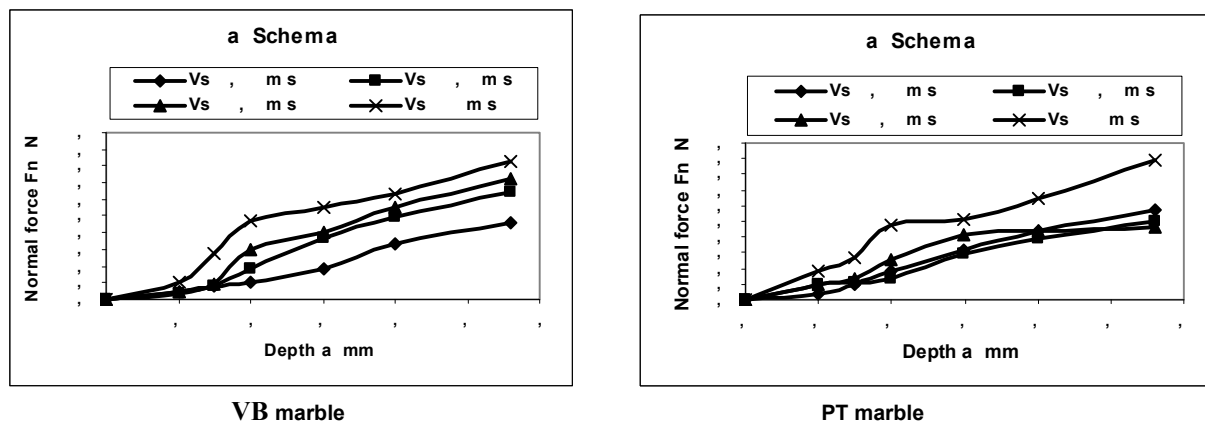
Primena dijamanta, kao abrazivnoga materijala, u poređenju sa ranije korišćenim abrazivnim materijalima, ograničena je, pre svega, relativno visokom cenom i odsustvom jasnih preporuka u pogledu izbora karakteristika toga alata i optimalnih režima za konkretne uslove obrade. Zato je neophodno analizirati pojave nastale u zoni kontakta alata sa obrađivanim materijalom, a to podrazumeva:

- određivanje uslova maksimalnog intenziteta skidanja materijala dijamantskim zrnom i

b) utvrđivanje normalne komponente otpora rezanja, koja deluje na dijamantsko zrno u zavisnosti od uslova njegovog rada, oblika i fizičkomehaničkih svojstava obrađivanoga materijala.

Na slici 19 prikazan je dijagram zavisnosti promene komponente otpora rezanja (F_n) u funkciji dubine prodiranja zrna pri mikrorezanju mermera, a na slici 20 granita.

Na osnovu dobijenih zavisnosti zaključuje se da sa porastom brzine prodiranja zrna raste otpor rezanja kod obe vrste mermera s tim da je veći pri obradi mermera PT u odnosu na VB, a kao posledica veće tvrdoće i čvrstoće.



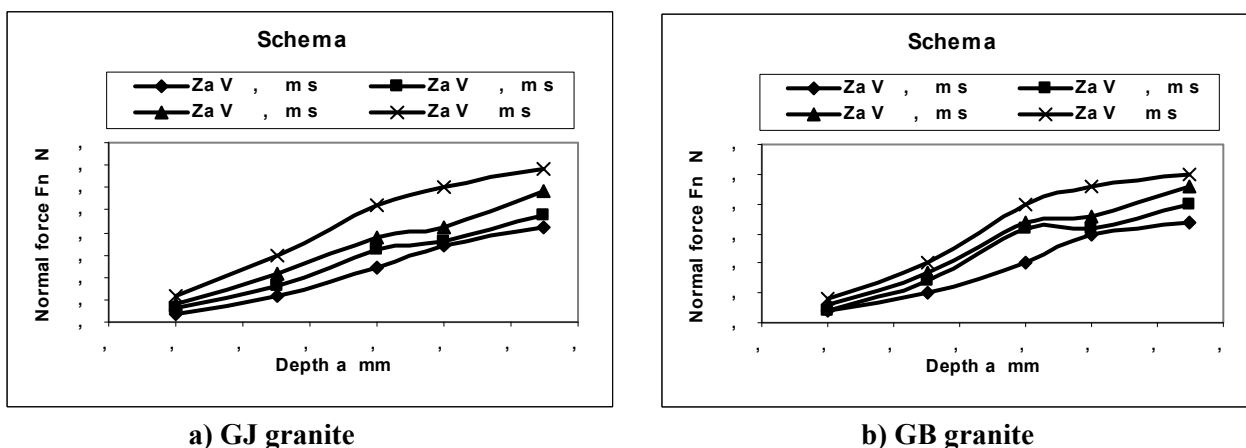
Slika 19. Promena komponente otpora rezanja F_n pri mikrorezanju mermera “Venčac beli- VB marble ” i “Plavi tok- PT marble ” u funkciji brzine i dubine prodiranja zrna

Nelinearnost promene F_n je posledica nejednorodnosti mermera. Takođe, povećanjem dubine prodiranja zrna povećava se sila rezanja uz konstataciju da na mestima gde postoji pad to je posledica prisustva meke faze u mermeru, ili manje stvarne dubine prodiranja nastale kao posledica prisustva mikroudubljenja od prethodne obrade.

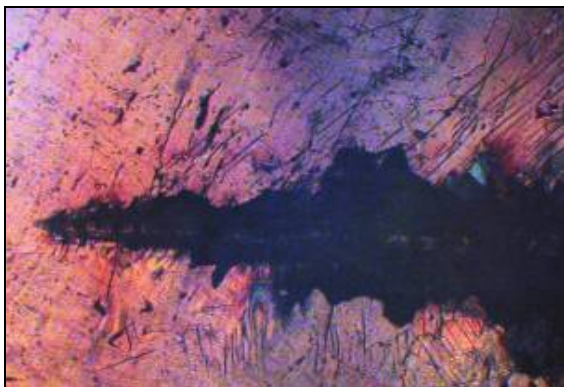
Prisustvo plastičnih deformacija pri mikrorezanju mermera VB je manje izraženo u odnosu na PT za sve šeme mikrorezanja, što se odnosi i na prisustvo radijalnih prslina. Pri dubini prodiranja reznog zrna $a=0.05$ mm u mermeru VB izmerene su radijalne prsline u dužini 0.35-0.38 mm.

Pri obradi mermera PT već pri dubini prodiranja zrna od 0.02 mm dolazi do krzanja duž traga zrna, što nije slučaj sa obradom mermera VB, kod koga se ova pojava uočava pri dubini 0.025 mm (slika 21).

Kod obe vrste mermera, povećanje brzine dovodi do porasta radijalnih prslina i krzanja duž traga reznog zrna, što dovodi do smanjenja granične dubine prodiranja zrna. Porast brzine rezanja $V_s = 7.85-11.1$ m/s kod mermera VB dovodi do smanjenja granične dubine sa 0.030 mm na 0.025 mm.



Slika 20. Promena komponente otpora rezanja F_n pri mikrorezanju granita “Jošanica- GJ granite ” i “Bukovik- GB granite ” u funkciji brzine i dubine prodiranja zrna



Slika 21. Nastanak krtog razaranja pri mikrorezanju mermera „Plavi Tok“ brzinom $v=7,85$ m/s sa povećanjem dubine prodiranja zrna (uvećanje 63 x)

Granit GB ima manju tvrdoću u odnosu na GJ, pa su pri mikrorezanju, pri jednakim dubinama prodiranja, manje izražene radijalne prskotine kod GB za obe šeme mikrorezanja. Analizom tragova na granitu zapaža se izraženije krzanje kod GB, kao posledica krupnije strukture i većeg izvaljivanja zrna (slika 22).

Merenjem je utvrđena granična dubina prodiranja zrna kod GJ od 0.020mm ($V_s=7.85$ m/s) i da se ona smanjuje na 0.015 mm, sa porastom brzine na 15.7 m/s. Radijalne prskotine, pri graničnoj dubini prodiranja, imaju dužinu 0.35 – 0.30 mm, za navedeni opseg brzina prodiranja.

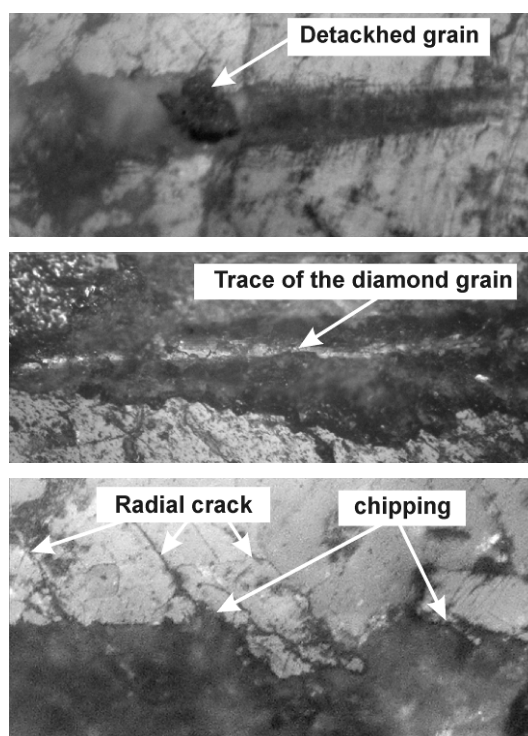
Pri istim uslovima prodiranja, kod GB granična dubina prodiranja je nešto veća i kreće se od 0.022mm ($V_s= 7.85$ m/s) do 0.018 mm ($V_s=15.7$ m/s), a izmerene dužine radijalnih prskotina 0.28-0.23 mm.

Zaključci o rezultatima u aktivnosti 4

Sumirajući izvedena istraživanja, moguće je konstatovati da je realizovan pristup višeparametarskog razvoja i primene dijamantskih alata u tehnologiji obrade brušenjem mermera i granita.

Prikazan je naučno baziran model za rešavanje problema određivanja optimalnih vrednosti režima obrade brušenja kamena uz primenu eksperimentalnih ispitivanja. Karakteristike ovog modela su sledeće:

- Eksperimentalno utvrđena fizičko-mehanička svojstva kamena potvrđuju svoje srazmerno učešće u obradljivosti ovih materijala.
- Režim brušenja pokazuje veliki uticaj na promenu izlaznih karakteristika procesa brušenja F_n , tako da dubina ima najveći, a brzina rezanja manji uticaj
- Dobijene funkcije obradljivosti pri mikrorezanju granita "Jošanica", "Bukovik" i mermera "Venčac Beli" i "Plavi Tok", mogu se usvojiti za opisivanje promena komponenti otpora pri daljoj analizi brušenja, u razmatranim oblastima varijacije režima obrade i mogu poslužiti za upravljanje procesom brušenja navedenih vrsta mermera i granita.



Slika 22. Fenomeni procesa mikrorezanja GB granita

5. MODELIRANJE I RAZVOJ KONCEPTA DIGITALNOG KVALITETA U DIGITALNOJ KOMPANJI

Digitalno inženjerstvo predstavlja paradigmu modeliranja inženjerskih sistema na početku ovog veka. Proizvod se posmatra u životnom veku, a njegov digitalni model se posmatra integrisano (projektovanje, planiranje, proizvodnja, korišćenje, povlačenje iz upotrebe). Lanci snabdevanja se odnose na prva tri elementa integrisanog digitalnog modela. Naša istraživanja se odnose na razvoj inteligentnog CAI modela, čija osnovna stuktura obuhvata: bazu znanja, inference engine, interpreter ulaza i izlaza, kao i korisnički interfejs. Ove godine naša istraživanja su bila orijentisana na razvoj modela baze znanja. Na odabranim primerima su testirani elementi EO za prizmatične delove, koji imaju tolerancije: dužina, oblika, položaja i uglova, a urađeni su korišćenjem sofvera *protege*. Takođe se posebno napominje da su ova istraživanja deo EU programa Manufuture, koji naša zemlja realizuje kroz kolaborativna istraživanja Manufuture Serbia, kao i poznate svetske naučne organizacije: CIRP, IFIP i IMEKO. Ovde su, u skraćenom obliku, prikazani

ostvareni rezultati, koji su prikazani i na međunarodnim konferencijama u organizaciji, ili pod pokroviteljstvom CIRP-a, IFIP-a i EU Manufuture Programa.

5.1 Cilj istraživanja

Razvoj inteligentnog sistema za CAI (Computer aided inspection) na numerički upravljanim mernim mašinama (NUMM) se zasniva na razvoju koncepta baze znanja zasnovanog na inženjerskoj ontologiji (EO). U ovom istraživanju EO razvoj baze znanja se koristi u dva prilaza. Prvi, ili ontološki prilaz, sastoji se od sagledavanja realnih primena nove paradigme - koncepta nazvanog inženjerska ontologija u domenu proizvodne metrologije, dok drugi ili geometrijski, odnosi se na analizu geometrije mernih delova na NUMM kroz definisanje i opis osnovnih geometrijskih primitiva u obliku pogodnom za potpun opis u metrološkom smislu. Zadatak ontološkog prilaza je da definiše domen, u ovom slučaju koordinatna metrologija, a zatim klase, individue i osobine klasa i individua domena. Globalno, geometrijski pristup predstavlja most između CAD i CAI, koji se naziva CAIP. Cilj istraživanja je razvoj inteligentnog sistema za CAI kroz integraciju rezultata ova dva prilaza.

Trenutni pristupi pretraživanju, deljenju i ponovnoj upotrebi inženjerskih informacija baziran na statističkim metodama i ključnim rečima su neefikasne u razumevanju inženjerskih sadržaja, jer oni nisu dizajnirani da budu direktno primenjeni na inženjerski domen. Na osnovu sprovedene analize trenutnog stanja metodologija za razvoj EO u sprovedenim istraživanjima je predložen postupak razvoja EO na konceptualnom nivou u šest koraka, u cilju razvoja nove metodologije za razvoj EO. Prilikom kreiranja koncepta akcenat je na definisanju osnovnih komponenti EO, kao što su klase, individue i osobine.

U sprovedenim istraživanjima su definisani metrološki primitivi kao klase ili koncepti inženjerske ontologije u domenu proizvodne metrologije u cilju razvoja (armature oko koje će se graditi baza znanja za metrološke informacije o idealnoj geometriji u odnosu na koordinatni sistem mernog dela) informacionog modela za CAI zasnovanog na EO.

Ontološki prilaz. U odnosu na filozofiju, pojam ontologije u inženjstvu ima drugačije značenje i prvenstveno se odnosi na predstavljanje znanja. Pored potrebe za ponovnom upotrebom znanja jedne oblasti, javlja se i potreba za deljenjem znanja između više različitih korisnika, najčešće softverskih agenata. Istraživanja u oblasti veštačke inteligencije i predstavljanja znanja, pojam ontologije vezuju za mogućnost ponovne upotrebe i deljenja znanja neke oblasti, istučući da je osnovna namena inženjerske ontologije (EO) prenos i razmena znanja. Međutim jedno je izvesno, ontologija je pronašla svoje mesto u oblastima u kojima je semantika baza komunikacije među ljudima i sistemima. Neki od razloga koji podstiču razvoj metodologija za razvoj EO, pa samim tim i EO, su:

- inženjeri danas retko čine napor da pronađu inženjerske sadržaje izvan pretrage preko ključnih reči, istovremeno sve više ignorišući ponovnu upotrebu znanja zato što odgovarajući alati za pretragu inženjerskih informacija nisu dovoljno razvijeni.
- u industrijskom sektoru, projektanti provode 20-30% vremena u komunikaciji i preuzimanju informacija.

Osnovni cilj ontološkog prilaza je da razmatri trenutno stanje razvoja EO i predlaži postupak njenog razvoja na konceptualnom nivou u domenu proizvodne metrologije.

Geometrijski prilaz. Kao što je poznato, merni predmeti čije se merenje ili inspekcija vrši na NUMM određeni su idealnom i realnom geometrijom. Idealna geometrija sa stanovišta proizvodne metrologije (merenja delova u proizvodnji) definisana je CAD modelom mernog predmeta i opisana osnovnim metrološkim primitivima: tačkom, pravom, krugom, ravni, sferom, cilindrom, konusom, elipsom i torusom. Složeni i izvedeni geometrijski oblici se dobijaju komponovanjem osnovnih metroloških primitiva. S druge strane, realna geometrija predstavlja stvarni oblik mernog predmeta. Opisivanje tolerancija dužina, uglova, oblika i položaja se vrši preko navedenih osnovnih metroloških elemenata idealne geometrije. Stvarna mera se dobija kao rezultat poređenja realne i idealne geometrije. Poređenje ove dve geometrije predstavlja i osnovu razvoja softvera za NUMM. Geometrijske podloge na kojima se zasniva većina softvera za NUMM su osnovni metrološki primitivi. Suština metrološkog softvera je interpretacija metroloških primitiva u obliku koji je pogodan za njihovu identifikaciju.

Kao što je poznato proces merenja na NUMM se zasniva na korišćenju četiri koordinatna sistema: merne mašine, mernog senzora i mernog predmeta (dva). Za geometrijski pristup bitan je i koordinatni sistemi merenja mernog predmeta koji je nosilac jednog dela metroloških informacija jer se pomoću njega opisuje položaj i orijentacija svih idealnih metroloških primitiva koje sadrži jedan metrološki deo.

5.2 Rezultati istraživanja

Ključni rezultati do kojih se došlo nakon sprovedenih istraživanja su metod za razvoj EO u domenu proizvodne metrologije i opis geometrijskih primitiva kao koncepata inženjerske ontologije.

Predloženi metod razvoja EO. Ontološko inženjerstvo je još uvek u ranoj fazi razvoja i da još uvek nema detaljno razrađene metodologije razvoja ontologije, kao i karakteristike ontologije koje treba imati u vidu pri razvoju ontologije. U pogledu metodologije za razvoj ontologije karakteristično je da većina istraživačkih grupa pre nego što razvije ontologiju napravi svoju metodologiju, tako da predloženi koncept razvoja svake metodologije može biti prihvaćen tek nakon razvoja ontologije i njene uspešne primene. Sumarno trenutne metode za razvoj ontologije zahtevaju velike napore u cilju njihove integracije od onih koji se bave njenim razvojem, usvajanjem i odražavanjem. Veoma malo pokušaja je napravljeno ka sistematizovanom ocenjivanju kompletnosti i tačnosti postojećih ontologija. Kao što je rečeno, razvoju EO predhodi razvoj metodologije ili postupka po kome se razvija IO. U ovim istraživanjima definisan je postupak razvoja jedne edukacione inženjerske ontologije u sedam koraka i izvršena je implementacija u softverskom paketu *Protege*. Pre nego što se krene u definisanje korak po korak, treba definisati osnovne ekomponente EO. Osnovne komponente EO su:

- individue,
- osobine,
- klase.

Prema tome, razvoj ontologije je iterativan proces, koji u praktičnom smislu obuhvata definisanje klasa i hijerarhije klasa gde klasa opisuje koncepte određene oblasti i može se sastojati iz jedne ili više podklasa, kao i definisanje osobina i individua određenog domena.

Korak 1: Određivanje oblasti i obima ontologije – obuhvata definisanje:

- domena ontologije,
- cilja/svrhe ontologije,
- načina održavanja.

Jedan od načina da se utvrdi obim ontologije jeste da se napravi lista pitanja na koja bi baza znanja na osnovu ontologije trebalo da da odgovore. Ova pitanja kasnije treba da daju odgovor na: Da li ontologija sadrži dovoljno informacija za odgovore na ova pitanja? Da li odgovori na zahtevaju posebni nivo detalja ili zastupanje određene oblasti? Odgovori na ova pitanja pomažu da se poboljša ontologija u ranim fazama razvoja i da se ograniči obim informacionog modela određenog domena.

Korak 2: Razmotriti mogućnosti postojećih ontologija: odnosi se na analizu mogućnosti prilagođavanja ili usvajanja razvijenih IO, pre svega sa stanovišta obima i domena primene.

Korak 3: Nabranje bitnih termina odabranog domena: u ovom delu razvoja IO potrebno je nabrojati sve moguće termine koji će se koristiti u razvoju ontologije. Ovaj korak predstavlja pripremu za sledeća dva koraka koji su jedni od najvažnijih koraka u razvoju jedne ontologije. Naime, jedan deo ovih termina postaće nazivi klasa dok preostali naziv osobina pojedinih klasa, a jedan deo će ostati neupotrebljen jer se ispostavlja da zbog ograničenja obima nisu bitni.

Korak 4. Definisane klase i njihove hijerarhije.

Korak 5. Definisane individua i osobina: kao što je rečeno, jedan deo definisanih termina će predstavljati osobine klasa. Osobina je relacija između dve individue i one mogu biti ili tranzitivne ili simetrične. Često se nazivaju i slotovi. Nastale kao posledica činjenice da sama klasa neće obezbediti dovoljan sadržaj informacija, opisuju unutrašnju strukturu koncepata.

Individue predstavljaju objekte oblasti od interesa i predstavljaju najniži mogući nivo predstavljanja u ontologiji. U istraživanjima se definišu dva glavna tipa osobina, i to osobine objekata i osobine podataka. Osobine objekata su relacije između dve individue i one mogu biti:

- Inverzne osobine: svaka osobina objekta može imati odgovarajuću inverznu osobinu. Ako neka osobina vezuje individuu a sa individuom b , kaže se da je njena inverzna osobina osobina koja vezuje individuu b sa individuom a .
- Funkcionalne osobine: ako je osobina funkcionalna, za datu individuu, tada može imati najviše jednu individuu koja je u relaciji sa tom individuom preko te osobine.
- Tranzitivne osobine: ako je osobina tranzitivna, i osobina relacija između individua a i b , kao i između individua b i c , onda možemo zaključiti da je individua a u relaciji sa individuom c preko osobine P .

- Simetrične osobine: ako je osobina P simetrična, i osobina relacije između individua a i b , onda je individua b takođe u relaciji sa individuom a preko osobine P . Ako je osobina tranzitivna onda je njena inverzna osobina takođe tranzitivna. Ako je osobina tranzitivna onda ona ne može biti funkcionalna.
- Antisimetrične osobine: ako je osobina P antisimetrična, i osobina relacije između individua a i b , onda individua b ne može biti u relaciji sa a preko osobine P .
- Osobina refleksije: za osobinu P se kaže da je refleksivna kada je ona relacija samo osobine a .
- Antirefektivne osobine: ako je osobina P antirefektivna, može se opisati kao osobina koja je relacija između individua a sa individuom b , gde individua a i individua b nisu iste.

Osobine mogu biti različitog tipa, npr. brojna vrednost ili string itd. Pod aspektim osobina podrazumevamo sledeće: (i) **Kardinalnost**: Pojam kardinalnosti u ovom kontekstu definiše koliko različitih vrednosti može imati jedna osobina. Neki sistemi prave razliku između jednostruke i višestruke kardinalnosti. (ii) **Tip osobina**: *string* je najjednostavniji tip osobine, a sastoji se iz nisa brojačanih ili slovničkih simbola; *broj* opisuje osobine sa numeričkim vrednostima; *Bulove operacije* kao što su „da“ i „ne“; *osobina* koja je deo lanca nabiranja, npr. treća, peta itd; i *slučajevi*.

Korak 6. Kreiranje instansi: zadnji korak u razvoju ontologije se odnosi na kreiranje pojedinačnih instansi klasa. Definisane pojedinačnih instansi zahteva: (1) izbor klasa; (2) kreiranje pojedinačnih instansi tih klasa; (3) određivanje tipa osobine.

Definisanje geometrijskih primitiva kao klasa EO. Kao što je rečeno, idealna geometrija metrološkog modela dela se dobija uz pomoć osnovnih metroloških primitiva ili idealnih geometrijskih oblika, koji su određeni svojim parametrima. Ovi parametri jednoznačno određuju svaki metrološki primitiv u odnosu na koordinatni sistem mernog predmeta. Skup ovih parametara predstavlja skup metroloških informacija o idealnoj geometriji u odnosu na koordinatni sistem mernog dela.

Polazeći od pretpostavke da se osnovni metrološki primitivi mogu predstaviti kao koncepti ili klase inženjerske ontologije na primeru metrološkog modela dela koji sadrži sve osnovne metrološke primitive predstavljen je njegov opis sa aspekta inženjerske ontologije. Drugim rečima, data je mini – ontologija odnosno ontologija metrološkog dela, kako bi se ispitalo šta su potencijalne osobine i individue ako se zna šta su klase ili koncepti.

Model informacija o idealnoj geometriji zasnovan na ontološkom pristupu se može podeliti na:

- skup metroloških informacija o idealnoj geometriji u odnosu na koordinatni sistem mernog dela,
- skup metroloških informacija o izvedenim geometrijskim karakteristikama na mernim predmetima (skup informacija o odnosima između koordinatnog sistema zadatka i koordinatnog sistema mernog predmeta).

5.3 Zaključak i dalja istraživanja

Istraživanja izvršena ove godine, dozvoljavaju nam da definišemo sledeće zaključke: (i) za bazu znanja inteligentnog CAI modela moguće je koristiti OE i razviti poseban koncept metroloških karakteristika kao više-nivovski model, (ii) iz CAD modela proizvoda se mogu definisati geometrijski primitivi, koji čine bazu za razvoj metroloških primitiva, i (iii) integracijom geometrijsko-metroloških primitiva, definiše se koncept baze znanja za ovaj model, kao deo integrisane baze znanja u lancu snabdevanja inženjerskog proizvoda.

U sledećoj godini naša istraživanja će biti usmerena ka: (i) geometrijskom strukturisanju CAD modela proizvoda radi definisanja geometrijskih karakteristika, i (ii) razvoju koncepta automatskog generisanja/pretraživanja OE za kompleksne inženjerske proizvode, klase krivih linija i površina. Sve ovo će biti deo integrisanog digitalnog modela proizvoda, u njegovom životnom veku.

6. IZJAVA ZAHVALNOSTI

Predstavljeni rezultati istraživanja su nastali tokom realizacije projekta tehnološkog razvoja Razvoj nove generacije domaćih obradnih sistema, koji je podržan od strane Ministarstva za prosvetu i nauku Vlade Republike Srbije.

7. ZAKLJUČAK

Osnovni cilj ovih istraživanja je ojačavanje tehnologija u domaćim malim i srednjim preduzećima, radi podizanja konkurentnosti privrede Republike Srbije. Dati su prikazi *očekivanih ključnih rezultata* i *značaja istraživanja*, kao glavnih elemenata, pomoću kojih se mogu opisati ciljevi istraživanja u ovom projektu.

Očekuje se doprinos tehničkom progresu, koji je nezamisliv bez novih koncepcija mašina i alata i bez usavršavanja tehnologija obrade. Republika Srbija može da ima proizvodne kapacitete za proizvodnju mašina alatki i reznog alata. Uz primenjenu nauku i sistematizovano znanje treba da podigne privredu na kvalitativno viši nivo, koji će biti baziran na znanju, što je definisano Strategijom održivog razvoja Republike Srbije. Ova istraživanja i razvoj nove generacije obradnih sistema treba da doprinesu podizanju tehnološkog nivoa i konkurentnosti domaće industrije, naročito u inovativnim malim i srednjim preduzećima, koja su već iskazala interes za ove sisteme. Ciljevi ovog projekta su sledeći 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. Pripremaju se sledeći ključni rezultati: (1) Kompleksni program izlaska industrije Srbije na strana tržišta. (2) Program revitalizacije industrije mašina alatki u Srbiji. (3) Savremeni obrazovno-istraživački centri. (4) Laboratorijski prototip stone petoosne mašine alatke nove generacije. (5) Mini laboratorijska i edukaciona stona troosna glodalica sa paralelnom kinematikom. (6) Laboratorijski prototip DELTA robota sa 3+1 stepen slobode. (7) Mreža centara tehnološke izvrsnosti u obradi čelika, keramike, abraziva i supertvrđih sintetičkih materijala. (8) Sistem specijalizovanih proizvođača alata različitih oblika, konkurentnih na svetskom tržištu po tehničkom i intelektualnom nivou. (9) Stend za izvođenje procesa mikrorezanja i za sistem analizu obradljivosti raznorodnih materijala. (10) Konstruktivno-tehnološki centri savremenog kompjuterskog projektovanja i programiranja. (11) Jezik i formalna ontologije za rešavanje problema proizvodnog preduzeća iz domena kvaliteta, kao i integracija sa drugim ontologijama. (12) Model digitalne kompanije i njen digitalni model kvaliteta, kao preventiva u otklanjanju interoperabilnosti između pojedinih podsistema kompanije u pogledu kvaliteta.

Značaj istraživanja u ovom projektu je u razvoju i implementaciji jedne strategije bazirane na istraživanju i inoviranju radi ubrzavanja reinženjeringa industrije putem uvođenja nove generacije obradnih sistema. Cilj je doprinos razvoju domaće industrije bazirane na znanju i uključivanje u aktuelne programe istraživanja u svetu.

Lj. Tanović, P. Bojanić, M. Glavonjić, D. Milutinović, V. Majstorović, R. Puzović,
B. Kokotović, M. Popović, S. Živanović, N. Slavković, G. Mladenović, S. Stojadinović

The development of a new generation of domestic machining systems The results of research activities in 2011.

Resume

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 2011.

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