

**UNIVERZITET U BEOGRADU
MAŠINSKI FAKULTET
Kraljice Marije 16**

**METODA ZA PREPOZNAVANJE KONTAKTNIH STANJA U ROBOTIZOVANOJ
MONTAŽI**

Beograd, 2012. godina.

Vrsta tehničkog rešenja	Nova metoda (M85)
Autori tehničkog rešenja	Doc. dr Živana Jakovljević, dipl. ing. maš., Prof. dr Petar B. Petrović, dipl. ing. maš., Vladimir Miković, dipl. ing. maš., Nikola Lukić, dipl. ing. maš., Ivan Danilov, dipl. ing. maš.
Naziv tehničkog rešenja	Metoda za prepoznavanje kontaktnih stanja u robotizovanoj montaži
Za koga je rađeno tehničko rešenje	Tehničko rešenje je razvijeno u okviru projekta Inteligentni tehnološki sistemi za ekstremno diverzifikovanu proizvodnju– TR35007
Ko koristi tehničko rešenje	Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu
Godina realizacije tehničkog rešenja	2012.
Verifikacija rezultata	Od strane recenzenata: Prof. dr Janko Hodolič, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad Prof. dr Miroslav Pilipović, Mašinski fakultet Beograd
Ko je prihvatio tehničko rešenje	Mašinski fakultet u Beogradu
Primena rezultata	Januar 2012.

1. OBLAST NA KOJU SE TEHNIČKO REŠENJE ODNOSI

Proces spajanja je jedan od osnovnih procesa u montaži. On predstavlja spajanje pokretnog dela (koji pokreće čovek/operator, robot ili neki drugi uređaj) i objekta iz okruženja. Tokom robotizovanog spajanja mogu se razlikovati gruba i fina kretanja. Grubim kretanjima se delovi premeštaju preko distanci koje su velike u odnosu na ili su reda veličine dimenzije samih delova. Tokom ovih kretanja delovi nisu u dodiru i nema potrebe za visokom tačnošću kretanja.

Fina kretanja, s druge strane predstavljaju samo spajanje delova. Tokom finih kretanja delovi su najčešće u kontaktu i male greške, reda veličine zazora, mogu dovesti do pojave izuzetno velikih sila interakcije, što može rezultirati velikim poremećajima ili čak dovesti do prekida i nemogućnosti završetka procesa spajanja. Ove greške su najčešće toliko male da se ne mogu vizuelno uočiti, ali se mogu haptički osetiti. Za uspešno izvođenje grubih kretanja može se koristiti vizuelna povratna sprega, ali za upravljanje finim kretanjima pri spajanju delova sa malim zazorima vizuelna povratna sprega nije u mogućnosti da vodi proces jer čak i male greške u poziciji mogu blokirati proces spajanja. Iz navedenog razloga se u ovim slučajevima koristi povratna sprega po sili.

Tokom procesa spajanja u okruženju robota su inherentno prisutne značajne neodređenosti koje dovode do grešaka tokom finih kretanja. Ove neodređenosti su prvenstveno geometrijskog (npr. tolerancije delova, poza objekta iz okruženja u odnosu na robot, poza hvatača na robotu, klizanje pokretnog objekta u hvataču), dinamičkog (npr. krutost sistema, elastičnost delova u kontaktu, neodređenosti u modelu trenja) i upravljačkog (netačnost ostvarene pozicije robota) porekla. Kako bi se ostvarilo spajanje delova u ovakvom okruženju, najpovoljnije rešenje predstavlja aktivno popustljivo kretanje robota.

Umesto da slepo prati unapred definisanu geometrijsku trajektoriju, korišćenjem aktivnog popustljivog kretanja, robot počinje da simultano prati trajektoriju sile koja je definisana zakonom upravljanja po sili. Korišćenjem ovakvog upravljačkog algoritma robot može optimalno izvršiti različite zadatke bez promene hardvera koja je neophodna prilikom upotrebe pasivne popustljivosti korišćenjem RCC jedinice na primer.

Spajanje delova je izuzetno nelinearan dinamički proces. Veliki broj dosadašnjih istraživanja je sproveden u oblasti modeliranja i upravljanja nelinearnim sistemima. Korišćene su neuronske mreže, fazi logički sistemi, genetski algoritmi, itd. Međutim, predložene metode se u slučaju spajanja delova ne mogu direktno primeniti iz više razloga. Pre svega, analitički model sistema za spajanje nema jedinstvenu strukturu. Opšti model se sastoji iz skupa analitičkih relacija of kojih svaka opisuje određeno kontaktno stanje. Tokom spajanja delova, kontaktna stanja se usled prisutnih neodređenosti praktično proizvoljno menjaju. Stoga je sveukupni analitički model procesa spajanja promenljiv i diskontinualan. Specifičnost sistema za spajanje delova je u tome da njegov analitički model ima promenljivu strukturu koja nije unapred poznata. Njegova struktura se može odrediti tek kada se prepoznaju kontaktna stanja i njihovi prelazi. U realnom vremenu važeći su samo parcijalni modeli u zavisnosti od trenutnog kontaktnog stanja. Stoga je prepoznavanje trenutnog kontaktnog stanja ključno za uspešno spajanje delova korišćenjem aktivnog popustljivog kretanja.

2. TEHNIČKI PROBLEM

Tokom spajanja delova robot je u interakciji sa okruženjem koje ograničava njegovo kretanje. Kako bi izvršio ovaj zadatak, robot mora delovati u skladu sa silama interakcije. On mora izvršavati popustljivo kretanje koje podrazumeva promenu nominalne trajektorije u zavisnosti od sila interakcije. Aktivno popustljivo kretanje se realizuje korišćenjem povratne sprege po sili. Ono polazi od pretpostavke da svaka kontaktna situacija između pokretnog objekta (PO) i objekta iz okruženja (OO) generiše specifičan odziv u obliku generalisane sile.

Delovi u kontaktu su 3D objekti koji se dodiruju preko elemenata površine (tj. strana, ivica i temena). Kako bi opisali različite kontaktne formacije između delova koji se spajaju, autori u [1] uvode pojam elementarnih kontakata. Usled ekstremnih neodređenosti u procesu spajanja delova nije bilo moguće razlikovati kontaktne formacije na osnovu elementarnih kontakata, pa su u [2] uvedeni osnovni kontakti.

Kako bi se definisalo kontaktno stanje mogu se uvesti sledeće definicije [3]:

Definicija 1: Kontaktno obeležje, CF , se definiše kao topološki element površine objekta u kontaktu koji nije granični element drugog elementa površine u istom kontaktu:

$$CF \stackrel{def}{=} \{f, e, v\}$$

gde je f strana objekta, e je ivica koja nije granična ivica strane u istom kontaktu, v je teme objekta koje nije granično teme ivice ili strane u istom kontaktu.

Definicija 2 [2]: Osnovni kontakt, PC , je određen *jedinstvenim parom* kontaktnih obeležja CF . U skladu sa tim, osnovni kontakt se formuliše i opisuje kao par kontaktnih obeležja:

$$PC = (CF_A^i, CF_B^j)$$

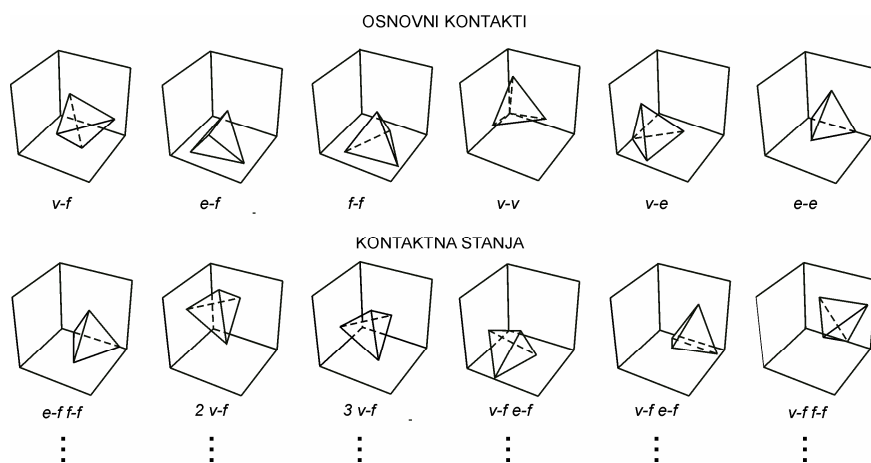
gde su CF_A^i i CF_B^j kontaktna obeležja i i j koja pripadaju objektima A i B .

Definicija 3: Kontaktno stanje, CS , između dva poliedra je skup osnovnih kontakata

$$CS = \{PC_i, PC_j, \dots PC_k\}.$$

Kada su delovi koji se spajaju konveksni poliedri sva moguća kontaktna stanja se sastoje samo od jednog osnovnog kontakta. Kada je bar jedan od delova koji se spajaju konveksan, pojavljuju se kontaktna stanja koja se sastoje od više od jednog osnovnog kontakta, pa je prepoznavanje kontaktnih stanja u ovom slučaju kompleksnije. Generalno, sa svakim osnovnim kontaktom sistemu se oduzimaju dodatni stepeni slobode i zakon upravljanja postaje kompleksniji.

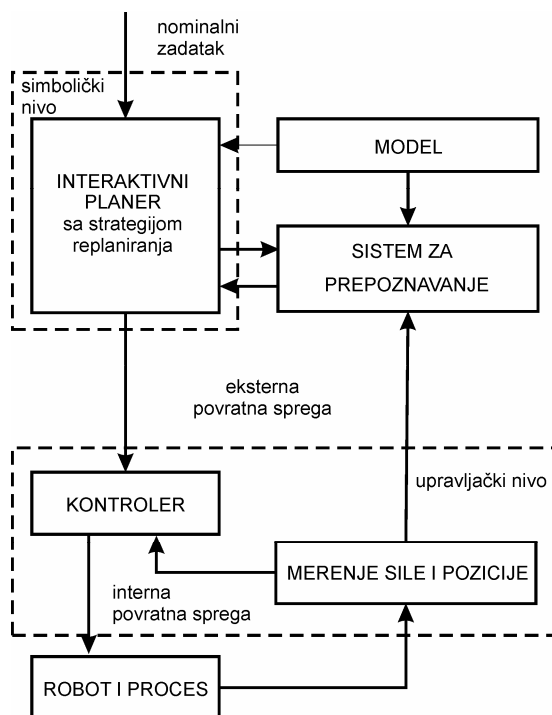
Kao ilustracija, na slici 1 su prikazani neki osnovni kontakti i neka kontaktna stanja između triedra i tetraedra. Čak i za ovako jednostavne delove moguće je identifikovati veliki broj kontaktnih stanja. Za kompleksnije delove broj mogućih kontaktnih stanja je još veći.



Slika 1: Osnovni kontakti i kontaktna stanja pri spajanju triedra i tetraedra

Arhitektura sistema za aktivno popustljivo kretanje robota je prikazana na slici 2. Ona ima sledeće aktivne komponente: 1) interaktivni planer koji može da vrši replaniranje trajektorije u realnom vremenu, 2) sistem za prepoznavanje kontaktnih stanja, 3) kontroler koji izvršava komande za popustljivo kretanje. Pored navedenih aktivnih komponenti, aktivni sistem za popustljivo kretanje robota sadrži model procesa koji uključuje geometrijsku i topološku reprezentaciju objekata, skup njihovih kontaktnih stanja i moguće prelaze između ovih stanja. Pored toga, on sadrži i mehanički model koji daje informaciju o silama koje se mogu generisati tokom popustljivog kretanja.

U aktivnom sistemu za popustljivo kretanje (slika 2) kontroler dobija skup tačaka od planera, poredi ih sa merenjima iz robotskog sistema i proračunava i daje komande za aktuatorne zglobova. On je odgovoran za prevođenje plana u realne akcije robota u njegovom okruženju.



Slika 2. Struktura aktivnog sistema za popustljivo kretanje [3]

Interaktivni planer (slika 2) koji radi na simboličkom nivou kreira plan aktivnog popustljivog kretanja robota. Njegova uloga je da izvrši sintezu trajektorije robota na osnovu kolizionih ograničenja koja su prisutna u procesu. Ograničenja nisu unapred poznata pošto sistem za aktivno popustljivo kretanje radi u polustrukturiranom ili nestruktuiranom okruženju punom neodređenosti. Neophodno je da planer ima mogućnost replaniranja trajektorije na osnovu podataka prikupljenih iz procesa u realnom vremenu.

Kako bi se obezbedila ova povratna sprega na visokom nivou, uvodi se sistem za prepoznavanje kontakta. Njegova uloga je da prepozna kontaktna stanja i da izvrši estimaciju geometrijskih parametara i dinamičkih svojstava okruženja. Sistem za prepoznavanje transformiše senzorske informacije (tj. silu i/ili pozu) u odgovarajuće simbole koji predstavljaju ulaz za planer. On predstavlja interfejs između planera koji upravlja procesom spajanja na visokom simboličkom nivou i kontrolera koji upravlja procesom na nivou povratne sprege. Sistem za prepoznavanje može izvršiti estimaciju geometrijskih i dinamičkih parametara samo ako je kontaktno stanje ispravno identifikovano.

Veliki broj dosadašnjih istraživanja je bio fokusiran na različite komponente sistema za aktivno popustljivo kretanje. Međutim, nedostaju istraživanja koja se odnose na interfejse između ovih komponenata [4, 31]. nedostajuće sprege su: 1) transformisanje izlaza planera u specifikacije niskog nivoa koje si kompatibilne sa kontrolerom, i 2) ugradnja u sistem za prepoznavanje funkcija koje transformišu izmerene signale u kontaktne primitive (kontaktna stanja) koja mogu predstavljati ulaz u planer. Ovo tehničko rešenje upravo daje metodologiju za rešavanje problema prepoznavanja kontaktnih stanja u robotizovanom spajanju.

3. STANJE TEHNIKE

Generalno, sva dosada sprovedena istraživanja u oblasti prepoznavanja kontaktnih stanja u robotizovanoj montaži se mogu podeliti u dve grupe. Jedna grupa istraživanja polazi od analitičkog modela procesa spajanja i korišćenjem statističkih metoda određuje sličnost između stvarne i

modelirane situacije. Drugi pristup polazi od raspoloživosti velike količine podataka i korišćenjem različitih tehnika (npr. neuronske mreže, fazi logika, skriveni Markovljevi modeli) uči kontaktna stanja.

Prve metode za prepoznavanje kontaktnih stanja [1, 5, 6] su polazile od analitičkog modela i bile su zasnovane na razdvajajućim (poliedarskim konveksnim) konusima koji su izvedeni iz geometrijskih i kvazistatičkih modela delova u kontaktu. Drugi pristup [2, 7, 8] je bio zasnovan na pronalazaženju svih mogućih kontakata izgradnjom poliedarskih objekata korišćenjem procenjene neodređenosti njihove lokacije. Najnovija istraživanja se odnose na estimaciju geometrijskih parametara korišćenjem Kalmanovih filtara [9-11], gde se geometrijski parametri procenjuju pod pretpostavkom da je kontaktno stanje poznato. Prelaz između kontaktnih stanja se može identifikovati korišćenjem inkonzistentije izmerenih vrednosti i tekućeg modela [12], a pretpostavlja se da je sledeće kontaktno stanje u skladu sa planom kretanja. Nastavak ovog rada je prikazan u [13] gde je za prepoznavanje kontaktnih stanja korišćen sekvencijalni Monte Karlo metod. Osnovni nedostatak ove metode ogleda se u tome što se kontaktna stanja mogu prepoznati tek kada su kontakti dobro uspostavljeni – nakon isteka dinamičkog regiona na prelazu između kontaktnih stanja. Kao posledica, vreme potrebno za prepoznavanje kontaktnih stanja je veliko.

Metode zasnovane na analitičkom modelu se uglavnom odnose na probleme spajanja kod kojih su oba dela konveksni poliedri, a kontaktna stanja se sastoje samo od jednog osnovnog kontakta. Međutim, kada je jedan od delova konveksan poliedar, kontaktno stanje može imati više od jednog osnovnog kontakta. U ovakvim situacijama sprovedena istraživanja su podrazumevala učenje kontaktnih stanja na osnovu velike količine eksperimentalnih podataka. Primer je problem cilindričnog spajanja. Pošto je cilindrično spajanje široko rasprostranjeno u mehaničkim sklopovima, ono je bilo predmet mnogobrojnih istraživanja. Kako se istraživanje u oblasti prepoznavanja kontaktnih stanja produbljuje, postaje sve više jasno da usled nelinearnosti i istinski dinamičke prirode problema, proces učenja mora uključiti sofisticirane tehnike koje podrazumevaju upotrebu neuronskih mreža [14-17], njihovu kombinaciju sa fazi logikom [18-21], napredne statističke metode, itd. Primena skrivenih Markovljevih modela koji su inherentno pogodni za prepoznavanje procesa koji podrazumevaju prelaze između stanja je zadobila značajnu pažnju [22-24].

U predloženim metodama obeležja su uglavnom zasnovana na vrednosti izmerene sile. Imajući u vidu dinamičku prirodu procesa spajanja McCaragher i Asada u [25] naglašavaju potrebu za korišćenjem kvalitativnih obeležja za prepoznavanje kontaktnih stanja, iako obeležja koja su oni predložili nisu suštinski kvalitativna jer se ekstrahuju korišćenjem kvantitativnog pragovanja signala sile. Nastavak ovog rada prikazan u [26] predlaže mašinu za prepoznavanje kontaktnih stanja korišćenjem klasifikatora distance i konačnih automata.

Sve do sada predložene metode za obučavanje su zasnovane na ekstenzivnim eksperimentima. Neke od njih su se odnosile na slučaj spajanja kocke i ravni [24, 15, 16], dok su druge razmatrale različite vrste spajanja tipa čep u otvor obično korišćenjem materijala koji se ne sreću često u praksi (npr. plastika [25], drvo [17]) ili sa delovima sa velikim zazorima [23].

Međutim, kreiranje mašine za prepoznavanje kontaktnih stanja zasnovano na striktno eksperimentalnim podacima ima značajne nedostatke: 1) tokom izvođenja eksperimenata nije moguće zaključiti u kom kontaktnom stanju su delovi u svakom trenutku vremena, 2) potrebno je izvršiti veliki broj eksperimenata sa neizvesnim ishodom (generisane sile mogu biti vrlo visoke imajući u vidu velike neodređenosti i male zapore u procesu). Pored toga, opšta upotrebljivost rezultata procesa obučavanja (za druge materijale, dimenzije delova, relativne zapore, krutost...) je pod velikim znakom pitanja.

Ovo tehničko rešenje daje formalni okvir za generisanje informacionih mašina za prepoznavanje kontaktnih stanja. Kao alati za proces prevođenja i klasifikacije koriste se mašine sa nosećim vektorima i diskretna vejevlet transformacija. Kao osnovno obeležje koje se preuzima direktno iz procesa odabran je vektor generalisane sile. Osnovna karakteristika metode je da je offline

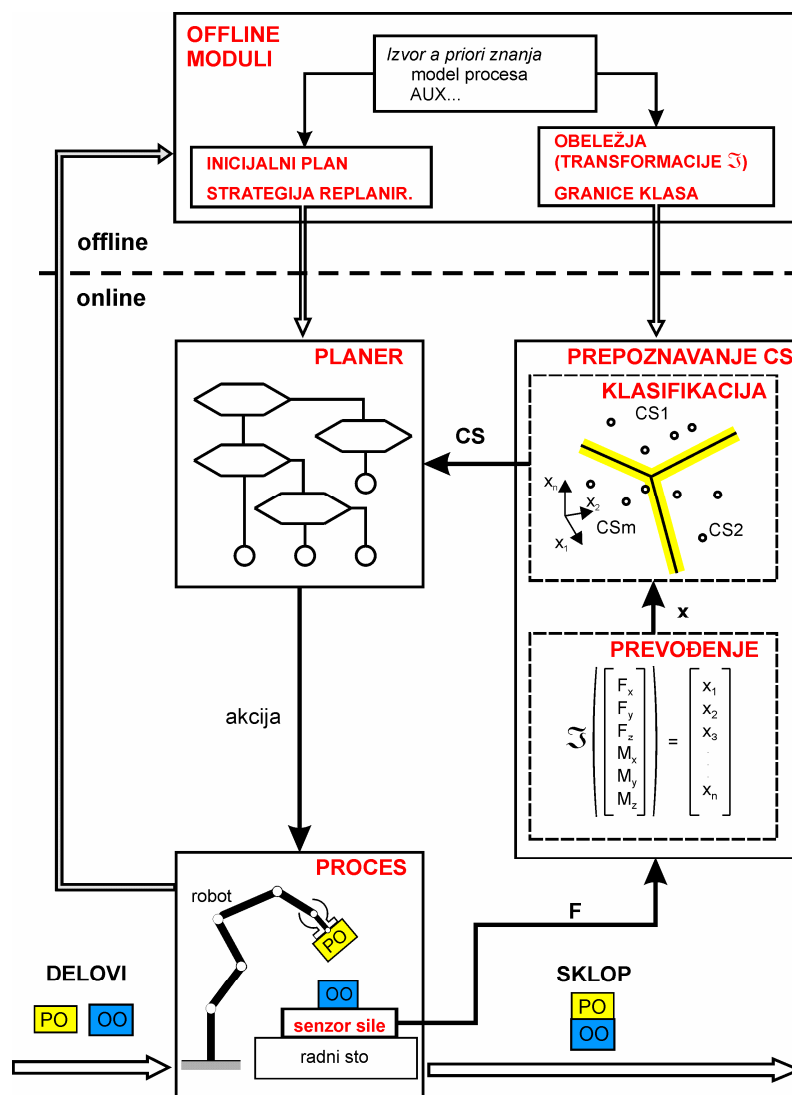
obučavanje mašine zasnovano na mehaničkom modelu sile, a ne na eksperimentalnim podacima, što omogućuje ekstrakciju kvalitativnih obeležja nezavisno od karakteristika konkretnog procesa.

4. OPIS TEHNIČKOG REŠENJA

Metoda za prepoznavanje kontaktnih stanja generiše mašinu se sastoji iz dva modula: jedan se koristi za offline obučavanje, a drugi za online prepoznavanje kontaktnih stanja.

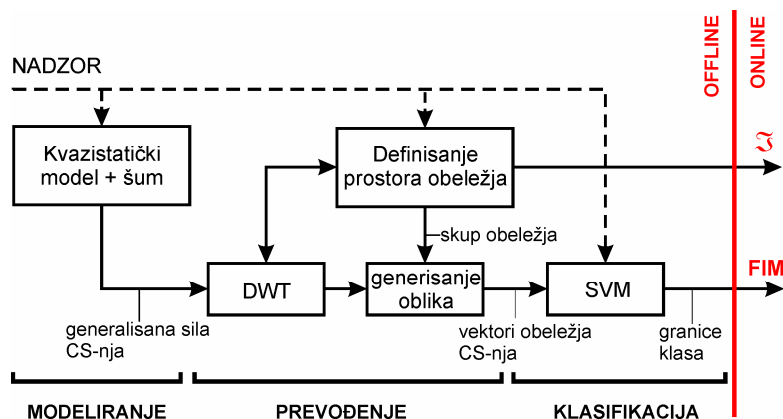
Proces spajanja je dinamički proces u kome su trajektorije delova i sile spajanja u međusobnoj korelaciji. Pouzdanu informaciju o relativnoj pozi delova koji se spajaju nije moguće dobiti iz procesa u realnom vremenu, dok se sila spajanja može relativno lako meriti. Stoga u kreiranoj metodi za prepoznavanje kontaktnih stanja za osnovno obeležje koje se preuzima direktno iz procesa odabran je šestokomponentni vektor generalisane sile na kontaktu između PO i OO.

Arhitektura mašine za online prepoznavanje kontaktnih stanja je prikazana na slici 3. Korišćenjem transformacija \mathfrak{S} izmerene komponente sile F se prevode u oblike – vektore obeležja x . nakon procesa prevođenja vrši se klasifikacija kako bi se odredila klasa koja odgovara kontaktnom stanju koje je trenutno prisutno u procesu. Informacija o tekućem kontaktnom stanju se predaje planeru koji na osnovu nje i plana kretanja daje upravljačkom sistemu robota komande za dalju akciju (tj. izmenu trajektorije). Transformacije \mathfrak{S} koje se koriste u procesu prevođenja kao i granice klasa se definišu tokom offline procesa obučavanja.



Slika 3. Arhitektura mašine za online prepoznavanje kontaktnih stanja u procesu spajanja [3]

Arhitektura mašine za offline obučavanje je prikazana na slici 4. Osnovna karakteristika ove mašine je da ona ne zasniva obučavanje na eksperimentalnim podacima već na mehaničkom modelu konkretnog procesa spajanja. Za razliku od prethodno korišćenih metoda, ovaj pristup omogućuje ekstrakciju kvalitativnih obeležja iz procesa.



Slika 4. Arhitektura mašine za offline obučavanje [3]

Model procesa sadrži njegovu geometrijsku, topološku i mehaničku reprezentaciju. Geometrijski model je definisan geometrijom delova koji se spajaju, elemenata manipulacionog sistema, okruženja, pribora i drugih objekata u procesu. Topološki model daje informaciju o kontaktnim stanjima koja se mogu pojaviti u procesu.

Kako bi se kreirao mehanički model, neophodno je poznavanje geometrijske reprezentacije procesa i skupa svih kontaktnih stanja. Mehanički model opisuje vremensku promenu generalisane sile spajanja u zavisnosti od trenutnog kontaktnog stanja. Različite jednačine kretanja važe za različita kontaktna stanja.

Imajući u vidu da je process spajanja dinamički process, logično bi bilo kreirati njegov dinamički model. Međutim, rad u realnom vremenu zahteva uvođenje određenih aproksimacija u dinamički model. Pošto je spajanje dominantno geometrijski problem u datoj metodologiji se koristi kvazistatički model sila spajanja.

Mašina za offline obučavanje polazi od mehaničkog modela i ima informaciju o kontaktnim stanjima. Ovde treba naglasiti da ova informacija nije na raspolaganju kada se koriste isključivo eksperimentalni podaci. Raspoloživost informacije o kontaktnom stanju omogućuje obučavanje sa nadzorom.

Na osnovu modela vektora sile \mathbf{F} ekstrahuju se i biraju obeležja (formatirana kao vektor obeležja \mathbf{x}) koja su relevantna za klasifikaciju koja sledi. Prikazana arhitektura predviđa ekstrakciju diskriminativnih i reprezentativnih obeležja korišćenjem DWT. Za upotrebu ove transformacije postoje dva osnovna razloga: 1) DWT je primenljiva u realnom vremenu; 2) DWT ima odlične sposobnosti vremenske lokalizacije nestacionarnosti u signalima punim šuma. Drugo svojstvo je naročito značajno jer se prelazi kontaktnih stanja uvek preslikavaju u nestacionarnosti u signalu sile.

Nakon ekstrakcije obeležja, prostor obeležja se korišćenjem klasifikacije sa nadzorom particioniše i generišu se granice klasa od kojih svaka odgovara jednom od mogućih kontaktnih stanja. Pošto mašina za klasifikaciju treba da radi sa realnim podacima iz procesa koji je pun značajnih neodređenosti i šuma, ona mora imati dobra svojstva generalizacije. Iz navedenog razloga se particija prostora obeležja vrši pomoću SVM. Na ovaj način se dobijaju optimalne, krute granice klasa sa maksimalnom marginom.

Opisana arhitektura mašine za prepoznavanje kontaktnih stanja u okviru procesa spajanja se razrađuje za slučaj cilindričnog spajanja tipa čep u otvor. Iako je problem sinteze mašine za prepoznavanje kontaktnih stanja u procesu cilindričnog spajanja relaksiran u odnosu na ostale vrste spajanja tipa čep u otvor (npr. kvadratni, trougaoni, pravougaoni poprečni presek), on je

interesantan jer ovaj proces predstavlja spajanje konkavnog (otvor) i konveksnog (čep) dela u kome može doći do kontaktnog stanja (CS) koje se sastoji od više od jednog osnovnog kontakta (PC). Navedena činjenica proces cilindričnog spajanja čini izuzetno interesantnim za razmatranje pri uspostavljanju metodologije prepoznavanja kontaktnih stanja koja se kasnije može proširiti i na elemente drugih poprečnih preseka. Najveći broj sklopova u mašinskoj industriji je baš tipa cilindrični čep u otvor, pa ova vrsta spajanja predstavljala standardni scenario za validaciju procesa spajanja sa povratnom spregom po sili.

4.1. Kvizistatički model procesa cilindričnog spajanja sa uvodnikom

Polazeći od topološkog modela cilindričnog spajanja sa uvodnikom može se identifikovati šest kontaktnih stanja koja su prikazana u tabeli 1 i to su: stanje bez kontakta (CS0); kontakt po uvodniku (CSu); kontakt u jednoj tački između ivice na prelazu iz uvodnika u otvor i cilindra čepa (CS1+); kontakt u jednoj tački između cilindra otvora i oboda čepa (CS1-); kontakt u dve tačke (CS2), i linijski kontakt (CSL).

Najinteresantnije od navedenih kontaktnih stanja je CS2. Ovo kontaktno stanje se sastoji od dva osnovna kontakta: kontakt u jednoj tački između ivice na prelazu iz uvodnika u otvor i cilindra čepa i kontakt u jednoj tački između cilindra otvora i oboda čepa. Ukoliko se tokom procesa spajanja pojavi ovo kontaktno stanje, može doći do pojave zaglavljivanja ili zaklinjavanja i konačno do blokade spajanja delova. Iz navedenih razloga je ispravno prepoznavanje CS2 od suštinske važnosti. Pored toga, treba naglasiti da iako CS1+ i CS1- deluju slično, ova kontaktna stanja su suštinski različita sa aspekta obrtnog kretanja koje će ih prevesti u CS0 ili CSL.

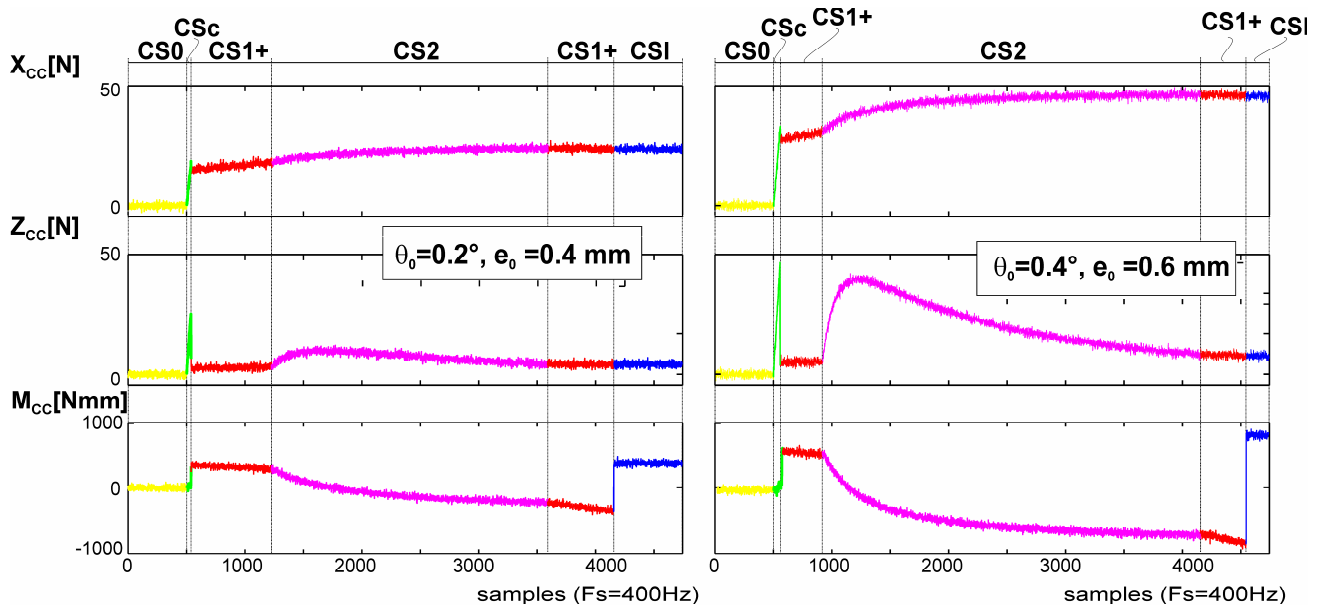
Kvizistatički model procesa cilindričnog spajanja sa uvodnikom daje zavisnost sila spajanja od dubine spajanja za svako kontaktno stanje. Pošto su delovi koji se spajaju centralno simetrični, model je dat za lateralni presek u kome je ostvaren kontakt. Relacije koje daju zavisnost tri komponente vektora sile insertovanja od dubine insertovanja su prikazane u tabeli 1. Uslovi prelaza između kontaktnih stanja kao i pretpostavke korišćene pri kreiranju modela se mogu pronaći u [27].

Navedeni model zanemaruje dinamičku prirodu procesa spajanja. Dinamički model koji bi uzeo u obzir dinamičku prirodu trenja, elastičnost delova [29] i udare na prelazu između kontaktnih stanja [30] bio bi izuzetno komplikovan za implementaciju. Iako je u prikazanom modelu trenje drastično aproksimirano konstantom, njegov uticaj na generisanu silu spajanja je prema datim relacijama izuzetno značajan. Eksperimenti (o kojima će biti reči kasnije) su pokazali da trendovi signala iz realnog sveta imaju odličnu korelaciju sa kvazistatičkim modelom sile. Ovo potvrđuje činjenicu da je dominantno ponašanje sistema kvazistatičko. Kako bi se analitički model približio realnosti, efekti zanemarenih dinamičkih fenomena (sve dok stick slip efekat nije prisutan) i šuma su uvedeni u model dodavanjem belog šuma od 30dB. Nivo šuma je eksperimentalno utvrđen; njegov nivo je značajan i daje SNR od 20dB.

Slika 5 prikazuje promenu komponenti vektora sile spajanja za dva primera procesa spajanja korišćenjem razvijenog modela (kvazistatički model sa uvedenim šumom). Paralelno su prikazana odgovarajuća kontaktna stanja. Jedina razlika u dva navedena primera je u inicijalnoj greški pozicije e_0 i orijentacije θ_0 .

Na osnovu tabele 1 i slike 5 se može zaključiti da je intenzitet komponenta vektora sile u velikoj meri zavistan od inicijalne greške pozicije i orijentacije koje predstavljaju ulazne veličine u datom modelu. Vrednosti ovih grešaka nisu unapred poznate pošto one nastaju kao posledica značajnih neodređenosti prisutnih tokom robotizovanog spajanja.

Kao što se sa slike 5 vidi, sila insertovanja može imati isti intenzitet za različita kontaktna stanja čak i tokom izvršenja jednog ciklusa spajanja. Stoga, obeležja zasnovana na intenzitetu sile spajanja (tj. kvantitativna obeležja) nisu diskriminativna za prepoznavanje kontaktnih stanja.



Slika 5: Promena komponenti vektora sile spajanja za dva primera procesa spajanja korišćenjem razvijenog modela – razlikuju se samo inicijalne greške, a svi ostali parametri procesa su isti u oba slučaja

Tabela 1: Kvazistatički model sile insertovanja za slučaj cilindričnog spajanja sa uvodnikom: CC – centar popustljivosti, tj. fiktivni mehanički oslonac čepa sa lateralnom krutošću k_x i ugaonom krutošću k_θ ; a i α - parametri uvodnika, μ - koeficijent statičkog Kulonovog trenja; e_0 i θ_0 inicijalne greške kozicije i orijentacije; l – rastojanje od CC do vrha čepa; x and θ greške pozicije i orijentacije, z – dubina insertovanja; X_v, Z_v, M_v – komponente vektora generalisane sile na vrhu čepa

Geometrijska reprezentacija	CS	X_v, Z_v, M_v
<p> $S = k_x/k_\theta$ $A = \sin\alpha - \mu\cos\alpha$ $c = (R-r)/R$ $B = \cos\alpha + \mu\sin\alpha$ </p>	CS	$X_v = k_x ((z'-z)/\text{tg } \alpha)/(1 + Sl(l - B/Ar))$ $Z_v = k_x B/A((z'-z)/\text{tg } \alpha)/(1 + Sl(l - B/Ar))$ $M_v = k_x B/Ar((z'-z)/\text{tg } \alpha)/(1 + Sl(l - B/Ar))$
	CS1+	$X_v = k_x \frac{e_0 - cR - (z+b-l)\theta_0}{1 + S(z+b)(z+b-\mu r)}$ $Z_v = \mu k_x \frac{e_0 - cR - (z+b-l)\theta_0}{1 + S(z+b)(z+b-\mu r)}$ $M_v = (l - (z+b) + \mu r)X_v$
	CS1-	$X_v = k_x (e_0 - cR)/(1 + Sl(l - \mu r))$ $Z_v = \mu k_x (e_0 - cR)/(1 + Sl(l - \mu r))$ $M_v = X_v \mu r$
	CS2	$X_v = k_x [cR(1 - 2l/(l - z - b)) + e_0 + l\theta_0]$ $Z_v = 2\mu \frac{M_v - X_v \mu r}{l - (z+b)} - \mu X_v$ $M_v = X_v l - k_\theta (2cR/(l - z - b) - \theta_0)$
	CSL	$X_v = k_x (e_0 + l\theta_0 - cR)$ $Z_v = \mu k_x (e_0 + l\theta_0 - cR)$ $M_v = k_x (e_0 + l\theta_0 - cR)l - k_\theta \theta_0$

4.2. Ekstrakcija i odabir obeležja

U tabeli 1 se može uočiti da su vrste zavisnosti od dubine spajanja iste za sve tri komponente spajanja, pa se jedna od komponentata, u ovom slučaju Z_v može odabrati kao prvo obeležje X_I :

$$X_1 = Z_V \quad (1)$$

Detaljnijom analizom mogu se uvesti još dva obeležja:

$$X_2 = X_V / Z_V \quad (2)$$

$$X_3 = M_V / Z_V \quad (3)$$

čiji su karakteri zavisnosti od dubine insertovanja z za pojedina kontaktna stanja prikazani u tabeli 2.

Table 2: Karakteri promene komponenta sile spajanja u odnosu na dubinu insertovanja za različita kontaktna stanja

	CSc	CS1+	CS1-	CS2	CSL
X_2	$\frac{B}{A}$	$\frac{1}{\mu}$	$\frac{1}{\mu}$	nelinearan	$\frac{1}{\mu}$
X_3	r	$\frac{l - (z + b) + \mu r}{\mu}$	r	nelinearan	konstantan

Sa praktične tačke gledišta karakter promene sile u vremenu je značajniji od karaktera promene od dubine insertovanja. Ovaj karakter promene se može lako izvesti pošto je uobičajeno da je brzina insertovanja tokom robotizovanog spajanja konstantna.

U tabeli 3 su prikazani karakteri promene obeležja X_1 - X_3 u vremenu gde je sa l označena linearna, sa k konstantna, a sa n nelinearna promena odabranog obeležja u vremenu.

Tabela 3: Karakteri promene obeležja u vremenu u zavisnosti od kontaktnog stanja: l-linearna, k-konstantna, n-nelinearna zavisnost

	CSc	CS1+	CS2	CS1-	CSL
X_1	l	n	n	k	k
X_2	k	k	n	k	k
X_3	k	l	n	k	k

Tabela 3. pokazuje da karakter promene obeležja X_1 - X_3 u vremenu ima jedinstvenu kombinaciju za svako kontaktno stanje. Ukoliko bi se pronašao način da se u svakom vremenskom trenutku odredi kakava je vrsta zavisnosti datog obeležja (linearna, nelinearna, konstantna) od vremena i da se kontaktna stanja na taj način kvalitativno opišu bilo bi moguće izvršiti klasifikaciju u sledeće klase: 1)CSu, 2)CS1+, 3)CS1- i CSL i 4)CS2. Klasifikacija CS0 je trivijalna jer je u tom slučaju sila dodira jednaka (ili bliska) nuli. Čak bi se i na osnovu kvantitativne vrednosti obeležja X_3 mogle razdvojiti i klase CS1- i CSL jer je za njih vrednost ovog obeležja značajno različita.

Navedena obeležja koja opisuju karakter promene signala sile i iz njih izvedenih signala su invarijantna na promenu parametara procesa spajanja. Ona ne zavise od geometrije delova (prečnika, relativnog zazora, ugla zakošenja uvodnika). Na njih ne utiče ni promena koeficijenta trenja kada se uspostavi konstantna brzina insertovanja dovoljnog intenziteta, bez stick-slip efekta. Takođe, pošto se smatra da krutost sistema ne zavisi od dubine insertovanja ni njena promena neće uticati na izabrana obeležja.

Za praktičnu primenu neophodno je pronaći tehniku koja će biti u mogućnosti da u realnom vremenu izvrši ekstrakciju karaktera zavisnosti od vremena iz neidealnih senzorskih signala. U ove svrhe se u skladu sa arhitekturom mašine za obučavanje (slika 4.) koristi DWT. Prilikom izbora vejevleta koji će se primeniti ovde se koristi činjenica da vejevleti (ψ) iz Daubechies familije imaju prvih N nulatih momenata, gde je N red vejevleta [31]:

$$\int x^n \psi(x) dx = 0, \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (4)$$

Ovo svojstvo u stvari znači da su 'db' vejevleti ortogonalni na polinome $1, x, x_2, \dots, x^{N-1}$ i da će signal čija se vejevlet transformacija vrši biti aproksimiran polinomima reda $N-1$. Dakle, u svim regionima u kojima se signal dobro aproksimira polinomom do reda $N-1$ vejevlet koeficijenti (koeficijenti detalja) će biti jednaki nuli.

Sumiranjem svojstva nultih momenata vejevleta iz Daubechies familije i relacija datih u tabeli 3, koeficijenti detalja na četvrtom nivou DWT dekompozicije obeležja X_1-X_3 korišćenjem 'db1' vejevleta su izabrani kao reprezentativna i diskriminativna obeležja. Korišćenjem DWT, ulazni prostor obeležja $\mathbf{X}=[X_1 X_2 X_3]$ se transformiše u novi prostor obeležja $\mathbf{x}=[x_1 x_2 x_3]$:

$$\mathbf{x} = \text{DWT}_{db1}^4(\mathbf{X}) \quad (5)$$

Nivo DWT određuje istoriju signala (tj. broj odbiraka) koji će biti uključeni u proračun trenutne vrednosti koeficijenta detalja. Četvrti nivo DWT korišćenjem 'db1' vejevleta zahteva bafer od 16 odbiraka za generisanje koeficijenta detalja. Tabela 4 prikazuje idealne vrednosti obeležja x_1, x_2 i x_3 za sva kontaktna stanja. Ova obeležja bi trebalo da budu jednaka ili bliska nuli u svim oblastima u kojima je trend signala konstantan. Stoga oni su kodirani sa 0. Za sve druge trendove signala odgovarajuća obeležja su različita od nule i kodirana su sa 1.

Tabela 4: Koeficijenti detalja za DWT X_1-X_3 korišćenjem haar vejevleta: 0 – koeficijenti detalja su jednaki nuli; 1 – koeficijenti detalja nisu jednaki nuli

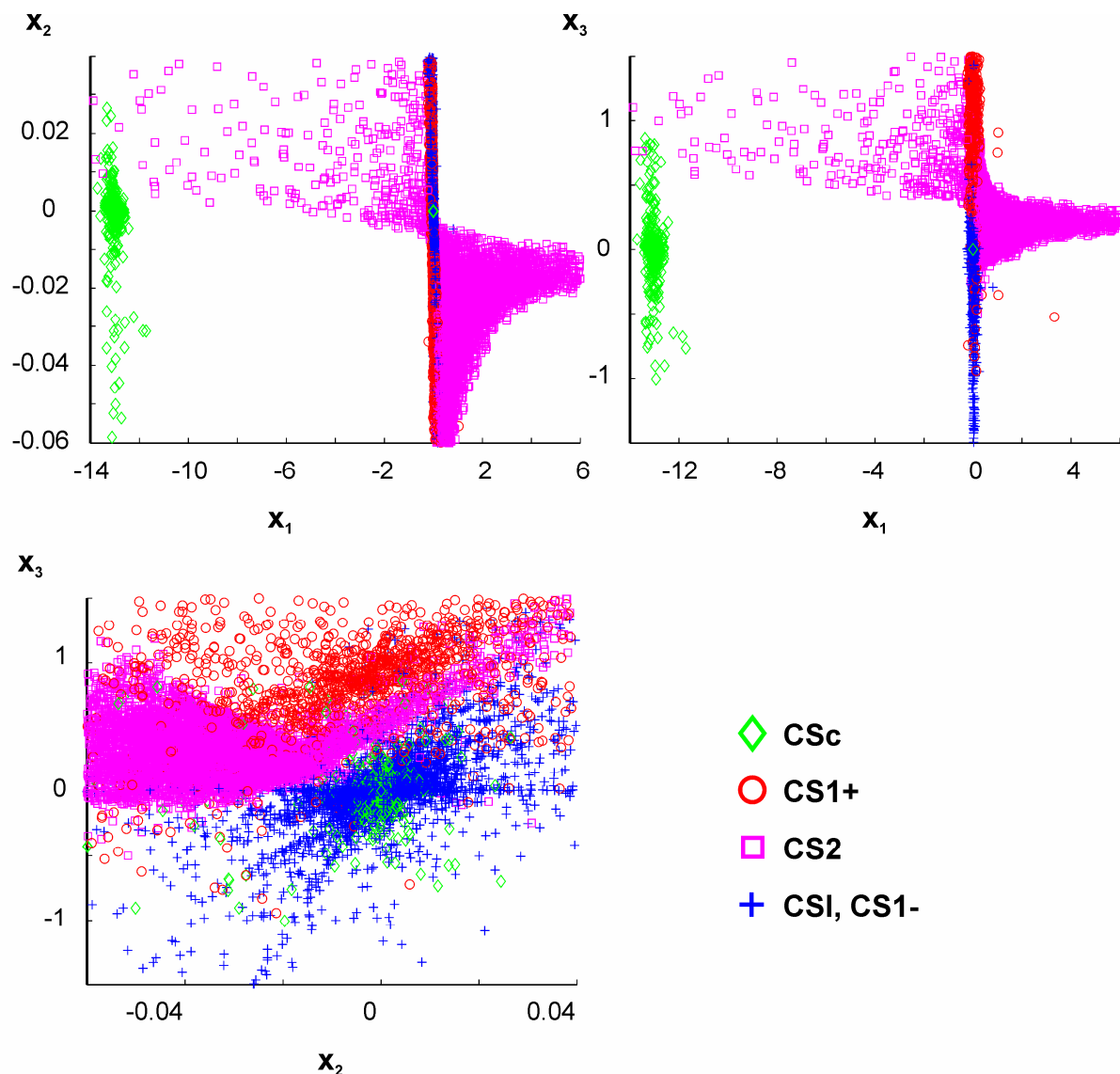
	CSc	CS1+	CS2	CS1-	CSL
x_1	1	1	1	0	0
x_2	0	0	1	0	0
x_3	0	1	1	0	0

Pre generisanja obeležja, iz signala je potrebno eliminisati visokofrekventne komponente koji se odnose na šum i visoko dinamične i stohastičke fenomene koji su zanemareni u kvazistatičkom modelu. I za uklanjanje šuma iz signala se koristi DWT. Konvencionalne tehnike za uklanjanje šuma zasnovane na IIR i FIR niskopropusnih filtera izobličuju signal. S druge strane, tehnike za uklanjanje šuma zasnovane na DWT karakteriše fazona korektnost i dobra vremenska lokalizacija. Pri izboru vejevleta za uklanjanje šuma treba imati u vidu da će se dalja analiza signala (ekstrakcija obeležja) biti zasnovana na 'db1' vejevletu. U skladu sa tim, vejevlet koji se koristi za uklanjanje signala, mora biti vejevlet reda većeg od 1 iz Daubechies familije, ili vejevlet iz neke druge familije. Kako bi vreme potrebno za uklanjanje šuma bilo što manje, u ove svrhe se bira 'db2' vejevlet.

Na slici 6 su prikazani vektori obeležja $\mathbf{x}=[x_1 x_2 x_3]$ generisani na osnovu kvazistatičkog analitičkog modela sa uvedenim šumom korišćenjem opisane procedure. Generisano je ukupno 450.000 oblika za različite cikluse spajanja sa inicijalnim greškama u opsegu $e_0 \in [0, 3\text{mm}]$ and $\theta_0 \in [0, 1^\circ]$. Pošto je u kvazistatički model uveden šum, generisana obeležja nisu jednaka već su bliska nuli u područjima u kojima je trend signala dominantno konstantan.

Na osnovu opisane procedure, može se zaključiti da transformacije \mathfrak{S} za generisanje obeležja na osnovu sile insertovanja imaju sledeća tri koraka: 1) generisanje X_1-X_3 korišćenjem relacija (1-3), 2) uklanjanje šuma korišćenjem DWT pomoću vejevleta 'db2', i 3) ekstrakcija obeležja x_1-x_3 korišćenjem DWT pomoću 'db1'. Ove transformacije se predaju mašini za online prepoznavanje kontaktnih stanja (Slika 3).

Korišćenjem ortogonalnosti db vejevleta i polinomalnih funkcija u ovoj metodi je postignuta ekstrakcija istinski kvalitativnih obeležja $[x_1 x_2 x_3]$ iz signala sile. Ova obeležja su nezavisna od intenziteta sile spajanja, tj, od promene krutosti sistema (k_x, k_θ) , koeficijenta trenja (μ) , inicijalne greške pozicije i orijentacije (e_0, θ_0) između delova koji se spajaju, parametara uvodnika (a, α) , etc. Ova obeležja sadrže informaciju o karakteru promene u vremenu obeležja X_1-X_3 koja su ekstrahovana iz komponenata sile spajanja.

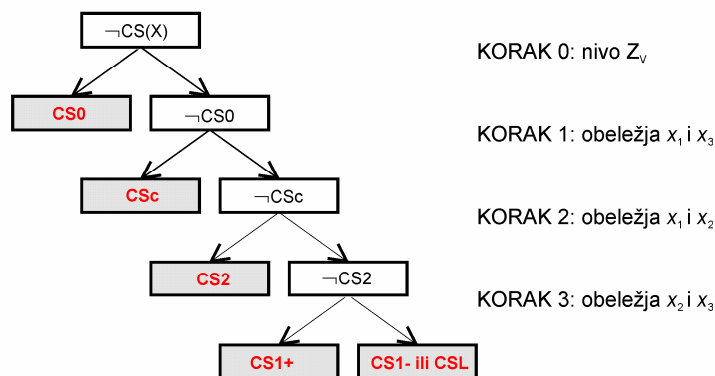


Slika 6. Prikaz oblika u prostoru obeležja

4.3. Particija prostora obeležja

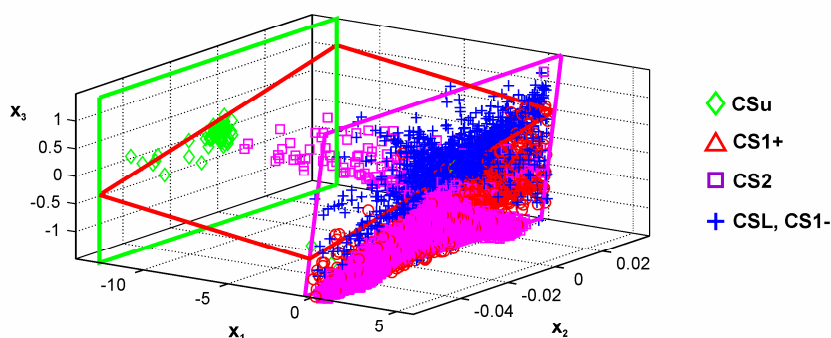
Na osnovu prethodno opisane procedure za offline obučavanje mašine za prepoznavanje kontaktnih stanja, klasifikacija se vrši korišćenjem SVM. SVM su odabrane kao metoda klasifikacije koja vodi ka maksimalnoj margini Δ [28] između granice klasa i oblika u svakoj od klasa i samim tim ima odlična svojstva generalizacije. Pošto mašina treba da radi u realnom vremenu, potrebno je da algoritam za klasifikaciju bude što jednostavniji. Iz navedenog razloga je odabrano linearno jezgro.

SVM su binarni klasifikatori – oni klasifikuju sve oblike u dve klase. Za klasifikaciju u više klasa, u ovoj metodi se koristi hijerarhijski pristup. Na svakom nivou klasifikacije jedno CS se odvaja od preostalih kontaktnih stanja (Slika 7). Pored toga primenjuje se monotetička klasifikacija – u svakom koraku klasifikacije koriste se samo dva od tri raspoloživa obeležja. Nakon prepoznavanja stanja bez kontakta (tj. CS0) kao stanja u kome je Z_v manje od 5 N (eksperimentalno određena vrednost), klasifikacija se izvodi sledećim redosledom: prvi nivo - CSu se odvaja korišćenjem x_1 i x_3 , drugi nivo - CS2 se odvaja korišćenjem x_1 i x_2 , treći nivo - CS1+ i CSI/CS1- se odvajaju korišćenjem x_2 i x_3 .

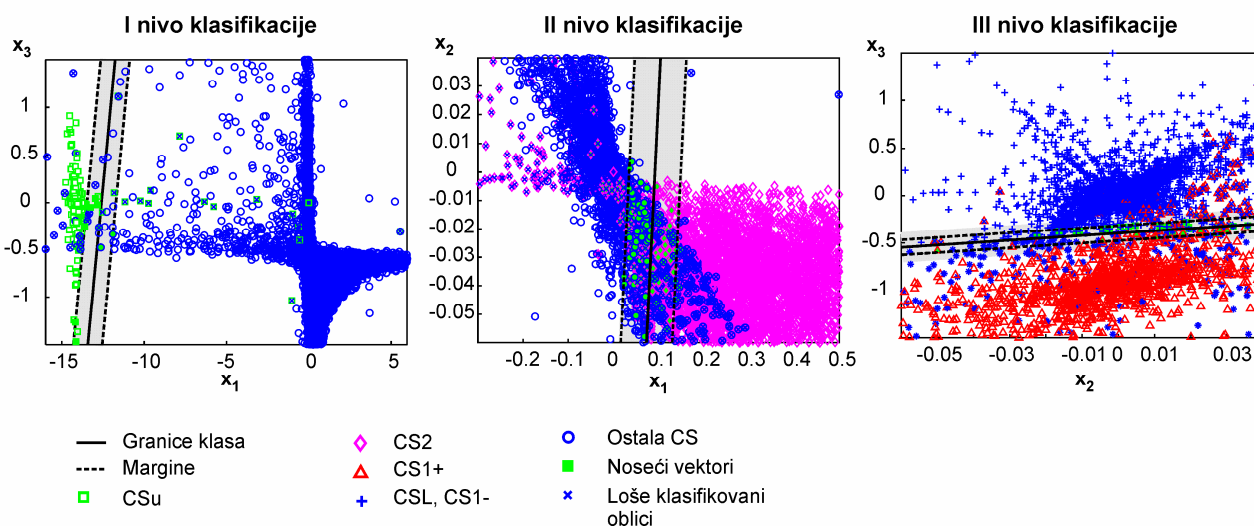


Slika 7. Binarna hijerarhijska klasifikacija u kontaktna stanja

a)



b)



Slika 8 Optimalna particija prostora obeležja: a) 3D reprezentacija, b) 2D projekcije

Na slici 8 su prikazane granice odlučivanja dobijene korišćenjem SVM sa linearnim jezgrom. Pošto je korišćeno linearno jezgro, granice odlučivanja (Slika 5) su opisane sledećim relacijama:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{w}_1(1)x_1 + \mathbf{w}_1(2)x_3 &= b_1 \\
 \mathbf{w}_2(1)x_1 + \mathbf{w}_2(2)x_2 &= b_2 \\
 \mathbf{w}_3(1)x_2 + \mathbf{w}_3(2)x_3 &= b_3
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

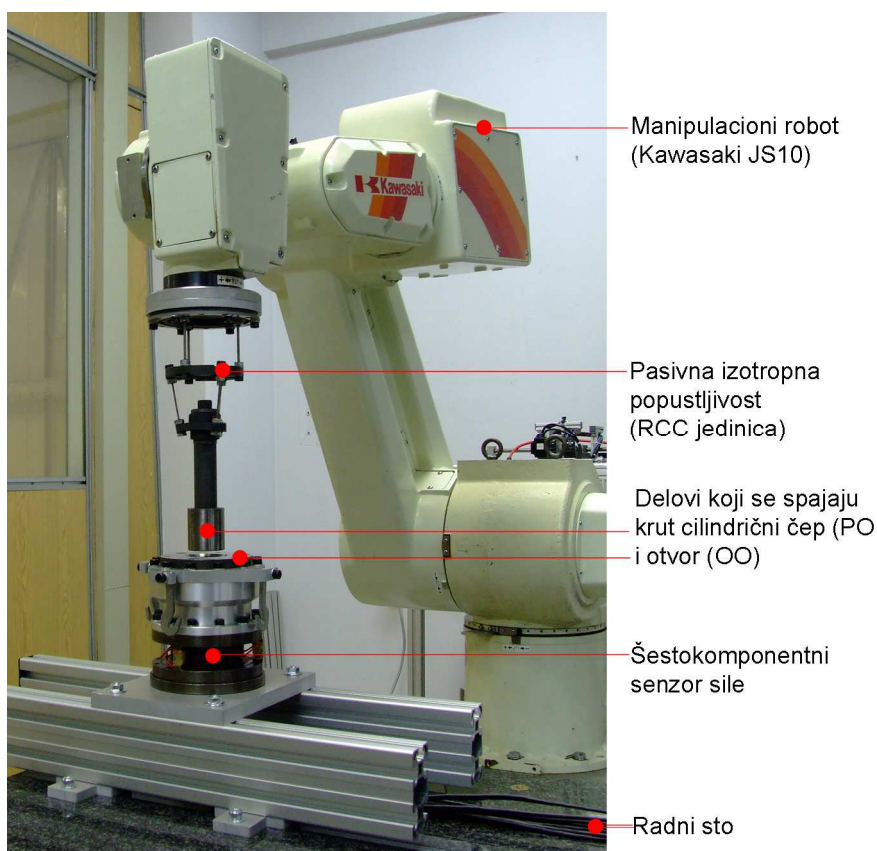
Vrednosti parametara \mathbf{w}_i i b_i , zajedno sa vrednostima margine Δ_i (tabela 5) su definisane tokom obučavanja SVM.

Tabela 5: SVM parametri za sve korake klasifikacije

Korak klas. i	Odvojeno CS	Obeležja	$w_i(1)$	$w_i(2)$	b_i	Δ_i
0	CS0	Nivo Z_V	-	-	-	-
1	CSu	x_1 i x_3	1,14	-0,63	-14,33	0,7689
2	CS2	x_1 i x_2	-17,55	5,48	-1,61	0,0544
3	CS1+ and CS1-/CSL	x_2 i x_3	31,88	-12,58	4,97	0,029

Identifikovane granice klasa (5) predstavljaju optimalne razdvajajuće hiperravni. Korišćenjem ovih hiperravni prostor obeležja je optimalni particionisan. Ova particija se predaje mašini za online prepoznavanje kontaktnih stanja- Ovde je potrebno naglasiti da inherentne maksimalne margine vode ja robusnoj online klasifikaciji.

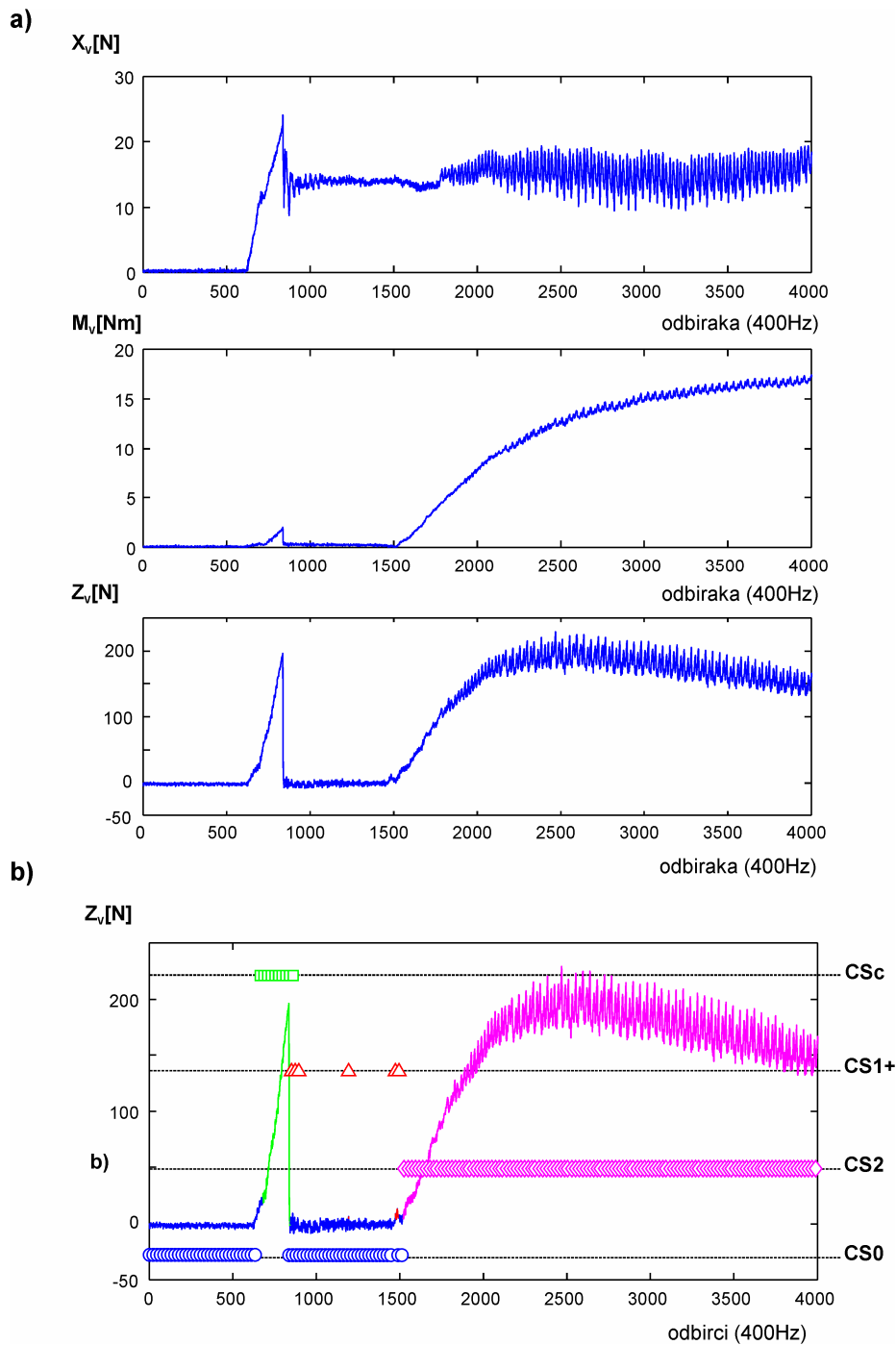
4.4. Eksperimentalna verifikacija



Slika 9 Eksperimentalna instalacija

Predložena metodologija za prepoznavanje kontaktnih stanja je eksperimentalno verifikovana korišćenjem laboratorijske instalacije prokazan na slici 9. Ova instalacija je zasnovana na Kawasaki JS10 6DOF robotskoj ruci na čiji vrh je postavljena RCC (Remote Center Compliance) jedinica kreirana u okviru Centra za nove tehnologije, Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Nosivost robota je 10kg. Za merenje sile je korišćen šestokomponentni softverski raspregnut senzor sile zasnovan na mernim trakama koji je takođe kreiran u okviru Centra za nove tehnologije, Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Senzor je postavljen na radni sto, a na senzor je postavljen OO sa otvorom. Delovi koji se spajaju imaju nominalni prečnik $D=40\text{mm}$ I zazor od $20\mu\text{m}$, što daje relativni zazor od $c=(D-d)/D=5\times 10^{-4}$. Uvodnik je sa oborenim ivicom $3/45^\circ$, a delovi koji se spajaju su napravljeni od cementiranog čelika, HRC 60, površine brušene na IT5.

Izvršen je veliki broj eksperimenata. Na slici 10 je prikazana Z_V komponenta sile spajanja snimljena tokom jednog tipičnog ciklusa spajanja, paralelno sa rezultatima prepoznavanja kontaktnih stanja korišćenjem predložene metodologije.



Slika 10 Rezultati prepoznavanja kontaktnih stanja

Na slici 10a su prikazane komponente sile spajanja X_V , Z_V i M_V koje su izmerene tokom ovog eksperimenta. Pošto tačna pozicija i orijentacija vrha čepa kao ni relativna pozicija OO u odnosu na robot nisu unapred poznate, nije moguće znati u kom kontaktnom stanju su delovi nili u svakom trenutku tokom izvođenja eksperimenta. Iz nevedenog razloga nije moguće izraziti procentualno izraziti efikasnost kreirane mašine. Međutim, odlična korelacija sekvence kontaktnih stanja, oblika signala sile i prepoznatih kontaktnih stanja je evidentna. Pošto je obučavanje (tj. sinteza mašine za prepoznavanje) zasnovano na analitičkom modelu, ostvarena efikasnost mašine za prepoznavanje kontaktnih stanja na signalima iz realnog sveta je neočekivano dobra.

4.5. Tehničke karakteristike

Prikazana metoda za prepoznavanje kontaktnih stanja u robotizovanoj montaži je zasnovana na primeni kvazistatičkog modela procesa spajanja, DWT za ekstrakciju obeležja i SVM za klasifikaciju. Pažljivim izborom tehnika koje se koriste u okviru pojedinih modula kreirane opšte mašine za prepoznavanje omogućena je njena robusnost i upotreba u realnom vremenu.

Ukoliko se, na primer, signal sile odabira sa 400Hz kao u eksperimentima opisanim u odeljku 4.3, i ako se za generisanje obeležja koristi DWT na četiri nivoa sa 'db1' vejevletom kao u navedenom primeru (ova transformacija zahteva bafer od 16 odbiraka), vreme potrebno za prepoznavanje kontaktnih stanja je 40ms. Ukoliko bi se povećala frekvencija odabiranja, vreme potrebno za prepoznavanje kontaktnih stanja se može još smanjiti.

Iz navedenog se može zaključiti da se prepoznavanje kontaktnih stanja može vršiti dovoljno brzo da omogući funkcionalnost simboličke povratne sprege u okviru sistema za popustljivo kretanje prikazanog na slici 2.

4.6. Prikaz mogućnosti metode

Metoda za prepoznavanje kontaktnih stanja polazi od analitičkog modela procesa, što omogućuje ekstrakciju istinski kvalitativnih obeležja. Korišćenjem kvalitativnih obeležja moguće je kreirati opšte primenljivu mašinu za prepoznavanje kontaktnih stanja za datu klasu zadataka spajanja; mašinu koja je insenzitivna na promene u parametrima konkretnog procesa, čak i u odnosu na dimenzije delova koji se spajaju kao što je pokazano na primeru cilindričnog spajanja sa uvodnikom.

Korišćenjem procedure obučavanja koja je zasnovana na mehaničkom modelu čini izvođenje velikog broja eksperimenata nepotrebnim. Ovo je vrlo značajno imajući u vidu da velike nesigurnosti i mali zazori u procesu spajanja stavljaju rezultate i uspešnost ovih eksperimenata pod znak pitanja.

5. ZAKLJUČAK

Izložena metodologija daje novi okvir za generisanje mašine za prepoznavanje kontaktnih stanja u robotizovanoj montaži. Iako su kontaktna stanja prvenstveno određena relativnom pozicijom delova koji se spajaju, ona se zahvaljujući dinamičkoj prirodi procesa spajanja mogu prepoznati na osnovu generisane sile.

Data metodologija predlaže mašinu za prepoznavanje kontaktnih stanja zasnovanu na modelu. To je nov pristup koji uvodi značajne prednosti u odnosu na uobičajene metode koje su zasnovane strogo na eksperimentalnim podacima. Tokom kreiranja mašine za prepoznavanje sistematski se koriste apriorna znanja sadržana u analitičkom modelu procesa spajanja.

Analitički model daje informaciju o kontaktnom stanju koje odgovara generisanom vektoru sile. Ova informacija omogućuje obučavanje sa nadzorom. U metodi se za particiju usvojenog prostora obeležja koriste mašine sa nosećim vektorima. Treba naglasiti da, ukoliko bi se radilo samo sa eksperimentalnim podacima tokom obučavanja ne bi bilo moguće koristiti SVM koje zahtevaju obučavanje sa nadzorom. U slučaju ovde prikazane metode, odlična svojstva generalizacije SVM se mogu iskoristiti. Međutim, SVM imaju ograničenje koje se ogleda u tome da su one binarni klasifikatori. Kako bi se ovaj problem prevazišao u navedenoj metodi predložena je hijerarhijska klasifikacije u kojoj se na svakom nivou klasifikacije jedno kontaktno stanje odvaja od preostalnih. Ovakav pristup omogućuje klasifikaciju u više klasa.

Predloženi pristup je razrađen i eksperimentalno verifikovan korišćenjem primera cilindričnog spajanja sa uvodnikom, Umesto izbora vejevleta za ekstrakciju obeležja intuitivno, proizvoljno ili

metodom pokušaja (što je uobičajeno), ovde je pokazano na koji način se analitička svojstva vejevleta mogu iskoristiti za efikasnu ekstrakciju kvalitativnih obeležja.

Kreirana mašina je opšte primenljiva za prepoznavanje kontaktnih stanja u procesu cilindričnog spajanja sa uvodnikom, bez obzira na parametre (prečnik delova, krutost sistema, koeficijent trenja...) konkretnog procesa. Iako je obučavanje bilo zasnovano na približnom, tj. značajno uprošćenom analitičkom modelu, eksperimenti su pokazali da su u realnom svetu sveukupne performanse mašine odlične.

6. LITERATURA

- [1] Desai RS, Volz R (1989) Identification and verification of termination conditions in fine motions in presence of sensor errors and geometric uncertainties. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp 800-806
- [2] Xiao J, Liu L (1998) Contact states, Representation and recognizability in the presence of uncertainties. In: Proceedings of International Conference on Intelligent Robots and Systems, Victoria, Canada, pp 1151-1156
- [3] Jakovljevic, Z., Petrovic, P., B., Hodolic, J., Contact states recognition in robotic part mating based on support vector machines, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, ISSN: 0268-3768, DOI 10.1007/s00170-011-3501-5
- [4] Lefebvre T, Xiao J, Bruyninckx H, De Gersem G (2005) Active compliant motion: a survey. Adv Rob 19:479-499
- [5] Hirukawa H, Matsui T, Takase K (1994) Automatic determination of possible velocity and applicable force of frictionless objects in contact from a geometric model. IEEE Trans on Rob Autom 10:309-322
- [6] Mosemann H, Raue A, Wahl F (1999) Identification of assembly process states using polyhedral convex cones. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Detroit, MI, USA, pp 2756-2761
- [7] Xiao J, Zhang L (1996) Towards obtaining all possible contacts - Growing a polyhedron by its location uncertainty. IEEE Trans on Rob and Autom 12:553-565
- [8] Suárez R, Basañez L, Rosell J (1994) Assembly contact force domains in the presence of uncertainty. In: Proceedings of Fourth IFAC Symposium on Robot Control, Capri, Italy, pp 653-659
- [9] De Schutter J, Bruyninckx H, Dutré S, De Geeter J, Katupitiya J, Demeery S, Lefebvre T (1999) Estimating first-order geometric parameters and monitoring contact transitions during forcecontrolled compliant motions. Int J Rob Res 18:1161-1184
- [10] Lefebvre T, Bruyninckx H, De Schutter J (2003) Polyhedral contact formation modeling and identification for autonomous compliant motion. IEEE Trans on Rob 19:26-41
- [11] Lefebvre T, Bruyninckx H, De Schutter J (2005) Polyhedral contact formation identification for autonomous compliant motion: Exact nonlinear Bayesian filtering. IEEE Trans on Rob 21:124-129
- [12] Lefebvre T, Bruyninckx H, De Schutter J (2005) Online statistical model recognition and state estimation for autonomous compliant motion, systems. IEEE Trans on Syst, Man and Cybern C Appl Rev 35:16-29
- [13] Gadeyne K, Lefebvre T, Bruyninckx H (2005) Bayesian hybrid model-state estimation applied to simultaneous contact formation recognition and geometrical parameter estimation. Int J Rob Res 24:615-630

- [14] Nuttin M, Rosell J, Suárez R, Van Brussel H, Basañez L, Hao J (1995) Learning approaches to contact estimation in assembly tasks with robots. In: Proceedings of the 3rd European Workshop on Learning Robots, Heraklion, pp 1-11
- [15] Everett L J, Ravari R, Volz R A, Skubic M (1999) Generalized recognition of single-ended contact formations. *IEEE Trans on Rob and Autom* 15:829-836
- [16] Skubic M, Volz R A, (2000) Identifying single-ended contact formations from force sensor patterns. *IEEE Trans on Rob and Autom* 16:597-603
- [17] Cervera E, del Pobil A P (2002) Sensor-based learning for practical planning of fine motions in robotics. *Int J Inf Sci* 145:147-169
- [18] Park Y K, Cho H S, (1994) A self-learning rule-based control algorithm for chamferless part mating. *Control Eng Practice* 2:773-783
- [19] Brignone L M, Howarth M (2002) A geometrically validated approach to autonomous robotic assembly. *Proceedings of International Conference on Intelligent Robots and Systems, Lausanne*, pp 1626-1631
- [20] Son C (2001) A neural/fuzzy optimal process model for robotic part assembly. *Int J Mach Tool Manuf* 41:1783-1794
- [21] Son, C (2002) Optimal control planning strategies with fuzzy entropy for robotic part assembly tasks. *Int J Mach Tool Manuf* 42:1335-1344
- [22] Hannaford B, Lee P (1991) Hidden Markov model analysis of force/torque information in telemanipulation. *Int J Rob Res* 10:528-539
- [23] Hovland G E, McCarragher B J (1998) Hidden Markov models as a process monitor in robotic assembly. *Int. J Rob Res* 17:153-168
- [24] Lau H Y K (2003) A hidden MARKOV model-based assembly contact recognition system. *Mechatronics*. 13:1001-1023
- [25] McCarragher B J, Asada H (1993) Qualitative template matching using dynamic process models for state transition recognition of robotic assembly. *Trans ASME, J Dyn Syst Meas Control* 115:261-269
- [26] Sikka P, McCarragher B J (1997) Rule-based contact monitoring using examples obtained by task demonstration. In: *Proceedings of the 15th International Joint Conference on Artificial Intelligence, Nagoya, Japan*, pp 514-521
- [27] Jakovljević, Ž., Učenje i kontekstno prepoznavanje procesa spajanja u robotizovanoj montaži, doktorska disertacija, Mašinski fakultet u Beogradu, 2010
- [28] Vapnik VN, (2000) *The Nature of Statistical Learning Theory*. Springer-Verlag, New York
- [29] Xia Y, Yin Y, Chen Z, (2006) Dynamic analysis for peg-in-hole assembly with contact deformation. *Int J Adv Manuf Technol* 30: 118–128
- [30] Vukobratovic M, Potkonjak V, Matijevic V (2001) Contribution to the study of dynamics and dynamic control of robots interacting with dynamic environment. *Robotica* 19:149-161
- [31] Daubechies I, (1992) *Ten Lectures on Wavelets*, CBMS-NSF regional conference series in applied mathematics. 61, SIAM, Philadelphia
- [32] Jakovljevic, Z., Petrovic, P., B., Mikovic, V., Dj., Pajic, M., Fuzzy inference mechanism for recognition of contact states in intelligent robotic assembly, *Journal of Intelligent Manufacturing*, DOI 10.1007/s10845-012-0706-x

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ -
БРОЈ: 101/3
ДАТУМ: 24.01.2013.

На основу захтева руководиоца пројекта проф.др Петра Петровића бр. 101/1 од 17.01.2013. године, одлуке о именовању рецензента и чл. 12.5 Статута Машинског факултета, Истраживачко стручно веће на седници од 24.01.2013. године, донело је следећу

О Д Л У К У

Орихвата се Техничко решење рађено у оквиру пројекта ТР 35007, под насловом: **„Метода за препознавање контактних стања у роботизованој монтажи“**, чији су аутори: доц.др Живана Јаковљевић, проф.др Петар Петровић, дипл.инж.маш. Владимир Миковић, дипл.инж.маш. Никола Лукић и дипл.инж.маш. Иван Данилов, а позитивну рецензију поднели: проф.др Јанко Ходолич, ФТН Нови Сад и др Мирослав Пилиповић, ред.проф. у пензији.

Одлуку доставити: Министарству просвете, науке и технолошког развоја РС, рецензентима и архиви Факултета ради евиденције.



ПРОДЕКАН
ЗА НАУЧНОИСТРАЖИВАЧКУ ДЕЛАТНОСТ


Проф.др Војкан Лучанин

Odlukom Istraživačko-stručnog veća Mašinskog fakulteta u Beogradu br. 101/2 od 17.01.2013. godine imenovani smo za recenzente tehničkog rešenja **Metoda za prepoznavanje kontaktnih stanja u robotizovanoj montaži**, autora: doc. dr Živana Jakovljević, dipl. ing. maš., prof. dr Petar B. Petrović, dipl. ing. maš., Vladimir Miković, dipl. ing. maš., Nikola Lukić, dipl. ing. maš., Ivan Danilov, dipl. ing. maš. Na osnovu predloga ovog tehničkog rešenja podnosimo sledeći:

IZVEŠTAJ

Tehničko rešenje: Metoda za prepoznavanje kontaktnih stanja u robotizovanoj montaži, autora: doc. dr Živana Jakovljević, dipl. ing. maš., prof. dr Petar B. Petrović, dipl. ing. maš., Vladimir Miković, dipl. ing. maš., Nikola Lukić, dipl. ing. maš., Ivan Danilov, dipl. ing. maš. opisano je na 19 stranica A4 formata pisanih sa 12pt singl proreda, sadrži 10 slika i 4 tabele. Sastavljeno je od pet poglavlja i spiska korišćene literature. Naslovi poglavlja su:

1. Oblast na koju se tehničko rešenje odnosi
2. Tehnički problem
3. Stanje tehnike
4. Opis tehničkog rešenja
5. Zaključak

Metoda za prepoznavanje kontaktnih stanja u robotizovanoj montaži razvijena je za potrebe zatvaranja eksterne povratne sprege kod sistema za aktivno popustljivo kretanje robota u robotizovanoj montaži. Usled prisustva značajnih neodređenosti prilikom finih kretanja u robotizovanoj montaži, neophodna je odgovarajuća popustljivost mehaničke strukture robota sa završnim uređajem koja se u uslovima visoko diverzifikovane proizvodnje na optimalan način ostvaruje uvođenjem aktivnog popustljivog kretanja.

Sistem za aktivno popustljivo kretanje se sastoji iz interaktivnog planera, sistema za prepoznavanje kontaktnih stanja i kontrolera koji izvršava popustljivo kretanje. Planer koji vrši sintezu trajektorije robota na simboličkom nivou mora imati mogućnost replaniranja trajektorije na osnovu podataka prikupljenih iz procesa u realnom vremenu. Sistem za prepoznavanje kontaktnih stanja upravo obezbeđuje ovu povratnu spregu. Njegova uloga je da na osnovu izmerenih vrednosti sile i poze u okviru procesa spajanja prepozna trenutno kontaktno stanje između delova koji se spajaju.

U poglavlju stanje tehnike se navodi da se do sada sprovedena istraživanja u oblasti prepoznavanja kontaktnih stanja mogu podeliti u dve grupe: jedna grupa istraživanja polazi od analitičkog modela procesa spajanja i korišćenjem statističkih metoda određuje sličnost između stvarne i modelirane situacije, dok drugi pristup polazi od raspoloživosti velike količine eksperimentalnih podataka i korišćenjem različitih tehnika (npr. neuronske mreže, fazi logika, skriveni Markovljevi modeli) uči kontaktna stanja. Prva grupa metoda se uglavnom odnosi na jednostavnije probleme kod kojih su oba dela koja se spajaju konveksni poliedri, a kontaktna stanja se sastoje samo od jednog osnovnog kontakta. Druga grupa metoda nije primenljiva kada nije moguće (na primer vizuelno) utvrditi u svakom trenutku vremena u kom kontaktnom stanju se nalaze delovi i nema opštu upotrebljivost – upotrebljiva je samo za dimenzije, krutost, relativne zazore, materijale delova korišćene u eksperimentima. Stanje tehnike u svetu je trenutno takvo da je veliki broj istraživanja bio fokusiran na sisteme za aktivno popustljivo kretanje robota, ali da je za njegovu praktičnu implementaciju jedna od dve nedostajuće karike upravo sistem za prepoznavanje kontaktnih stanja.

U poglavlju opis tehničkog rešenja autori navode svoj koncept metodologije koja se sastoji iz dve grupe modula: jedna grupa se koristi za offline obučavanje, a druga za online prepoznavanje kontaktnih stanja. Pošto iz procesa nije moguće dobiti pouzdanu informaciju o relativnoj pozi delova koji se spajaju u realnom vremenu, prepoznavanje kontaktnih stanja se


vrši na osnovu sile spajanja koja se može relativno lako meriti. Online prepoznavanje je zasnovano na matematičkom prepoznavanju oblika i sastoji se od dva modula: 1) modul za prevođenje izmerene generalizovane sile spajanja u vektor obeležja i 2) modul za klasifikaciju kontaktnih stanja. Transformacije za proces prevođenja i granice klasa se dobijaju tokom offline obučavanja. Offline obučavanje kod predložene metodologije je zasnovano na mehaničkom modelu procesa, a ne na eksperimentalnim podacima čime je istovremeno omogućena ekstrakcija kvalitativnih obeležja i obučavanje sa nadzorom pošto je u svakom trenutku poznato trenutno kontaktno stanje. Za ekstrakciju kvalitativnih obeležja koristi se diskretna vejevlet transformacija koja omogućuje efikasno prepoznavanje različitih polinomialnih i spektralnih komponenata u signalu i efikasno korišćenje raspoloživog mehaničkog modela u ekstrakciji obeležja. Za generisanje granica između klasa koriste se mašine sa nosećim vektorima koje sistemu za prepoznavanje daju dobra svojstva generalizacije kroz kreiranje granica klasa sa maksimalnom marginom.

Metodologija je razrađena i eksperimentalno verifikovana za slučaj cilindričnog spajanja sa uvodnikom. Kreirana je mašina koja je zasnovana na kvalitativnim obeležjima ekstrahovanim iz sile spajanja. Zahvaljujući tome, ona je opšte primenljiva za prepoznavanje kontaktnih stanja u procesu cilindričnog spajanja sa uvodnikom, bez obzira na parametre (prečnik delova, krutost sistema, koeficijent trenja...) konkretnog procesa. Pokazano je da je u konkretnom slučaju za frekvencu odabiranja sile spajanja od 400Hz vreme prepoznavanja kontaktnog stanja 40ms (16 odbiraka). Iako je obučavanje bilo zasnovano na približnom, tj. značajno uprošćenom analitičkom modelu, eksperimenti su pokazali da su u realnom svetu sveukupne performanse mašine odlične.

Izložena metodologija daje novi okvir za generisanje mašine za prepoznavanje kontaktnih stanja u robotizovanoj montaži. Ona predlaže mašinu za prepoznavanje kontaktnih stanja zasnovanu na modelu sile spajanja. To je nov pristup koji uvodi značajne prednosti u odnosu na uobičajene metode koje su zasnovane strogo na eksperimentalnim podacima. Tokom kreiranja mašine za prepoznavanje sistematski se koriste apriorna znanja sadržana u analitičkom modelu procesa spajanja.

MIŠLJENJE

Autori tehničkog rešenja: Metoda za prepoznavanje kontaktnih stanja u robotizovanoj montaži su jasno prikazali i teorijski obradili kompletnu strukturu tehničkog rešenja. Prikazane mogućnosti metode i njena implementacija u realnim uslovima predstavljaju nov doprinos i otvaraju nove mogućnosti u oblasti aktivnog popustljivog kretanja robota u okviru robotizovanog spajanja delova. Sa zadovoljstvom predlažemo Istraživačko-stručnom veću Mašinskog fakulteta u Beogradu da novu metodu: **Metoda za prepoznavanje kontaktnih stanja u robotizovanoj montaži**, prihvati kao novo tehničko rešenje.



Prof. dr Janko Hodolič, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad



Prof. dr Miroslav Pilipović, Mašinski fakultet Univerziteta u Beograd

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ -
БРОЈ: 101/2
ДАТУМ: 17.01.2013.

На основу захтева руководиоца пројекта проф.др Петра Петровића бр. 101/1 од 17.01.2013. године и чл. 12.5 Статута Машинског факултета, Истраживачко стручно веће на седници од 17.01.2013. године, донело је следећу

О Д Л У К У

Да се за рецензенте Техничког решења рађеног у оквиру пројекта ТР 35007, под насловом: **„Метода за препознавање контактних стања у роботизованој монтажи“**, чији су аутори: доц.др Живана Јаковљевић, проф.др Петар Петровић, дипл.инж.маш. Владимир Миковић, дипл.инж.маш. Никола Лукић и дипл.инж.маш. Иван Данилов, именују:

- проф.др Јанко Ходолич, ФТН Нови Сад и
- др Мирослав Пилиповић, ред.проф. у пензији.

Одлуку доставити: Министарству просвете, науке и технолошког развоја РС, рецензентима и архиви Факултета ради евиденције.



ПРОДЕКАН
ЗА НАУЧНОИСТРАЖИВАЧКУ ДЕЛАТНОСТ


Проф.др Војкан Лучанин

ИСТРАЖИВАЖКО-СТРУЧНОМ ВЕЋУ
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ
Проф. др Војкан Лучанин
Продекан за научно-истраживачку делатност

Предмет: Предлог за избор рецензената техничког решења

Молим Истраживачко-стручно веће да за Техничко решење:

Метода за препознавање контактних стања у роботизованој монтажи

аутори:

Доц. др Живана Јаковљевић, дипл. инг. маш.,
Проф. др Петар Б. Петровић, дипл. инг. маш.,
Владимир Миковић, дипл. инг. маш.,
Никола Лукић, дипл. инг. маш.,
Иван Данилов, дипл. инг. маш.

реализовано у оквиру пројекта ТР35007 који је финансијски подржало Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије у периоду 2011. - 2014. године, именује два рецензента.

Наш предлог је да рецензију овог техничког решења обаве:

Проф. др Јанко Ходолич, Факултет техничких наука Нови Сад
Проф. др Мирослав Пилиповић, Машински факултет Универзитета у Београду

С поштовањем,

Проф. др Петар Б. Петровић
Руководилац пројекта ТР35007