



Ž. Jakovljević, P.B. Petrović¹

KONSTRUKCIJA AKCEPTORA KONTAKTNIH STANJA ZA AUTOMATSKU MONTAŽU²

Apstrakt

Prepoznavanje kontaktnih stanja između delova tokom procesa spajanja predstavlja značajan element sistema za aktivno popustljivo kretanje robota. U oblasti kreiranja informacionih mašina za prepoznavanje kontaktnih stanja tokom prethodnih decenija su sprovedena određena istraživanja. Za sve predložene mašine je zajedničko da će one prepoznati neko od kontaktnih stanja bez obzira na to da li je tok procesa spajanja regularan ili ne. Čak i kada se u toku procesa jave neke nepoželjne pojave (stick-slip, zaglavljivanje, zaklinjavanje...) neko od kontaktnih stanja će biti prepoznato. Kako bi se odredilo da li je konkretan proces spajanja regularan pogodno bi bilo kreirati neku vrstu sistema za dijagnostiku procesa spajanja.

Imajući u vidu da se kontaktna stanja u toku procesa spajanja ne pojavljuju proizvoljno već samo u određenom kontekstu, u ovom radu se daje formalni okvir za prepoznavanje i dijagnostiku neregularnosti u procesu spajanja zasnovan na opštoj matematičkoj teoriji automata i formalnih gramatika veštačkih jezika. Polazeći od mogućih regularnih prelaza kontaktnih stanja u okviru procesa spajanja formira se automat koji prihvata sve regularne sekvence spajanja. Ovaj automat se dalje dopunjuje do automata za dijagnostiku koji pored regularnih sadrži i sve neregularne sekvence procesa. Automat za dijagnostiku se kreira tako da može prepoznati sve osmotrive i neosmotrive neregularnosti u okviru procesa.

Predložena metodologija je razrađena i eksperimentalno verifikovana za slučaj cilindričnog spajanja sa uvodnikom.

1. UVOD

Filozofija aktivnog popustljivog upravljanja robotizovanom montažom zasnovanog na kontaktu polazi od činjenice da svaka kontaktna situacija između objekta koji drži end efektor i njegovog okruženja generiše određeni oblik sile/momenta. Takva informacija o generalisanoj sili se može sa dovoljnom tačnošću snimiti i klasifikovati kako bi se reprezentovalo odgovarajuće kontaktno stanje koje karakteriše jedinstvena prostorna konfiguracija interakcije između pokretnog objekta i okruženja. Kako bi se upravljalo planiranim procesom spajanja delova u kontaktu neophodno je izvršiti prepoznavanje kontaktnog stanja u kome se delovi nalaze.

Do sada su sprovedena određena istraživanja u cilju kreiranja informacione mašine za prepoznavanje kontaktnih stanja u okviru različitih procesa spajanja. U [1, 2] je predložena informaciona mašina za prepoznavanje kontaktnih stanja u procesu cilindričnog spajanja sa uvodnikom. Metodologija za prepoznavanje nekih od kontaktnih stanja u procesu postavljanja otvora na čep sa velikim zazorom je predložena u [3]. Prepoznavanje kontaktnih stanja u procesu postavljanja kocke u ugao je razmatrano u [4]. Ono što je zajedničko za sve predložene mašine jeste da će one prepoznati neko od kontaktnih stanja bez obzira na to da li je tok procesa spajanja regularan ili ne. Čak i kada se u toku procesa jave neke nepoželjne pojave (stick-slip, zaglavljivanje, zaklinjavanje...) date mašine će prepoznati neko od kontaktnih stanja. Kako bi se odredilo da li je konkretan proces spajanja regularan ili ne pogodno bi bilo kreirati neku vrstu sistema za dijagnostiku procesa spajanja.

¹ Dr Živana Jakovljević, Prof. dr Petar B. Petrović, Katedra za proizvodno mašinstvo, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Kraljice Marije 16, 11120 Beograd, Srbija; e-mail: zjakovljevic@mas.bg.ac.rs

² U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja se sprovode na projektu TR35007 Inteligentni robotski sistemi za ekstremno diverzifikovanu proizvodnju koji finansijski podržava Ministarstvo prosvete i nauke Republike Srbije.

Pošto se kontaktna stanja u toku procesa spajanja ne pojavljuju proizvoljno već samo u određenom kontekstu, u ovom radu se daje formalni okvir za prepoznavanje i dijagnostiku neregularnosti u procesu spajanja zasnovan na opštoj matematičkoj teoriji automata i formalnih gramatika veštačkih jezika.

2. OSNOVNE DEFINICIJE

Topološki posmatrano, objekti koji se spajaju su konveksni i konkavni trodimenzioni poliedri koji se međusobno dodiruju preko tri topološka elementa: površine, ivice i temena. Kako bi izvršila klasifikaciju kontakata na osnovu njihove topološke sličnosti Xiao u [5] uvodi pojam osnovnog kontakta. Ona definiše osnovni kontakt (Principal Contact) kao jedinstveni kontakt između para topoloških elemenata površine (npr. strane, ivice ili temena) različitih objekata koji nisu granični elementi drugih topoloških elemenata površina u istom kontaktu. Polazeći od navedenog opisa osnovnog kontakta, u ovom radu se uvode sledeće formalne definicije:

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 [1]: *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.

3. MODELIRANJE KONTEKSTA POJAVE KONTAKTNIH STANJA

Proces spajanja delova se može posmatrati kao prelaz iz inicijalnog u ciljano kontaktno stanje, a tok konkretnog procesa spajanja je definisan trajektorijom kroz prostor kontaktnih stanja. Kontaktna stanja se u procesu spajanja ne pojavljuju stohastički - ona se mogu pojaviti samo u određenom kontekstu. Za svako kontaktno stanje se može definisati skup kontaktnih stanja koja mu mogu prethoditi - skup njegovih prefiksa i skup kontaktnih stanja koja se mogu pojaviti nakon njega - skup sufiksa. Za konkretan proces spajanja moguće je formirati skup dozvoljenih prelaza između kontaktnih stanja. Ovaj skup može poslužiti kao osnova za formiranje informacionih mašina za prepoznavanje procesa spajanja zasnovanih na matematičkoj teoriji automata [6, 7].

U okviru pristupa koji se ovde predlaže kontaktna stanja u okviru jedne klase procesa spajanja posmatraju se kao simboli, tj. dalje nedeljivi elementi neke azbuke. Nad ovom azbukom je moguće formirati jezik $L(G)$. Reči jezika $L(G)$ predstavljaju prihvatljive sekvence kontaktnih stanja čije je značenje (semantika) izvedeno iz fizičkih osnova procesa spajanja i odnosi se na prihvatljive, odnosno fizički izvodljive sekvence kontaktnih stanja u okviru procesa spajanja. Elementi gramatike G jezika $L(G)$ su:

T - skup terminalnih simbola koji predstavlja *skup kontaktnih stanja*

P - konačan skup produkcija koji se definiše na osnovu mogućih prelaza između kontaktnih stanja

N - skup neterminalnih simbola koji se koriste u pravilima

Sve gramatike se po hijerarhiji Čomskog (Chomsky) mogu svrstati u četiri tipa (0-3) u zavisnosti od vrste produkcija koje sadrže. Za svaku regularnu gramatiku G tipa 3 po klasifikaciji Čomskog moguće je kreirati apstraktnu mašinu - deterministički ili nedeterministički konačni automat u formi akceptora $FSA = (Q, T, f, S)$ (FSA - Finite State Acceptor), gde je Q skup unutrašnjih stanja FSA, T je skup ulaznih simbola, f funkcija prelaza, S inicijalno stanje.

FSA sve ulazne stringove $\Sigma \in T^*$ klasifikuje u reči koje pripadaju jeziku L i reči koje ne pripadaju ovom jeziku. Za druge tipove gramatika na raspolaganju su druge vrste mašina. Stanja ovog automata su neterminalni simboli gramatike G . Prelazi između stanja (funkcija f) se vrše kada je na ulazu u automat terminalni simbol T . Početno stanje automata S (start) je polazni neterminalni simbol gramatike, a konačno (terminalno) stanje automata se označava sa H (halt). Za konkretno spajanje definisano topologijom delova generisni FSA će prihvatiti sve sekvence kontaktnih stanja koje opisuju regularan tok procesa spajanja.

4. DIJAGNOSTIKA PROCESA SPAJANJA

Konačni automat FSA opisan u prethodnom odeljku prihvata sve sekvence koje odgovaraju regularnom toku procesa spajanja. On može poslužiti kao osnova za kreiranje sistema za dijagnostiku procesa.

Naime svi stringovi iz Σ koji se generišu u toku procesa (bio on regularan ili ne) mogu se particionisati na sledeći način:

$$\Sigma = \Sigma_o \cup \Sigma_{uo} \quad (1)$$

gde Σ_o predstavlja skup svih osmotrivih događaja – niza kontaktnih stanja u sistemu. U ovaj skup osmotrivih nizova kontaktnih stanja pored svih regularnih sekvenci kontaktnih stanja koje pripadaju jeziku L , ulaze i sve osmotrive sekvence koje se odnose na pojedine neregularnosti u procesu - Σ_f . Naime, za neke neregularnosti je moguće odrediti stringove Σ_{fo} koji se mogu iskoristiti za prepoznavanje konkretne greške u toku procesa. Za sve ostale neregularnosti, koje generalno nisu poznate proces će generisati neku od sekvenci iz skupa Σ_{uo} .

Skup svih neregularnosti u toku procesa se može particionisati na sledeći način:

$$\Sigma_f = \Sigma_{fo} \cup \Sigma_{uo} = \Sigma_{fo1} \cup \Sigma_{fo2} \cup \dots \cup \Sigma_{fok} \cup \Sigma_{uo} \quad (2)$$

Gde su Σ_{foi} osmotrive, a Σ_{uo} neosmotrive neregularnosti. Uloga automata za dijagnostiku je da izvrši prepoznavanje stanja u koja sistem dolazi u trenutku dešavanja neke od neregularnosti. Pri tom se svaka od osmotrivih neregularnosti Σ_{foi} pojedinačno prepoznaje, dok se neosmotrive neregularnosti Σ_{uo} prepoznaju zbirno.

Kako bi se neki automat mogao iskoristiti za dijagnostiku, neophodno je da jezik koji ovaj automat prihvata bude dijagnozabilan [9-10]. Jezik L_d je dijagnozabilan ako zadovoljava sledeće uslove:

1. Jezik L_d je živ. To znači da u svakom stanju postoji definisana tranzicija - sistem ne može doći u tačku u kojoj nijedan događaj nije moguć.
2. U jeziku L_d ne postoji ciklus neosmotrivih događaja, tj.

$$\exists n_0 \in \mathbf{N} \text{ takav da } \forall ust \in L_d, s \in \Sigma_{uo}^* \Rightarrow \|s\| \leq n_0 \quad (3)$$

što znači da sistem ne može da generiše proizvoljno dug niz neosmotrivih događaja.

Jezik L koji opisuje regularne sekvence procesa spajanja nije živ jezik. Naime, ovaj jezik ne sadrži sekvence koje opisuju neregularne procese spajanja. U skladu sa tim u automatu FSA nisu definisane tranzicije za slučaj pojave stringova koji pripadaju Σ_f .

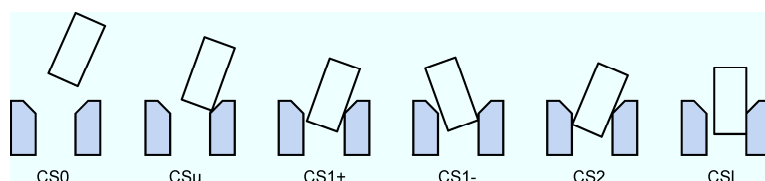
Kako bi se formirao automat za dijagnostiku - FSA_d , jezik L je neophodno proširiti do jezika L_d koji će sadržati sve moguće sekvence kontaktnih stanja koje se mogu pojaviti tokom procesa spajanja bilo da su one regularne ili ne. Pojedini neregularnostima $F_{o1}, F_{o2}, \dots, F_{ok}, F_{uo}$ odgovaraju pojedine sekvence koje pripadaju

$\Sigma_{f_{01}}, \Sigma_{f_{02}}, \dots, \Sigma_{f_{0k}}, \Sigma_{u_0}$, respektivno. Određene tranzicije u okviru automata FSA_d koji prihvata reči iz jezika L_d se mogu iskoristiti za prepoznavanje neregularnosti $F_{01}, F_{02}, \dots, F_{0k}, F_{u_0}$ u okviru procesa.

5. PRIMER CILINDRIČNOG SPAJANJA DELOVA

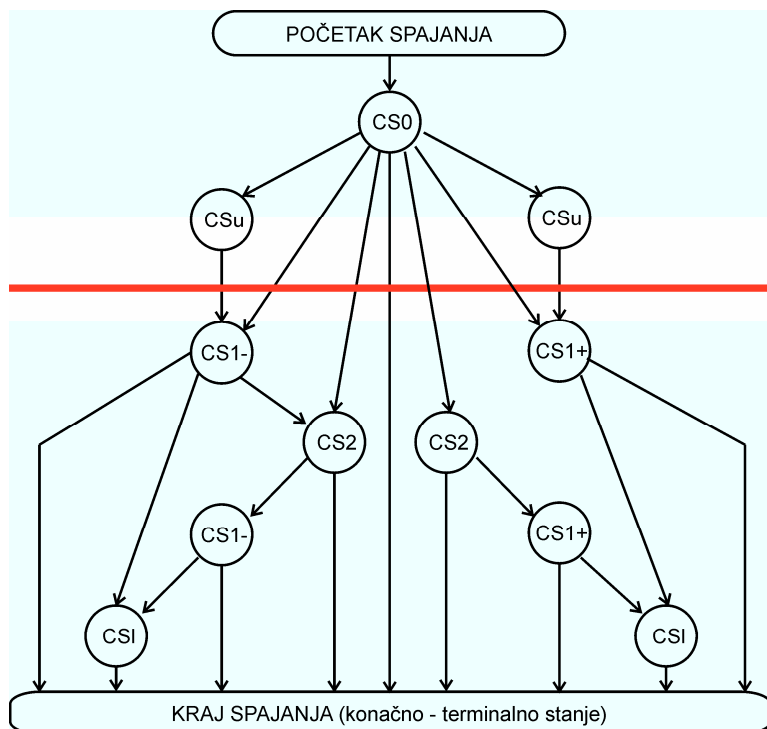
Kontaktne stanja koja se mogu javiti pri cilindričnom spajanju sa uvodnikom prikazana su na slici 1 i to su:

1. stanje bez kontakta (CS0),
2. kontakt po uvodniku (CSu),
3. kontakt u jednoj tački između ivice na prelazu iz uvodnika u otvor i cilindra čepa (CS1+),
4. kontakt u jednoj tački između cilindra otvora i oboda čepa (CS1-),
5. kontakt u dve tačke (CS2), i
6. linijski kontakt (CSI).



Slika 1: Kontaktne stanja pri cilindričnom spajanju sa uvodnikom

U zavisnosti od karaktera inicijalne greške relativnog položaja čepa u odnosu na otvor moguće su različite varijante tranzicija između pojedinih kontaktnih stanja u toku ovog procesa. Imajući u vidu ponovljivost komercijalno raspoloživih robota i tolerancije između delova koji se spajaju, može se smatrati da se manipulacioni mehanizam u realnosti nikada ne kreće tačno u pravcu spajanja delova. Greška pozicije i orijentacije prilikom spajanja su praktično funkcija vremena. Rezultat je velika raznolikost mogućih prelaza kontaktnih stanja. Iz tog razloga sveobuhvatan dijagram procesa cilindričnog spajanja praktično nije moguće prikazati u formi datoj na slici 2. Na slici 2 naveden je dijagram koji se odnosi na idealizovan slučaj manipulacionog robota koji savršeno izvršava postavljeni zadatak spajanja.



Slika 2: Jedan dijagram toka procesa cilindričnog spajanja sa uvodnikom [11, 12]; odnosi se na idealizovan slučaj manipulacionog robota

Analizom procesa cilindričnog spajanja, uzimajući u obzir realno kretanje manipulacionog mehanizma, dolazi se do zaključka da su mogući prelazi između kontaktnih stanja upravo prelazi dati u tabeli 1.

Tabela 1: Mogući prelazi kontaktnih stanja tokom robotizovanog cilindričnog spajanja

CS0 → CS0	CS0 → CS1-	CS0 → CS1+	CS0 → CS1	CS0 → CS2
CS0 → CSu	CSu → CSu	CSu → CS0	CSu → CS1-	CSu → CS1+
CS1+ → CS1+	CS1+ → CS0	CS1+ → CS1	CS1+ → CS2	CS1- → CS1-
CS1- → CS0	CS1- → CS2	CS1- → CS1	CS1 → CS1	CS1 → CS0
CS1 → CS1-	CS1 → CS1+	CS2 → CS2	CS2 → CS0	CS2 → CS1+
CS2 → CS1-				

Opisanom metodologijom (Odeljak 3) zasnovanom na teoriji veštačkih jezika moguće je prikazati sve trajektorije kroz kontaktna stanja tokom različitih procesa cilindričnog spajanja. U slučaju sekvenci kontaktnih stanja u procesu cilindričnog spajanja može se formirati jezik $L(G)$ sa gramatikom G čiji su elementi:

T - skup terminalnih simbola (skup kontaktnih stanja):

CS0, CSu, CS1+, CS1-, CS2, CS1

P - konačan skup produkcija definisan na osnovu tabele:

$S \rightarrow CS0S | CSuA | CS1+B | CS1-C | CS2D | CS1E | \lambda$

$A \rightarrow CS0S | CSuA | CS1+B | CS1-C$

$B \rightarrow CS1+B | CS2D | CS1E | CS0F | \lambda$

$C \rightarrow CS1-C | CS2D | CS1E | CS0F | \lambda$

$D \rightarrow CS2D | CS1+B | CS1-C | \lambda$

$E \rightarrow CS1E | CS1+B | CS1-C | CS0F | \lambda$

$F \rightarrow CS0F | CS1+B | CS1-C | CS2D | CS1E | \lambda$

gde je sa λ označena prazna reč.

N - skup neterminalnih simbola koji se koriste u pravilima je dat sa:

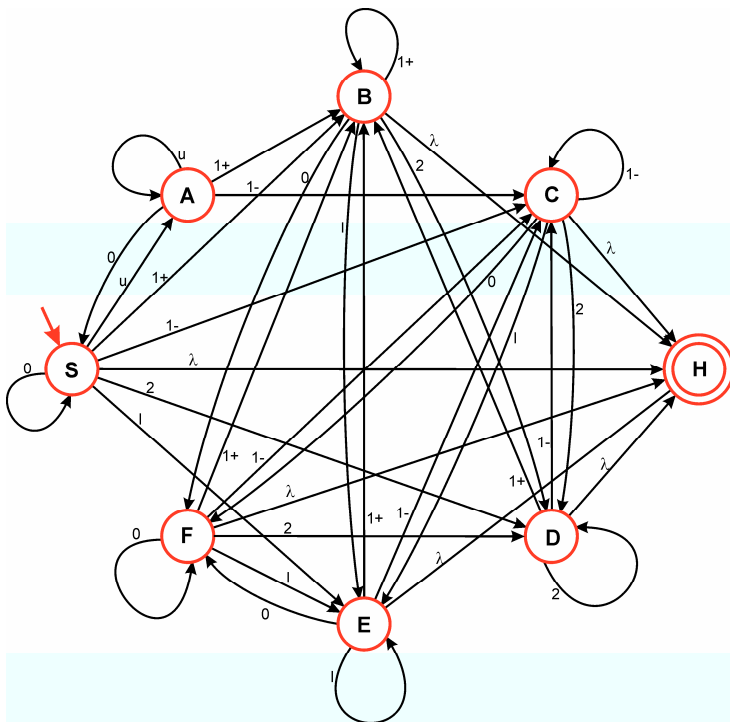
$N = \{A, B, C, D, E, F\}$

Ovako definisana gramatika G predstavlja regularnu gramatiku tipa 3 po klasifikaciji Chomsky-og. Jedna od reči koja se može kreirati ovom gramatikom je data sa:

$CS0 * CSu * CS1+ * CS2 * CS1+ * \lambda$

(4)

gde * predstavlja Klinovu zvezdu.



Slika 3: Konačni automat u formi akceptora koji prihvata sve regularne sekvence procesa cilindričnog spajanja

Na osnovu gramatike G moguće je kreirati akceptor konačnih stanja $FSA = (Q, T, f, S)$ prikazan na slici 3. Dati FSA predstavlja minimalan deterministički automat. Svaki regularan proces spajanja (koji se može opisati sekvencom koja se sastoji iz prelaza kontaktnih stanja datih u tabeli 1) će biti prihvaćen od strane FSA.

Jezik L nije živ jezik. Njega je moguće dopuniti do živog jezika L_d koji sadrži stringove koji predstavljaju sve moguće kombinacije kontaktnih stanja. Za jezik L_d je moguće formirati konačni automat u formi akceptora $FSA_d = (Q_1, T, f_1, S)$ koji će pored regularnih prihvatiti i sve neregularne sekvence u toku procesa cilindričnog spajanja.

Prilikom izvođenja eksperimenata o kojima će biti reči u odeljku 6, došlo je do pojave stick-slip efekta. U datim slučajevima FSA nije prihvatio reči – sekvence kontaktnih

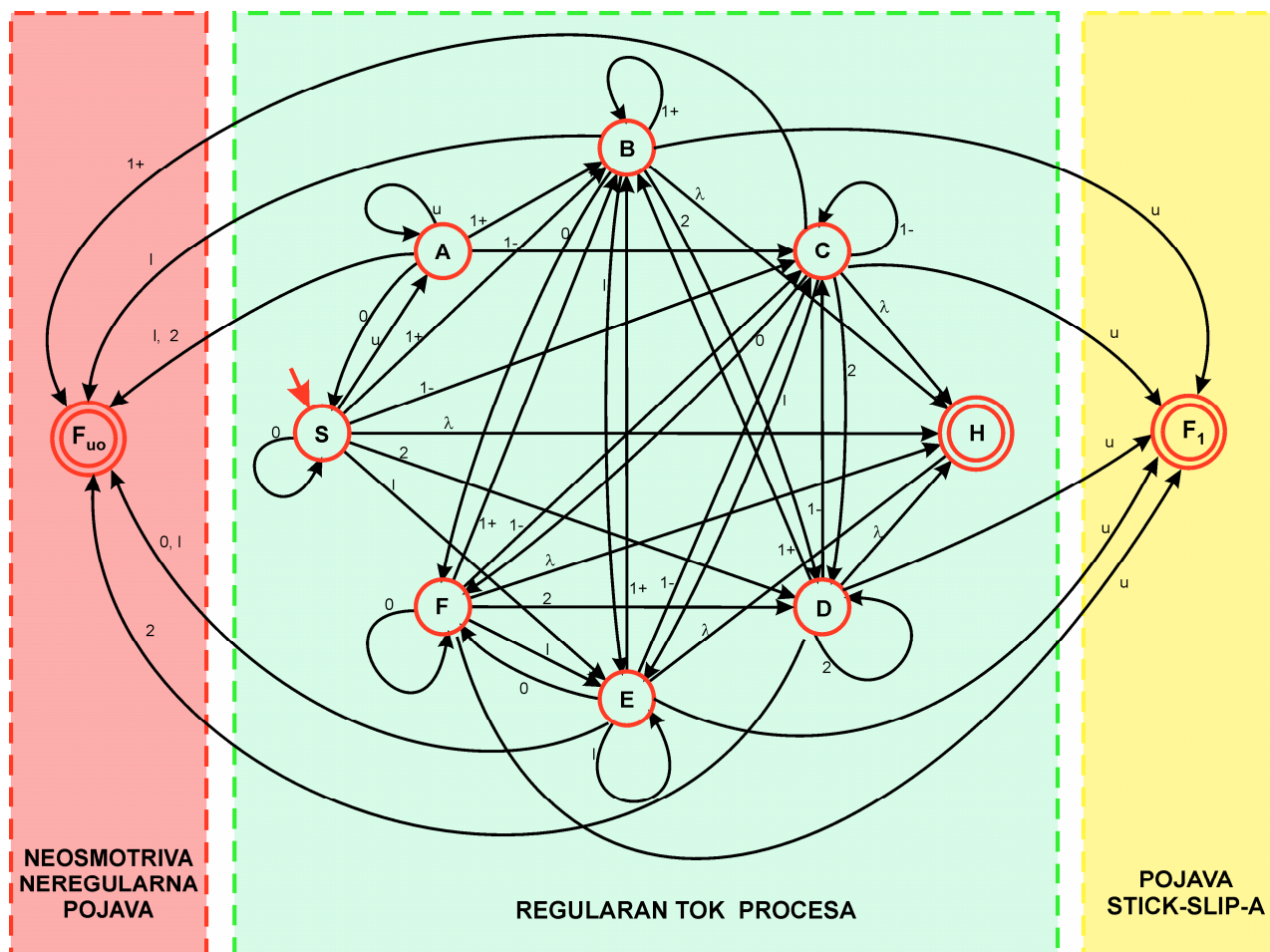
stanja koja su se pojavila u toku procesa spajanja. Naime, mašina za prepoznavanje kontaktnih stanja je prepoznala kontaktno stanje CSu nakon pojave kontaktnog stanja CS2. Ovakva sekvenca u regularnom procesu spajanja nije moguća. Daljom analizom je utvrđeno da prepoznavanje CSu u određenom kontekstu implicira pojavu stick-slip efekta. Sledeće reči govore da je u procesu došlo do stick-slip-a:

$$\Sigma_{f01} = \{CS1+CSu, CS1-CSu, CS1CSu, CS2CSu, CS1+CS0^*CSu, CS1-CS0^*CSu, CS1CS0^*CSu\} \quad (5)$$

Navedene reči se mogu opisati sledećim pravilima:

- S** → CS1+B|CS1-C|CS1E|CS2D
- B** → CSuF₁|CS0F
- C** → CSuF₁|CS0F
- D** → CSuF₁|CS0F
- E** → CSuF₁
- F** → CSuF₁|CS0F

koja se mogu dodati u automat FSA.



Slika 4: Konačni automat u za dijagnostiku procesa cilindričnog spajanja

Stick-slip je u procesu cilindričnog spajanja sa uvodnikom osmotriva neregularnost koja se opisuje rečima datim u okviru Σ_{f01} . Sve ostale neregularnosti koje nisu sadržane u rečima jezika **L** i u Σ_{f01} pripadaju stringovima iz skupa Σ_{u0} . One označavaju neosmotriva neregularnosti i mogu se opisati sledećim sekvencama:

$$\Sigma_{u0} = \{CSuCS1, CSuCS2, CS1+CS1-, CS1-CS1+, CS2CS0, CS2CS1, CS1CS2\} \quad (6)$$

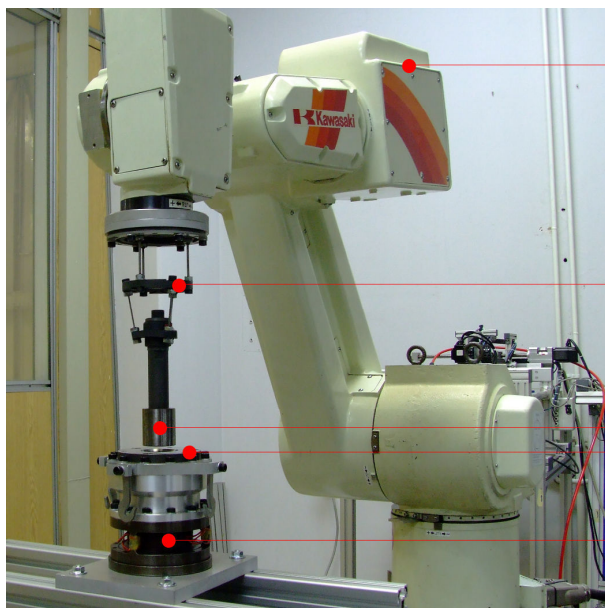
Sledeća pravila opisuju reči iz Σ_{uo} :

$S \rightarrow CSuA|CS1+B|CS1-C|CSIE|CS2D$
 $A \rightarrow CSIF_{uo}|CS2F_{uo}$
 $B \rightarrow CS1-F_{uo}$
 $C \rightarrow CS1+F_{uo}$
 $D \rightarrow CS0F_{uo}|CSIF_{uo}$
 $E \rightarrow CS2F_{uo}$

Ukoliko se pored pravila koja opisuju pojavu stick-slip efekta u automat FSA dodaju i pravila koja opisuju i sve ostale neosmotrivne neregularne pojave u procesu, moguće je formirati automat FSA_d prikazan na slici 4. FSA_d će prihvatiti sve sekvence procesa spajanja bilo da su one regularne ili ne. Sve regularne sekvence procesa spajanja se dešavaju u delu automata koji odgovara FSA. Ulazak u stanje F_1 automata FSA_d govori o pojavi stick-slip efekta, dok ulazak u stanje F_{uo} govori da se u sistemu za spajanje dešava neka nepoznata neregularna pojava. Nakon ulaska u stanja F_{uo} ili F_1 proces spajanja je neophodno zaustaviti.

6. EKSPERIMENTALNA VERIFIKACIJA

U cilju provere funkcionalnosti predložene metodologije za dijagnostiku procesa spajanja izvršen je niz eksperimenata u Zavodu za mašine alatke Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Iako su eksperimenti vršeni u laboratoriji, imajući u vidu stanje eksperimentalne opreme, a pre svega industrijskog robota, ne može se reći da uslovi izvođenja eksperimenata značajno kontrolisani u odnosu na uslove u okviru proizvodnog pogona.



Slika 5: Eksperimentalna instalacija

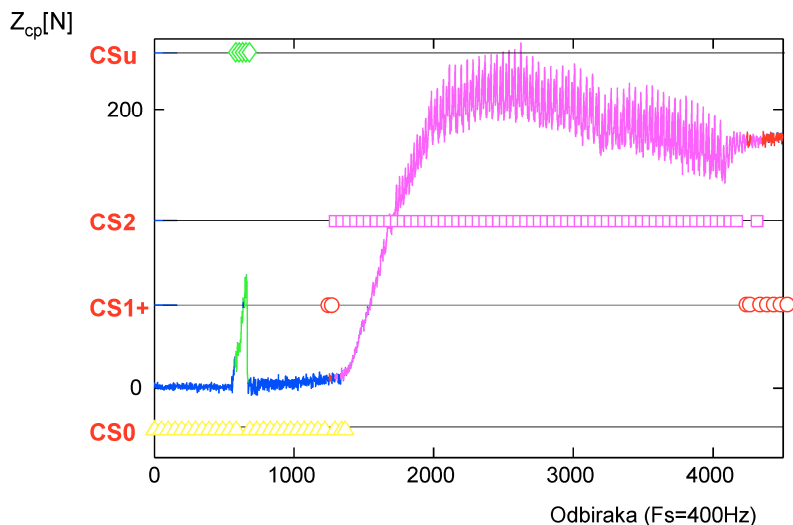
Eksperimentalna instalacija (slika 5) se sastoji od: 1) industrijskog robota Kawasaki JS10, 2) radnog stola, 3) RCC jedinice, 4) šestokomponentnog senzora sile, 5) pokretnog objekta – čep, 6) nepokretnog objekta – otvor, 7) sistema za akviziciju. Eksperimentalna instalacija je zasnovana na industrijskom robotu vertikalne antropomorfne konfiguracije sa šest stepeni slobode Kawasaki JS10 nosivosti 10kg i dohvata 1650mm. Radi uvođenja selektivne popustljivosti na robot je postavljena RCC jedinica kreirana u Centru za nove tehnologije Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu [11]. U datoj konfiguraciji lateralna krutost RCC jedinice je $k_x=227N/mm$, a ugaona $k_\theta=1,8 \cdot 10^{-6} Nmm/rad$. Na RCC jedinicu je

postavljen pokretni objekat - čep. Na radnom stolu se nalazi šestokomponentni softverski dekuplovan senzor sile takođe konstruisan u Centru za nove tehnologije Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu [11, 13]. Senzor je baziran na mernim trakama zalepljenim na popustljive elemente. Na senzor sile je postavljen objekat iz okruženja - otvor

Čep i otvor poluprečnika $R=20mm$ sa zazorom od $20\mu m$ i uvodnikom $3/45^\circ$ su izrađeni od cementiranog čelika. U toku izvođenja eksperimenta kontaktne površine su blago zauljene i ostvaren je koeficijent trenja $\mu=0.17$.

Kondicioniranje i akvizicija signala sa mernih traka je izvršena pomoću Spider akvizicionog sistema. Merni opseg od $\pm 3mV/V$ je konvertovan sa rezolucijom od 50000 kvantova i frekvencom odabiranja od 400Hz.

Obrada prikupljenih signala i prepoznavanje kontaktnih stanja je izvršeno metodologijom prikazanom u [2, 3].



Slika 6: Vertikalna komponenta sile spajanja u toku jednog regularnog procesa spajanja paralelno sa rezultatima prepoznavanja kontaktnih stanja

Snimljena vertikalna komponenta sile spajanja u toku jednog regularnog procesa paralelno sa rezultatima prepoznavanja kontaktnih stanja je prikazana na slici 6.

Tokom ovog procesa spajanja je formirana sledeća rečenica:

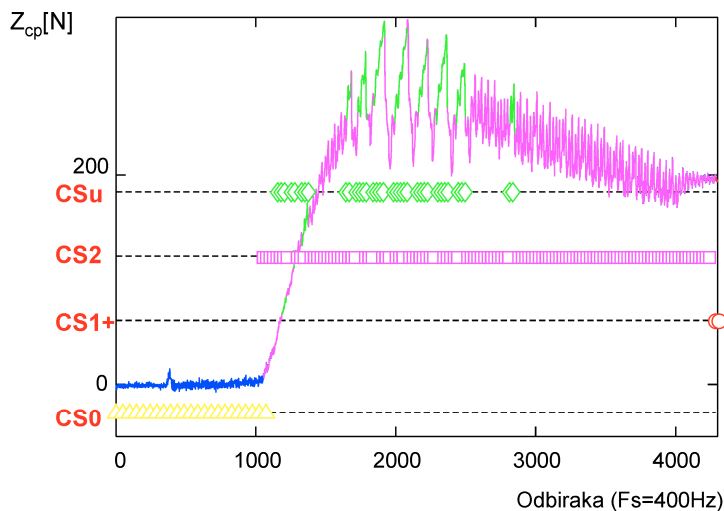
$$CS0*CSu*CS0*CS1+*CS2*CS1+* \quad (7)$$

Ova rečenica se prepoznaje u okviru dela automata FSA_d koji odgovara automatu FSA . Automat FSA_d ne ulazi ni u stanje F_1 ni u stanje F_{u0} koja odgovaraju pojavi stick-slip efekta odnosno neosmotrivim neregularnim događajima, respektivno.

Prilikom izvođenja određenog broja eksperimenata mašina za prepoznavanje kontaktnih stanja [1, 2] je prepoznala pojavu kontaktnog stanja CSu van konteksta. Došlo je do pojave CSu nakon pojave CS2 što u regularnom toku procesa spajanja nije moguće. Vertikalna komponenta sile spajanja u toku jednog takvog eksperimenata paralelno sa rezultatima prepoznavanja kontaktnih stanja prikazana je na slici 7. Rečenica koja odgovara ovom procesu spajanja:

$$CS0*(CS2*CSu*)*CS2 CS1+ \quad (8)$$

Nije prihvaćena od strane FSA .



Slika 7: Vertikalna komponenta sile spajanja u toku procesa spajanja sa stick-slip efektom paralelno sa rezultatima prepoznavanja kontaktnih stanja

Prilikom izvođenja ovih eksperimenata brzina spajanja je bila mala - 4mm/s. Analizom generisanih sila i poređenjem njihovog karaktera sa karakterom sila koje deluju na blok tokom njegovog vučenja malom

brzinom preko opruge kada se javlja stick-slip efekat [3] može se zaključiti da je ovde upravo došlo do pojave stick-slipa. Takođe, posmatrači eksperimenta su na osnovu relativnog kretanja delova u kontaktu i pojave karakterističnog zvuka došli do zaključka da je došlo baš do pojave ovog efekta.

Analizom eksperimenata u kojima je došlo do pojave stick-slip-a formirane su rečenice date u relaciji (5) i na osnovu njih deo automata FSA_d koji se koristi za dijagnostifikovanje pojave stick-slipa. Dakle, u slučaju da se u procesu pojavi stick-slip automat FSA_d će ući u stanje F_1 .

7. ZAKLJUČAK

Sistemi za prepoznavanje kontaktnih stanja su koncipirani tako da će uvek prepoznati neko od raspoloživih (generisanih topološkim modelom) kontaktnih stanja čak i u slučaju kada se u procesu dešavaju neke nepredviđene pojave. U ovom radu je pokazano da se kontaktna stanja u procesu spajanja pojavljuju samo u određenom kontekstu. Pojava ("prepoznavanje") kontaktnog stanja van njegovog konteksta ukazuje na pojavu nekih neregularnih situacija. Kao formalni okvir za prepoznavanje konteksta pojave kontaktnih stanja u ovde je iskorišćena teorija automata bazirana na primeni veštačkih jezika. Pokazano je da je polazeći od kontaktnih stanja kao dalje nedeljivih simbola moguće formirati azbuku kao osnovu za generisanje veštačkog jezika čije su reči prihvatljive sekvence (trajektorije kroz prostor) kontaktnih stanja.

Proširivanjem ovako dobijenog jezika moguće je dobiti živi jezik koji će sadržati sve moguće sekvence kontaktnih stanja, bile one regularne ili ne. Neke od neregularnosti koje se mogu pojaviti u procesu su osmotrive, a neke ne.

Za generisani živi jezik formira se konačni automat u formi akceptora. Ovaj automat pored toga što prepoznaje sve regularne trajektorije kontaktnih stanja, vrši i dijagnostiku neregularnosti u procesu. Ukoliko se pojavi osmotriva neregularnost, automat će biti u stanju da je tačno dijagnostikuje. Neosmotrive neregularnosti se prepoznaju zbirno – prepoznaje se da je došlo do pojave neregularnosti, ali ne i tačno o kojoj neregularnosti se radi.

Data metodologija je primenjena i eksperimentalno verifikovana na primeru cilindričnog spajanja sa uvodnikom. Za ovaj slučaj spajanja je formiran automat koji pored prepoznavanja regularnog toka spajanja vrši i prepoznavanje neregularnosti u procesu. U konkretnom slučaju moguće je izvršiti prepoznavanje pojave stick-slip efekta kao osmotrive neregularnosti i prepoznavanje pojave svih ostalih neosmotrivih neregularnosti u procesu.

Konstrukcijom odgovarajućeg akceptora moguće je formirati mašine za dijagnostiku procesa spajanja za različite klase spojeva bilo da se radi o spajanju tipa čep u otvor različitih poprečnih preseka, bilo da se radi o nekim drugim klasama spojeva, npr. tipa kvadar u tetraedar. Takođe, informacije dobijene u toku rada automata mogu se dalje iskoristiti za identifikaciju nekih neosmotrivih neregularnosti i proširenje automata u smislu prevođenja određenog broja neregularnosti iz klase neosmotrivih u klasu osmotrivih.

8. REFERENCE

- [1] Jakovljević, Ž., Učenje i kontekstno prepoznavanje procesa spajanja u robotizovanoj montaži, doktorska disertacija, Mašinski fakultet u Beogradu, 2010
- [2] Jakovljevic, Z., Petrovic, P., B., Recognition of Contact States in Robotized Assembly Using Qualitative Wavelet Based Features and Support Vector Machines. In: Hinduja S, Li L (ed) Proceedings of the 36th International MATADOR Conference, 1st edn. Springer Verlag London Ltd, pp. 305-308, 2010
- [3] Shirinzadeh, B., Zhong, Y., Tilakaratna, P., D., W., Tian, Y., Dalvand, M., M., A hybrid contact state analysis methodology for robotic-based adjustment of cylindrical pair, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 52, pp. 329-342, 2011

- [4] Gadeyne, K., Lefebvre, T., Bruyninckx, H., Bayesian hybrid model-state estimation applied to simultaneous contact formation recognition and geometrical parameter estimation. *International Journal of Robotic Research*, Vol. 24, pp. 615-630, 2005
- [5] Xiao, J., Liu, L., Contact states, Representation and recognizability in the presence of uncertainties, *Proceedings of International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1151-1156, Victoria, Canada, 1998
- [6] Milačić, V., Bojanić, P., Milačić, M., *Tehnička kibernetika*, Mašinski fakultet Beograd, 1994
- [7] Parkes, A., P., *A Concise Introduction to Languages and Machines*, ISBN:978-1-84800-120-6, Springer-Verlag, London, 2008
- [8] Paoli, A., Lafortune, S., Safe diagnosibility for fault-tolerant supervision of discrete-event systems, *Automatica*, Vol. 41, pp. 1335-1347, 2005
- [9] Sampath, M., Sengupta, R., Lafortune, S., Sinnamohideen, K., Teneketzis, D., Diagnosibility of Discrete-Event Systems, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 40, pp. 1555-1575, 1995
- [10] Sampath, M., Sengupta, R., Lafortune, S., Sinnamohideen, K., Teneketzis, D., Failure Diagnosis Using Discrete-Event Models, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 4, pp. 105-123, 1996
- [11] Petrovic, P., B., *Istraživanje i razvoj sistema za adaptivno spajanje delova u montaži primenom robota*, Magistarski rad, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 1989.
- [12] Arai, T., Application of knowledge engineering on automatic assembly of parts with complicated shapes, *Proceedings of the sixth ICAA*, pp. 67-76, 1985
- [13] Petrović, P., Milačić, V., Višekomponentni senzor sile za robotizovanu montažu, *Zbornik radova 8. jugoslovenskog simpozijuma CIM u strategiji tehnološkog razvoja industrije prerade metala*, pp. 191-200, Cavtat, 1989

DESIGN OF CONTACT STATES ACCEPTOR FOR AUTOMATED ASSEMBLY

Abstract

Recognition of contact states between parts during mating process represents a significant element of the system for active compliance robot motion. In the field of design of information machines for contact states recognition there have been some previous work. All proposed machines will recognize some of the available contact states regardless the mating process regularity. Even when there is some of nonregular events in the process (stick-slip, jamming, wedging, e.g.) some of the contact states will be recognized. In order to find out whether the given part mating process is regular it would be convenient to create a kind of system for part mating process monitoring.

Since the contact states during process do not come arbitrary but in certain context, in this paper we give a framework for recognition and diagnosis of non-regularities in the part mating process. The framework is based on general theory of automata and languages. Starting from possible regular contact states transitions in part mating, an automaton which accepts all regular sequences of contact states transitions is created. This automaton is supplemented to the automaton for diagnostics which besides all regular contains all non-regular process sequences. The automaton for diagnosis is created in such a way that it can recognize all the observable and unobservable non-regularities within the process.

Proposed methodology is elaborated and experimentally verified using an example of cylindrical part mating with chamfer crossing.