

PREPOZNAVANJE KONTAKTNIH STANJA U ROBOTIZOVANOJ MONTAŽI

CONTACT STATES RECOGNITION
IN ROBOTIZED ASSEMBLY

Živana JAKOVLJEVIĆ
Petar B. PETROVIĆ

Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu
Faculty of Mechanical Engineering - University of Belgrade

PREPOZNAVANJE KONTAKTNIH STANJA U ROBOTIZOVANOJ MONTAŽI

Dr Živana Jakovljević
Dr Petar B. Petrović

ITS Inteligentni tehnološki sistemi
IMS Intelligent Manufacturing Systems

Knjiga
Volume

10

Serijski monografski radovi
A series of monographs

Urednik serije prof. dr Vladimir R. Milačić
Editor Prof. Dr. Vladimir R. Milačić

**PREPOZNAVANJE KONTAKTNIH
STANJA U ROBOTIZOVANOJ
MONTAŽI**

**CONTACT STATES RECOGNITION IN
ROBOTIZED ASSEMBLY**

Živana Jakovljević
Petar B. Petrović

Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu
Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade

Doc. dr Živana Jakovljević
Prof. dr Petar B. Petrović

**PREPOZNAVANJE KONTAKTNIH STANJA U ROBOTIZOVANOJ
MONTAŽI**

Recenzenti:

Prof. dr Miroslav Pilipović, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu
Prof. dr Janko Hodolić, Fakultet tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu
Dr Aleksandar Rodić, Institut Mihajlo Pupin Univerziteta u Beogradu

Izdavač:

Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu
Beograd, Kraljice Marije 16

Za izdavača:

Prof. dr Milorad Milovančević, dekan

Štampanje odobrila:

Komisija za izdavačku delatnost Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu
decembra 2011. godine

Glavni i odgovorni urednik:

Prof. dr Aleksandar Obradović

Štampa:

Planeta print
11000 Beograd, Ruzveltova 10

ISBN: 978-86-7083-750-8

Predgovor urednika serije

Naučno stručnim inženjerskim poslenicima stavljamo na uvid desetu monografiju edicije Inteligentni tehnološki sistemi: Prepoznavanje kontaktnih stanja u robotizovanoj montaži autora Živane Jakovljević i Petra B. Petrovića. Svih deset monografija nastalo je u periodu 1987-2011. godina kroz veliki intelektualno-posleni napor nove generacije poslenika u domenu manufakturne teorije i prakse.

Monografija 10: Prepoznavanje kontaktnih stanja u robotizovanoj montaži nastala je kao dugogodišnji rad Živane Jakovljević krunisan doktorskim radom kao i njenog mentora Petra B. Petrovića. Autori su u ovoj monografiji naveli 40 saopštenih ili publikovanih samostalnih ili zajedničkih radova u sklopu od 193 literaturna izvora. Ovo se navodi kao ilustracija količine naučno-istraživačkog rada ova dva autora u periodu od 1992. godine do nastanka ovog spisa. Monografija Prepoznavanje kontaktnih stanja u robotizovanoj montaži je drugi doprinos tematici montaže. Sedma monografija: Inteligentni sistemi za montažu autora Petra B. Petrovića publikovana je 1999. godine.

Rad Prepoznavanje kontaktnih stanja u robotizovanoj montaži zapravo nudi nov pristup u proučavanju procesa prepoznavanja kontaktnih stanja i oblika u montaži kroz posmatranje ukupne dinamičke nelinearnosti na nivou nano fenomenologije istog. Za to je bilo potrebno da se izvrši značajka simbioza različitih matematičkih pristupa u jedinstvenu algoritimizaciju robotizovanih postupaka. Drugim rečima, čovek je kroz takvu kompleksnu matematsko-simboličko-eksperimentalnu identifikaciju procesa na nivou nano-fenomenologije ugradio deo svog "intelektualnog" kapaciteta u robotsku tvorevinu.

Za ilustraciju ove tvrdnje može se navesti mesto gde se daje arhitektura mašine za on-line prepoznavanje kontaktnih stanja u procesu spajanja (rad ovih autora pod brojem 59) gde se spajaju on-line prostori i off-line prostori u integralnu celinu, a sve sa ciljem da se upravlja realnim robotskim procesom uključujući i povratnu vezu i upravljački deo.

Druga ilustracija gornje tvrdnje je primer prepoznavanja neregularnosti u procesu cilindričnog spajanja sa uvodnikom kada se nudi konačni automat u formi akceptora. Ovaj konačni automat sastoji se od čvora neosmotrivih neregularnih pojava i drugog čvora koji odgovara pojavi stick-slip efekta. Između ova dva čvora imamo funkcionalne čvorove automata koji obezbeđuju regularni tok procesa.

Prostor montaže sa svojom kognitivno-mehaničkom strukturom danas predstavlja jedan od čvorišta naučno-inženjerskog napora u projektovanju nove filozofije "pravljenja" artifektova. Ova monografija je postavila dubinske sonde za proučavanje i projektovanje nano-fenomenoloških mapa za ovaj proces čime se čovek oslobađa svoje manuelne prisutnosti, a povećava svoje kognitivno-inteli-

gentno prisustvo.

Seriya Inteligentnih sistema (ITS) predstavlja napor da se promovišu vredni rezultati istraživanja, sistematizovani u vidu, monografija i doktorskih radova, koji su realizovani u okviru Instituta za proizvodno mašinstvo i računarski integrisane tehnologije Mašinskog fakulteta u Beogradu, a takođe i u sklopu JUPITER zajednice, koja predstavlja asocijaciju industrije, naučnih i istraživačkih institucija Jugoslavije.

Prva knjiga ove serije monografija predstavlja novi pristup u teoriji prepoznavanja inženjerskih sistema, kroz primenu algebarske topologije u sprezi za teorijom sistema.

Druga knjiga obuhvata aspekte teorije inženjerskog projektovanja u proizvodnom domenu. Dat je koncept PROJEKTANT - Ekspert sistema zasnovanog na veštačkoj inteligenciji i inženjerstvu znanja.

Računarski integrisani sistemi - CIM sistemi su tema treće knjige serije ITS. Integracija proizvodnog okruženja komunikacionom opremom dovodi nas bliže okruženju inteligentnih sistema. Poseban kvalitet ovog rada je što su diskutovani različiti CIM modeli zasnovani na zahtevima realnih fabrika.

Ekspert sistem za projektovanje tehnoloških procesa tema je četvrte knjige ove serije. Ponuđena je masivna baza znanja za izgradnju ekspert sistema za projektovanje tehnologije. Izrađen je pilot ekspert sistem za verifikaciju datog koncepta.

Izdavanje "FLEXY - Inteligentni ekspert sistem za projektovanje FTS" nudi nove pristupe u oblasti projektovanja inteligentnih tehnoloških sistema, zasnovane na teoriji automata i lingvističkoj strukturi. Koncept ćelijskih automata primenjen je u vidu inteligentnih mašina sa kombinovanom sposobnošću računanja i konstruisanja tokom procesa projektovanja. To je prvi pokušaj primene strukture automata znanja za modeliranje aktivnosti inženjerskog projektovanja. Razvijena teorija je primenjena za projektovanje i testiranje FLEXY - Inteligentnog ekspert sistema za projektovanje tehnoloških sistema.

Šesta knjiga iz serije Inteligentni tehnološki sistemi je monografija "Koncept totalnog kvaliteta - novi prilazi za tehnološke sisteme". Kvalitet, kao jedan od globalnih koncepata u inženjerstvu i šire, ovde je prezentiran na originalan način, pošto se polazi od nekih tehnika za inženjerstvo kvaliteta i sistema za kvalitet na bazi ulaza. Posebna pažnja je posvećena problemima inteligentnih sistema za kvalitet, sa posebnim priložima autora iz programa sopstvenih istraživanja u Laboratoriji za proizvodnu metrologiju i kvalitet Mašinskog fakulteta u Beogradu.

Kontinualan istraživački napor i u periodu velikih razaranja u prostoru u kome su se ta istraživanja izvodila, omogućio je da se našim mladim istraživačima i studentima ponudi monografski rad INTELIGENTNI SISTEMI ZA MONTAŽU dr. Petra B. Petrovića kao sedma knjiga iz serije Inteligentni tehnološki sistemi. Monografija po prvi put nudi moderan teorijsko - projektantski model za

prostor tehnologije montaže, sa posebnim istraživanjem adaptivnog upravljanja dinamičkim procesom robotizovanog spajanja, korišćenjem teorije fazi skupova i aproksimativnog zaključivanja. Ovaj naučni rad bazira na doktorskoj disertaciji autora.

U osmoj knjizi "Sistemi veštačkih neuronskih mreža u proizvodnim tehnologijama" dati su rezultati mašinskog učenja edukacionog industrijskog robota MIT-SUBISHI Movemaster-EX i antropomorfnog robota nazvanog Don Kihot koji su potvrdili osnovanost hipoteze da mehanizmi mašinskog učenja, zasnovani na veštačkim neuronskim mrežama i konceptu veštačkog života, mogu da obezbede mehatronskom sistemu - robotu odgovarajuću autonomnost pri izvršavanju tehnološkog zadatka manipulacije prepoznatih objekata uopšte i u okviru montaže. U njoj je pokazano i kako se koriste heterogene veštačke neuronske mreže pri realizaciji lokomocionog neuronskog upravljačkog sistema insekt robota. Veštačke neuronske mreže mogu da se koriste i za grubo projektovanje tehnoloških procesa, tako da je predstavljena primena "ART-1" mreže u projektovanju grupne tehnologije za osnosimetrične cilindrične delove.

U monografiji "Evidencioni sistemi u razvoju proizvoda i procesa" je predstavljen pristup reinženjeringu procesa razvoja. Tagučići pristup robusnog projektovanja, teorija funkcija uverenja (Dempster-Šaferova teorija) i aksiomska teorija projektovanja (Nam Suh-ova ADT) su tri glavna stuba na kojima je izgrađen novi pristup i metodologija konceptualnog projektovanja proizvoda i procesa. Centralno poglavlje je primena evidencionih sistema u konceptualnom projektovanju. Kroz više primera, a na vrlo visokom naučnom nivou izvršena je integracija pojedinih teorija i tehnika za rešavanje problema konceptualnog projektovanja kao složenog mentalnog procesa. Teorija funkcija uverenja se primenjuje u povezivanju raznih izvora znanja kao i njihovo kvantifikovanje preko entropije uverenja. Matrica projektovanja se predstavlja evidencionom mrežom a njeni elementi funkcijama uverenja koji baziraju na eksperimentalnim podacima dobijenim iz Tagučići metoda. Saglasno prvom aksiomu projektovanja analizirana su tri karakteristična slučaja: nespregnuto, kvazi-spregnuto i spregnuto rešenje. Ovaj pristup je primenjen i na drugi aksiom projektovanja gde se informacioni sadržaj iskazuje preko funkcija uverenja. Tako se preko koeficijenta smanjenja neodređenosti koji povezuje entropije raznih izvora znanja određuje valjanost projektnog rešenja.

Ako ovaj gotovo četvrt veka dug napor stavimo u okvir današnjice nije teško prepoznati da je to bio put koji vodi razvijenu misao i znanje u oblasti mašinskog inženjerstva i posebno proizvodnog mašinstva na Mašinskom fakultetu i Katedri za proizvodno mašinstvo Univerziteta u Beogradu u nove tokove razvoja inovacione industrije Evropske unije za narednih dvadeset godina - do 2030.

Zato je neophodno da se započne sa novim ciklusom monografija ITS (IMS) kroz razvoj teorije i prakse u formiranju kompleksne mreže tehnoloških platformi

za novu industriju Srbije.

Za prostor manu-futurne filozofije iz domena "pravljenja (making)" od izuzetne važnosti je rad na sledećim dimenzijama "fabrike budućnosti":

- smart,
- digital,
- virtual.

To je budući program istraživanja i inovacija koji se nudi novim magistrantima i doktorantima iz sveta inženjerskih i drugih naučnih oblasti.

Beograd, decembar 2011.

Urednik serije:
Prof. dr Vladimir R. Milačić

Editor's Preface

The tenth monograph in the edition Intelligent Manufacturing Systems: "Recognition of Contact States in Robotized Assembly" by authors Zivana Jakovljevic and Petar B. Petrovic is available to the scientific and engineering community. All ten monographs are written in the period between 1987 - 2011 through great intellectual and working effort of the new generation of workers in the area of manufacture theory and practice.

Monograph 10: Recognition of Contact States in Robotized Assembly came as a result of the years of work of Zivana Jakovljevic which is crowned by PhD thesis, as well as her mentor Petar B. Petrovic. In this monograph the authors have listed over 40 presented or published independent or mutual papers in the total of 193 cited references. This is given as an illustration of the amount of scientific and research work of the authors in the period from 1992. to the moment of the creation of this manuscript. The monograph Contact States Recognition in Robotized Assembly is the second contribution in the area of assembly. The seventh monograph Intelligent Assembly Systems by author Petar B. Petrovic is published in 1999.

The work "Contact States Recognition in Robotized Assembly" offers a new approach to studying of the recognition of contact states and patterns in assembly trough observation of the total dynamic nonlinearity at the level of its nano phenomenology. For these purposes it was necessary to carry out knowingly symbiosis of different mathematical approaches into unique algorithmization of robotized procedures. In other words, the man has, trough such a complex mathematical-symbolical-experimental identification of the process at the level of nano phenomenology, embedded a part of his intellectual capacity into the robotic creation.

For illustration of given statement, we can note the place where the authors gave the architecture of the machine for online contact states recognition in part mating process (the figure 59 in manuscript) where the online and offline spaces are interconnected, aiming the control of the real robotic process including the feedback and control.

The other illustration of the above given statement is the example of the recognition of irregularities in the cylindrical part mating with chamfer crossing,

where the authors propose a finite state acceptor. This finite state automaton is made of two nodes, one for unobservable irregularities and the other which corresponds to appearance of stick-slip effect. Between these two nodes, we have functional nodes of automaton which provide the regular process stream.

The area of assembly with its cognitively-mechanical structure today represents one of the nodes of scientific-engineering effort in the design of the new philosophy of artifacts "making". This monograph has set the deep sondes for the studying and design of nano phenomenological maps for this process which freed the man of his manual presence, and increased his cognitively-intelligent presence.

The series Intelligent Manufacturing Systems (IMS) represents an effort to promote valuable research results systematized in a form of monographs and doctoral papers, produced in the Institute for Production Engineering and Computer Integrated Manufacturing of the Mechanical Engineering Faculty, University of Belgrade, and JUPITER Association, which brings together industrial companies and scientific institutions of Yugoslavia.

The first book in this series of monographs presents a new approach to recognition theory for engineering systems with the application of algebraic topology coupled with systems theory.

The second book considers the aspects of the engineering design theory in production domain. It presents the DESIGNER-Expert system concept based on artificial intelligence and knowledge engineering.

Computer integrated manufacturing -CIM systems are the topic of the third book in IMS series. The integration of production environment by communication equipment brings us closer to the intelligent system's environment. A special feature of this book is that different real-factory-based.

The expert system for process planning is the topic of the fourth book in this series. A massive knowledge base for the building of expert systems for process planning is offered. A pilot expert system for verification of this concept was also built.

The edition "FLEXY-Intelligent Expert System for FMS Design" offers new approaches to the design of intelligent manufacturing systems, based on automata theory and linguistic structure. Cellular automata concept was applied in the form of intelligent machines with combined computing and construction capability during the design process. This is the first attempt to apply knowledge automata structure for design and testing of FLEXY-intelligent expert systems for flexible manufacturing systems design.

The sixth book is "Total Quality Concept-New Approach to Manufacturing Systems". The quality, as one of the global concepts in engineering and much wider aspects is presented here in an original way, based on some input-base quality engineering techniques and systems. Special attention is devoted to the

problems of intelligent quality systems with author's specific approaches form its own research programs carried out in the Laboratory for Production Metrology and Quality.

The research efforts, which were continued despite the terrible destruction happened in the space where this research was carried out, offered the monograph book entitled "Intelligent Assembly Systems", written by Dr. Petar B. Petrovic. In this seventh book of the series Intelligent Manufacturing Systems, for the first time the advanced theoretical-engineering model for the domain of industrial assembly technology was shown. In particular, the research was focused on active adaptive control of the part mating process in robotic assembly, where this highly nonlinear dynamical process is modeled using fuzzy logic and approximate reasoning. This scientific work was based on the author's doctoral dissertation.

In the eighth book entitled "Systems of Artificial Neural Networks in Production Technologies" the results of machine learning of the educational industrial robot MITSUBISHI Movemaster-EX and anthropomorphic robot called Don Kihot are given. The scientific hypothesis is confirmed by the fact that mechanisms of machine learning, based on the artificial neural networks and the concept of artificial life, can provide autonomy to the mechatronic system-robot in fulfilling the handling task of recognized objects. The procedure of using heterogeneous artificial neural networks in realization of locomotion neural control system for the insect robot is shown in this book also. Artificial neural networks can also be used for the first phase of manufacturing process planning, so this monograph shows the application of "ART-1" network in group technology design for rotational workpieces.

The monograph "Evidence Systems in Products and Processes Development" presents an approach to the reengineering of the development process. The Taguchi approach to robust design, the belief function theory (Dempster-Shafer theory) and the axiomatic design theory (Nam Suh ADT) are the three major pillars on which this new approach is based as well as the methodology of conceptual design of products and processes. The central chapter is the application of evidence systems in the conceptual design. Through several examples and following high scientific standards the integration of individual theories and techniques of problem solving of conceptual design as a complex mental process was implemented. The belief function theory is applied in the fusion of various knowledge sources and in their quantification via the belief entropy. The design matrix is represented by an evidence network and its elements are represented by belief functions which are based on experimental data obtained through the Taguchi method. In accordance to the first design axiom, three characteristic cases are analyzed: non-coupled case, quasi-coupled and the coupled solution. This approach has been implemented also on the second design axiom where the

information contents is expressed via belief functions. Thus, by the coefficient of uncertainty decrease which couples entropies of various knowledge sources the validity of the design solution is determined.

If this, a quarter of century long, effort is put into the nowadays framework, it is not difficult to recognize that it was the roadmap that led the developed thought and knowledge in the area of mechanical engineering and especially the production engineering at Faculty of Mechanical Engineering and Department for Production Engineering at University of Belgrade into the new streams of the development of innovation industry of European Union for the next twenty years - till 2030.

This is why it is necessary to start the new cycle of the IMS monographs trough the development of the theory and practice in the creation of complex network of technological platforms for a new industry of Serbia.

For the manu-future philosophy in the area of "making" it is extremely important to work on the following dimensions of the "factory of the future":

- smart,
- digital,
- virtual.

This is the future program for the research and development which is offered to new graduate and PhD students in the area of engineering and other scientific disciplines.

Belgrade, december 2011.

Editor of the series:
Professor Dr. Vladimir R. Milačić

Predgovor

Sve zahtevnije tržište i intenzivan rast u domenu informacionih tehnologija dovode do postepene transformacije proizvodnih tehnologija na konceptualnom nivou. Koncept masovne proizvodnje se postepeno transformiše u novi koncept masovno varijantnih proizvoda. U ovakvim uslovima poslovanja neophodno je da proizvodni sistem bude sposoban da se brzo prilagodi naglim promenama proizvodnih zadataka na svom ulazu (ekstremno male serije, kao i pojedinačna proizvodnja), uključujući i reagovanje u realnom vremenu na poremećaje raznih vrsta. On mora da poseduje svojstva rekonfiguracije na svim nivoima, kao i svojstva kompleksne informacione integracije svojih podstruktura. Takođe, mora da poseduje sposobnost visoke autonomnosti i sposobnost učenja kroz generalizaciju ponašanja, fuziju senzorskih informacija i ugrađene mehanizame za prenos znanja i veština sa čoveka na mašinski sistem. Drugim rečima, proizvodni sistem po svojim svojstvima fleksibilnosti, odnosno, sposobnosti prilagođavanja promenama (planiranim i neplaniranim) mora da se približi i izjednači sa svojstvima manualnih sistema, zasnovanih na direktnom uključivanju čoveka u proizvodni proces. Ovakve proizvodne tehnologije kao svoje osnovno obeležje imaju inteligenciju, i zato je koncept proizvodnje masovno varijantnih proizvoda u suštini koncept inteligentnih proizvodnih sistema, a njegovo praktično ostvarenje je u najvećoj meri uslovljeno merom kojom je inteligencija ugrađena u proizvodni sistem.

Podizanje nivoa autonomnosti kroz primenu koncepta veštačke inteligencije je jedan od ključnih istraživačkih zadataka u domenu tehnologije montaže. Tehnologija montaže, a posebno tehnologija robotizovane montaže i tehnologija robotizovane demontaže u novije vreme, koja se razvija u kontekstu masovno personalizovane proizvodnje i inteligentnih pristupa konceptu održivog razvoja, je suštinski zavisna od stepena autonomnosti manipulacionog robota i prateće opreme. Razvoj tehnologije montaže je zato najuže povezan sa napretkom u razvoju i implementaciji metoda veštačke inteligencije, i u tom kontekstu sistematske izgradnje novih teoretskih osnova za projektovanje robotskih sistema za montažu/demontažu.

U ovoj monografiji je prikazan jedan pristup uvođenju sadržaja veštačke inteligencije u sisteme za robotizovano spajanje delova. Predstavljena meto-

dologija je zasnovana na integraciji analitičkog modela procesa spajanja, metoda veštačke inteligencije izraženih kroz formalizam matematičkog prepoznavanja oblika i klasične teorije informacionih mašina sadržane u teoriji automata i formalnih gramatika veštačkih jezika. Korišćene su analitičke metode statistike višeg reda u okviru matematičkog prepoznavanja oblika pomoću mašina sa nosećim vektorima, metode zasnovane na konceptu fazi skupova i iz njih izvedene fazi logike i osnova aproksimativnog zaključivanja kao i metode numeričke obrade signala koje omogućavaju simultanu analizu u frekventnom i vremenskom domenu senzorskih signala izrazito dinamičke prirode. Predstavljeni pristupi su eksperimentalno proveravani i verifikovani u laboratorijskim uslovima.

Monografija predstavlja sublimaciju rezultata višegodišnjeg rada autora na Katedri za proizvodno mašinstvo Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Nadamo se da će ovaj tekst biti od koristi mladim istraživačima, kao i svima onima koji žele da saznaju nešto više o ovoj izuzetno interesantnoj oblasti.

Zahvaljujemo uredniku serije prof. dr Vladimiru R. Milačiću kao i recenzentima prof. dr Miroslavu Pilipoviću, prof. dr Janku Hodoliću i dr Aleksandru Rodiću na vrlo korisnim i podsticajnim recenzentskim primedbama. Takođe, zahvaljujemo se svima koji su doprineli da ova monografija dobije prezentovani sadržaj i izgled.

Beograd, decembar 2011.

Autori:

Doc. dr Živana Jakovljević

Prof. dr Petar B. Petrović

Sadržaj

1	Uvod	3
1.1	Inteligentni sistemi za montažu	5
1.2	Proces spajanja u robotizovanoj montaži	7
1.2.1	Izvori neodređenosti u procesu spajanja	8
1.2.2	Popustljivo kretanje robota	9
1.3	Osnovni pristupi u prepoznavanju processa spajanja	11
1.3.1	Metode zasnovane na analitičkom modelu	11
1.3.2	Metode zasnovane na učenju kontaktnih stanja	12
1.3.3	Zbirni prikaz i komentar istraživanja prikazanih u prethod- nim odeljcima	14
2	Prepoznavanje kontaktnih stanja	17
2.1	Kontaktno stanje	17
2.2	Arhitektura aktivnog sistema za popustljivo kretanje	20
2.3	Modeliranje processa spajanja	22
2.3.1	Modeliranje konteksta pojave kontaktnih stanja	23
2.3.2	Dinamički model processa spajanja	29
2.4	Upravljanje silom	44
3	Prepoznavanje oblika	47
3.1	Proces prevođenja fizičkog objekta u oblik - tačku u višedimenzionom prostoru obeležja	49
3.1.1	Tehnike za obradu nestacionarnih signala: Kratkotrajna Furijeova transformacija	52
3.1.2	Tehnike za obradu nestacionarnih signala: Hilbert Huangova transformacija	55
3.1.3	Tehnike za obradu nestacionarnih signala: Vejvlet transformacija	61
3.2	Klasifikacija	93

3.2.1	Algoritmi za klasifikaciju	94
3.2.2	Prepoznavanje oblika zasnovano na međusobnoj sličnosti	99
3.2.3	Statističke metode za prepoznavanje oblika	103
3.3	Mašine sa nosećim vektorima - koncept	107
3.3.1	Problem učenja	107
3.3.2	Strukturna minimizacija rizika	110
3.3.3	Razdvajajuće hiperravnine - linearno razdvojni slučaj	113
3.3.4	Generalizacija za linearno nerazdvojni slučaj	117
3.3.5	Mašine sa nosećim vektorima	119
3.3.6	Obučavanje mašina sa nosećim vektorima - sekvencijalna minimalna optimizacija	123
3.3.7	Klasterovanje pomoću nosećih vektora	128
3.3.8	Metode zasnovane na SVM za rad sa nepreciznim i nejas- nim podacima	134
3.3.9	Rekapitulacija mašina sa nosećim vektorima	139
3.4	Ekstrakcija fazi pravila iz SVM	140
3.5	Klasifikacija u više klasa pomoću mašina sa nosećim vektorima	146
4	Mašina za prepoznavanje kontaktnih stanja	149
4.1	Arhitektura mašine za prepoznavanje kontaktnih stanja	149
4.2	Primer: mašina za prepoznavanje kontaktnih stanja - sinteza na primeru cilindričnog spajanja sa uvodnikom	153
4.2.1	Ekstrakcija i odabir obeležja	154
4.2.2	Uklanjanje šuma iz signala	159
4.2.3	Prevođenje - generisanje oblika	161
4.2.4	Klasifikacija pomoću mašina sa nosećim vektorima	165
4.2.5	Ekstrakcija fazi pravila na osnovu rezultata SVM	170
4.2.6	Ekperimentalna verifikacija predložene mašine za prepoznavanje kontaktnih stanja	174
5	Mašina za prepoznavanje neregularnosti u procesu spajanja	179
5.1	Prepoznavanje neregularnosti u procesu spajanja	179
5.2	Primer: Prepoznavanje neregularnosti u procesu cilindričnog spa- janja sa uvodnikom	181
6	Zaključak	187