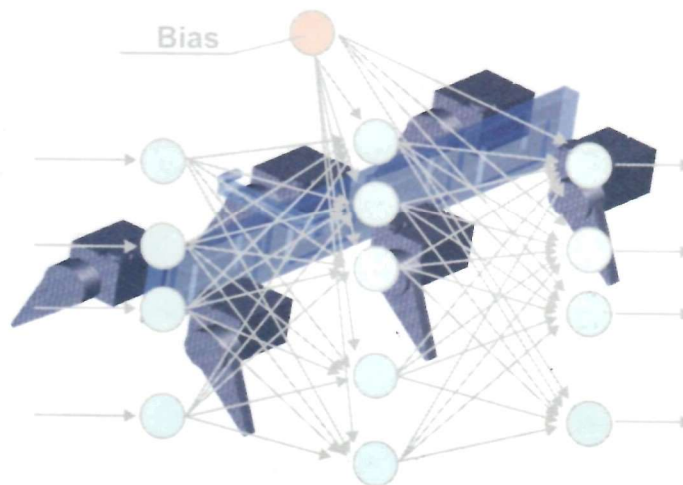


SISTEMI VEŠTAČKIH NEURONSKIH MREŽA U PROIZVODNIM TEHNOLOGIJAMA

Systems of Artificial
Neural Networks in
Production Technologies

Dr Zoran Đ. MILJKOVIĆ



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

**SISTEMI VEŠTAČKIH
NEURONSKIH MREŽA
U PROIZVODNIM
TEHNOLOGIJAMA**

**Systems of Artificial
Neural Networks in
Production Technologies**

Dr Zoran Đ. MILJKOVIĆ

**Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu
Mechanical Engineering Faculty - University of Belgrade
Belgrade, 2003.**

ZORAN Đ. MILJKOVIĆ

**SISTEMI VEŠTAČKIH
NEURONSKIH MREŽA
U PROIZVODNIM
TEHNOLOGIJAMA**

Dr Zoran Đ. Miljković, docent

**Sistemi veštačkih neuronskih mreža
u proizvodnim tehnologijama**

Recenzenti:

Prof. dr Milisav J. Kalajdžić

Prof. dr Bojan R. Babić

Izdavač:

MAŠINSKI FAKULTET
UNIVERZITETA U BEOGRADU
Beograd, 27. marta 80

Za izdavača:

Prof. dr Miloš Nedeljković, dekan

Štampanje odobrila:

Komisija za izdavačku delatnost
Mašinskog fakulteta u Beogradu,
25. novembra 2002. godine.

Urednik:

Prof. dr Branislav Savić

Tiraž: 500 primeraka

Štampa: CONTACT LINE
Beograd, Francuska 7

Štampanje finansijski pomogli:

- ◆ **Ministarstvo za nauku, tehnologije i razvoj Republike Srbije**
- ◆ **Savezni sekretarijat za razvoj i nauku**

ISBN 86-7083-455-3

Preštampavanje ili fotokopiranje nije dozvoljeno

Predgovor

Ova monografija je nastala u **Centru za Nove Tehnologije (CeNT)** Katedre za proizvodno mašinstvo Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu. U okviru CeNT-a, koji predstavlja jednu od strateških naučno-istraživačkih baza Univerziteta u Beogradu, postavljene su smernice razvoja naprednih tehnologija kod nas. Otuda potreba da se u ovoj monografiji publikuju neki od ostvarenih naučno-istraživačkih rezultata višegodišnjeg razvoja CeNT-a.

Moja dvanaestogodišnja istraživanja u CeNT-u su podrazumevala prodor u naučnu disciplinu koja se danas sve češće naziva pravim imenom, *veštački život*, a to je bio i jeste izazov i za mnogo razvijenije istraživačke centre u svetu. Sva sprovedena istraživanja odnosila su se na razvoj i primenu veštačke inteligencije u proizvodnim tehnologijama. U skladu sa tim postavljen je i naučni cilj, koji može da se svede na sledeće pitanje: "Da li mehatronski sistemi u proizvodnim tehnologijama, poput industrijskih robota, mogu da uče?" Odgovor na to pitanje je kompleksan i pre svega zavisi od toga da li je moguće da se realizuje hardversko-sofverska integracija u funkciji ostvarivanja mašinskog učenja. Zahvaljujući toj, za industrijski robot novoj sposobnosti rasudjivanja, on dobija i novi atribut, *autonoman*. Dakle, ako je industrijski robot u stanju da posle mašinskog učenja donosi samostalne odluke i da bude autonoman (za sada u ograničenom domenu), moguće je argumentovano govoriti o toj novoj naučnoj disciplini, o veštačkom životu.

U monografiji su dati rezultati mašinskog učenja edukacionog industrijskog robota *MITSUBISHI Movemaster-EX* i antropomornog robota nazvanog *Don Kihot* koji su potvrdili osnovanost postavljene naučne hipoteze. Hipoteza od koje se pošlo podrazumeva 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. Da bi se ova postavljena hipoteza dokazala korišćeni su pomenuti roboti i više posebno razvijenih softvera. U funkciji eksperimentalne verifikacije i hardversko-sofverske integracije razvijena je nova upravljačka strategija inteligentnog upravljanja robotima bazirana na *empirijskom upravljačkom algoritmu*, koji je predstavljen u monografiji.

Pored ovih osnovnih rezultata, u monografiji su dati i rezultati simulacije rada robota sa šest nogu nazvanog *insekt robot*. Pokazano je kako se koriste *heterogene veštačke neuronske mreže* pri realizaciji lokomocionog neuronskog upravljačkog sistema insekt robota.

Veštačke neuronske mreže, pre svega "ART-1" i "backpropagation", mogu da se koriste i za grubo projektovanje tehnoloških procesa, tako da je u monografiji, kao jedan od ostvarenih rezultata, pokazana primena "ART-1" mreže u projektovanju grupne tehnologije za osnosimetrične cilindrične delove.



Beograd, juna 2002. godine

Katarini i Aleksandri

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1 INTELIGENTNI SISTEMI U PROIZVODNIM TEHNOLOGIJAMA	8
1.2 AUTONOMNI INDUSTRIJSKI ROBOTI	8
1.2.1 AUTONOMNOST ROBOTA	8
1.2.2 KLASIFIKACIJA I PRIMENA ROBOTA	11
1.3 NOVI PRISTUP PROJEKTOVANJU TEHNOLOŠKIH PROCESA	13
1.3.1 ARHITEKTURA SISTEMA	13
2. MAŠINSKO UČENJE I VEŠTAČKE NEURONSKE MREŽE	17
2.1 ARHITEKTURA INTELIGENTNIH SISTEMA	17
2.2 VEŠTAČKE NEURONSKE MREŽE-OSNOVNI KONCEPTI	21
2.2.1 NEURON-PROCESIRAJUĆI ELEMENT VEŠTAČKE NEURONSKE MREŽE	24
2.2.2 ALGORITMI UČENJA VEŠTAČKIH NEURONSKIH MREŽA	29
2.3 MODELI VEŠTAČKIH NEURONSKIH MREŽA	31
2.3.1 PERCEPTRON	31
2.3.2 "BACKPROPAGATION" (BP) NEURONSKA MREŽA	35
2.3.3 "ART-1" NEURONSKA MREŽA	44
3. SISTEMI PREPOZNAVANJA KOD ROBOTA	57
3.1 FORMIRANJE SLIKE I STRUKTURA SISTEMA PREPOZNAVANJA	58
3.1.1 KARAKTERISTIKE PROCESA FORMIRANJA DIGITALNE SLIKE	63
3.2 PROCESIRANJE I ANALIZA SLIKE	64
3.2.1 SEGMENTACIJA PREKO KONTURA	66
3.2.2 SEGMENTACIJA PREKO REGIONA	68
3.2.3 PREPOZNAVANJE OBJEKTA	75
3.3 SISTEMI PREPOZNAVANJA I UPRAVLJANJE ROBOTIMA	78
4. INTELIGENTNO UPRAVLJANJE AUTONOMNIM ROBOTIMA	81
4.1 MEHATRONSKI SISTEMI I INTELIGENTNO UPRAVLJANJE	81
4.2 INTELIGENTNI UPRAVLJAČKI SISTEM AUTONOMNOG ROBOTA	83
4.2.1 ALGORITAM EMPIRIJSKOG UPRAVLJANJA	87
4.3 AUTONOMNI MOBILNI ROBOT-INSEKT ROBOT	90

4.3.1	DEKOMPOZICIJA INTELIGENTNOG UPRAVLJAČKOG SISTEMA AUTONOMNOG MOBILNOG ROBOTA	95
4.3.2	NEURONSKI UPRAVLJAČKI SISTEM INSEKT ROBOTA	97
5.	EKSPERIMENTALNI SISTEMI INTELIGENTNOG UPRAVLJANJA AUTONOMNIM ROBOTIMA	103
5.1	UPRAVLJAČKA STRATEGIJA AUTONOMNOG ROBOTA BAZIRANA NA KAMERI I SISTEMU VEŠTAČKIH NEURONSKIH MREŽA	103
5.2	EKSPERIMENTALNI SISTEM AUTONOMNOG ROBOTA	107
5.2.1	PROCESIRANJE I ANALIZA 2D SLIKE OBJEKATA.....	109
5.2.2	IDENTIFIKACIJA OBJEKATA SNIMLJENIH KAMEROM	118
5.3	PRIMERI EKSPERIMENTALNO RAZVIJENIH INTELIGENTNIH UPRAVLJAČKIH SISTEMA ZA AUTONOMNE ROBOTE	121
5.3.1	INTELIGENTNO UPRAVLJANJE ROBOTIMA "MITSUBISHI MOVEMASTER-EX" I "DON KIHOT" - REZULTATI UČENJA...	125
5.3.2	SIMULACIONI REZULTATI INTELIGENTNOG UPRAVLJANJA INSEKT ROBOTOM	138
6.	GRUPNA TEHNOLOGIJA I VEŠTAČKE NEURONSKE MREŽE	147
6.1	UVOD U GRUPNU TEHNOLOGIJU.....	147
6.2	ODREĐIVANJE GEOMETRIJSKE I TEHNOLOŠKE SLIČNOSTI DELOVA PRIMENOM "ART-1" NEURONSKE MREŽE	149
6.3	FORMIRANJE GRUPA DELOVA NA OSNOVU SLIČNOSTI	152
7.	ZAKLJUČAK	157
8.	LITERATURA	161
9.	PRILOZI	177

NOMENKLATURA

$\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \dots, \mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}, \dots$	- Matrice, odnosno vektori.
[]	- Oznaka za matricu.
$A, B, C, \dots, a, b, c, \dots$	- Skalari.
{ }	- Oznaka za skup.
\mathbf{A}^{-1}	- Inverzna matrica matrice \mathbf{A} .
\mathbf{A}^T	- Transponovana matrica matrice \mathbf{A} .
\mathfrak{R}^d	- Prostor čiji su elementi d -dimenzionalni realni vektori.
$A \subseteq B$	- A je podskup od B .
$ x $	- Apsolutna vrednost od x .
$F(x, y)$	- Funkcija F od promenljivih x i y .
(x, y)	- Koordinate x i y u ravni.
(x, y, z)	- Kartezijanske koordinate.
(wx, wy, wz, w)	- Homogene koordinate.
ΔS	- Konačna promena pozicije tačke S
t	- Vreme.
\dot{x}	- Prvi izvod po vremenu za promenljivu x .
$\partial x / \partial y$	- Parcijalni izvod funkcije x po y .
∇	- Operator gradijenta.
∇^2	- Laplasov operator.
$I(x, y)$	- Intenzitet osvetljenosti piksela na poziciji (x, y) .
$h(m)$	- Histogram u zavisnosti od nivoa osvetljenosti slike.
#	- Operator koji računa broj piksela u regionu slike.
$f_{i,j}$	- Piksela na poziciji (i, j) .
P_{ij}	- Nivo osvetljenosti piksela na poziciji (i, j) .
T	- Granični nivo osvetljenosti slike.
A	- Površina slike objekta.
$K_x^k ; K_y^k$	- Koordinate težišta slike objekta.
I_x, I_y, I_{xy}	- Momenti inercije površine za težišne ose slike objekta.
θ	- Pramac glavne ose.
P	- Površina objekta.
(x_k, y_k)	- Koordinate težišta objekta u ravni slike.
$\hat{I}_{(1)}, \hat{I}_{(2)}$	- Glavni poluprečnici inercije objekta.
\mathfrak{R}	- Orijentacija objekta.

I	- Slika.
I^c	- Okolina objekata.
S	- Šablon za poređenje objekata dat nizom piksela.
W	- Scena data nizom piksela.
${}_{ref}{}_{e,e}T$	- Homogena transformacija; ova matrica određuje poziciju i orijentaciju koordinatnog sistema end -efektora robota u odnosu na referentni koordinatni sistem.
θ_i	- Ugao rotacije za i -ti zglob robota.
$\Delta \theta_i$	- Konačna promena ugla rotacije za i -ti zglob robota.
$f(w,x)$	- Ulazni operator neurona.
$h(s)$	- Funkcija prenosa neurona.
$f_i(net_i)$	- Aktivaciona funkcija neurona.
$a_i(t)$	- Aktivacija neurona.
w_{ij}	- Težinski odnos između i -tog i j -tog neurona.
Δw_{ij}	- Konačna promena težinskog odnosa između i -tog i j -tog neurona.
θ_i	- Prag aktivacije i -tog neurona.
i_i	- Ulaz neurona.
o_i	- Izlaz neurona.
S_i	- Sumirana ulazna vrednost neurona
θ, τ, λ	- Parametri sigmoidne aktivacione funkcije.
σ	- Parametar poravnavanja Gausove aktivacione funkcije.
A_i	- Algoritam učenja veštačke neuronske mreže.
$\Phi(t)$	- Jačina sinaptičkih veza.
ε_k	- Razlika između zahtevanog izlaza veštačke neuronske mreže i aktuelne vrednosti izlaza.
E_p	- Greška na izlazu BP neuronske mreže.
∇E_p	- Gradijent greške E_p .
η	- Parametar učenja veštačke neuronske mreže.
α, β, μ	- Konstante.
G	- Regulator pojačanja ART-1 neuronske mreže.
A	- Podsystem za utvrđivanje sličnosti ART-1 neuronske mreže.

z_{ij}	- Težinski odnosi između j -tog i i -tog neurona ART-1 neuronske mreže.
A_1, B_1, C_1, D_1, L	- Konstantni parametri ART-1 neuronske mreže.
M	- Stepen podudarnosti kod ART-1 neuronske mreže.
ρ	- Parametar sličnosti za ART-1 neuronsku mrežu.

LISTA AKRONIMA

MIT	- Massachusetts Institute of Technology.
RIA	- Robot Institute of America.
DARPA	- Defense Advanced Research Projects Agency.
CeNT	- Centar za Nove Tehnologije.
AMR	- Autonomni Mobilni Robot.
IAM	- Inteligentni Autonomni Mikrorobot.
TCP	- Tool Center Point.
CCD	- Charge Coupled Device.
CMAC	- Cerebellar Model Arithmetic Computer.
NSC	- Neural Servo Controller.
PID	- Proportional Integral and Derivative.
BP	- Back-Propagation.
ART	- Adaptive Resonance Theory.
FUZAMP	- Fuzzy ART MAP.
ADALINE	- ADaptive LINear Element.
BAM	- Bidirectional Associative Memory.
BPNET	- Back-Propagation NETWORK.
LTM	- Long-Term Memory.
STM	- Short-Term Memory.



1. UVOD

Razvoj novih generacija proizvoda podrazumeva da proizvodni sistemi u 21. veku treba da imaju veću fleksibilnost pri projektovanju proizvodnih tehnologija, i to u fazi planiranja i projektovanja tehnoloških procesa, kao i prilikom upravljanja tehnološkim procesima [40]. Da bi se to ostvarilo, neophodno je da se prethodno izvrši integracija softverske i hardverske arhitekture mehatronskih sistema. Proizvodne tehnologije još uvek nisu ostvarile to stanje integracije. Intenzivan razvoj krajem osamdesetih i tokom devedesetih godina 20. veka, koji je uspostavio i novu oblast istraživanja u proizvodnom mašinstvu, poznatu pod nazivom *Inteligentni tehnološki sistemi* [102,136], ukazuje na pozitivan trend u pravcu ostvarivanja novih proizvodnih tehnologija u 21. veku. Početni rezultati u toku razvoja *Inteligentnih tehnoloških sistema*, bili su orijentisani ka proizvodnim sistemima koji su bazirani na ekspertskom znanju [102], ali se zbog vidnih ograničenja oni ubrzo obogaćuju novim računarskim paradigmama, koje su objedinjene u oblast nazvanu "*soft-computing*". Čine je "*fuzzy-logic*" sistemi, *veštačke neuronske mreže* i *genetički algoritmi*. Ova monografija prezentira primenu sistema veštačkih neuronskih mreža u proizvodnim tehnologijama koje svoju potpunu afirmaciju treba da ostvare u prvoj deceniji 21. veka. One ugrađuju u *inteligentne tehnološke sisteme* izuzetnu sposobnost učenja, univerzalne aproksimacije i adaptacije, što je iskorišćeno u sprovedenim istraživanjima za razvoj inteligentnog upravljanja autonomnim industrijskim robotom na bazi vizuelne povratne sprege, kao i za novi pristup projektovanju tehnoloških procesa.

Autonomni, odnosno inteligentni industrijski roboti, koji "razumeju" tehnološki zadatak i okolinu, su danas u svetu predmet intenzivnih istraživanja i sastavni su deo *inteligentnih tehnoloških sistema*. Ovo se pre svega odnosi na razvoj nove generacije upravljačkih i senzorskih sistema, posebno sistema prepoznavanja i algoritama učenja. Razvojem ovakvih sistema industrijskih

robota omogućava se njihova efikasnija primena na postojećim zadacima, ali i proširuju oblasti primene na kompleksne tehnološke zadatke koji do sada nisu, ili ne u potpunosti, bili pogodni za robotizaciju. Posebno treba naglasiti da predviđanja kompetentnih istraživačkih centara u Japanu (*Nagoya University*) [60], Evropi (*Swiss Federal Institute of Technology*) i S.A.D. (*MIT*) [30] ukazuju na to da će u prvoj deceniji nastupajućeg 21. veka biti uspostavljen koncept inteligentnih industrijskih robota, koji imaju ostvarenu sposobnost rasuđivanja, odnosno učenja. Istraživački rezultati vodećih laboratorija *MIT*-a, poput *Artificial Life Laboratory*, nedvosmisleno potvrđuju da je današnji stepen razvoja veštačke inteligencije u robotici na nivou inteligencije deteta od dve do tri godine, što je u potpunom skladu sa predviđanjima, pri čemu se u tom kontekstu posebno ističe *autonomnost* robota, kao ključna osobina koja se ostvaruje kroz nove upravljačke strategije.

Kod nas, a i u svetu, su stalno bile i biće prisutne dileme, pa i rasprave o tome *kako upravljati industrijskim robotima?* Ako se problem upravljanja ograniči na tehnološki zadatak manipulacije, koji podrazumeva adekvatno pozicioniranje i orijentaciju vrha robota prema objektima u njegovom radnom okruženju, onda je u literaturi [173,174] davno predložen inženjerski koncept koji se zasniva na postupku dekompozicije koji podrazumeva održavanje funkcionisanja sistema industrijskog robota u uslovima kako malih, tako i velikih (snažnih) poremećaja. Ova tvrdnja vodi ka takvoj upravljačkoj strategiji, koja bi mogla da odgovori na nagle izmene radnih režima usled poremećaja različitog karaktera (početni uslovi, parametarska varijacija i sl.). Naime, nameće se postupak koji bi se oslanjao na tzv. optimalne performanse sistema, jer bi skup optimalnih trajektorija za različite početne uslove morao da bude napušten u uslovima održavanja funkcionisanja sistema u širem opsegu poremećaja. Današnji stepen razvoja brzih i moćnih procesora omogućava generisanje upravljačke strategije i u ovakvim uslovima i slučajevima visoke dimenzionalnosti sistema autonomnog industrijskog robota.

Pretpostavlja se da danas blizu 1 000 000 industrijskih robota radi u proizvodnim pogonima širom sveta, od kojih preko 500 000 u Japanu [67]. Za mnoge oblasti primene, neodređenost pozicije i orijentacije objekata u radnom okruženju industrijskog robota predstavlja ozbiljan upravljački problem. Jedna od alternativa za ostvarivanje *autonomnog adaptivnog ponašanja* industrijskog robota, prilikom rešavanja te neodređenosti, je vezana za korišćenje vizuelne povratne sprege [38,99] i hijerarhijskog inteligentnog upravljanja. Važno je napomenuti da je u Japanu (*Nagoya University*) začeta ideja razvoja sistema hijerarhijskog inteligentnog upravljanja, kroz primenu veštačkih neuronskih mreža u funkciji *hibridnog neuromorfog i simboličkog upravljanja* autonomnim industrijskim robotom [57,58,59]. Hijerarhijski inteligentni upravljački sistem koji je uspostavljen, predstavlja hibridnu varijantu sprege neuronskih mreža i meta-znanja. Tada potpuno nova strategija se veoma razlikovala od tradicionalnog hijerarhijskog upravljanja, jer su neuronske mreže upotrebljene i za *učenje* za vremenski dug period, ali i za vremenski kratak period *adaptacije* dinamičkog procesa. Praktično su neuronske mreže iskorišćene u sprezi sa meta-znanjem za hijerarhijsku upravljačku strukturu sa sposobnošću prepoznavanja i planiranja pri realizaciji upravljačke strategije. Hijerarhijski nivo prepoznavanja koristi

neuronske mreže u funkciji donošenja odluka, na osnovu njihovog prethodnog obučavanja pomoću obučavajućih skupova uzoraka, u cilju transformacije različitih senzorskih podataka-informacija od numeričkog u simbolički oblik. Zatim se na drugom hijerarhijskom nivou planiranja realizuje neki od mogućih zadataka poput manipulacije objekata robotom, tako što se planira sam zadatak, trajektorija, sila ili neka druga performansa takvog mehatronskog sistema. Ovakav sistem hijerarhijskog inteligentnog upravljanja uključuje u upravljačku strategiju i *senzitivnost* i *veštinu* za realizaciju manipulacije objekata pomoću robota. Tako, aktivnosti na *nivou učenja* omogućavaju i rasuđivanje na osnovu činjenica utvrđenih na bazi senzorskih informacija, kako bi se kasnije mogla ostvariti upravljačka strategija i aproksimativno upravljanje za servo kontroler na *nivou adaptacije*. Osim toga, treba istaći i to da, senzorske i perceptive mogućnosti autonomnog industrijskog robota, zahtevaju često i učešće optimizacionih kriterijuma, pri čemu veštačke neuronske mreže nastoje da ostvare bolje performanse sistema, i optimalno rešenje problema upravljanja.

Inteligentno upravljanje autonomnim industrijskim robotom, koji koristi kameru kao eksterni senzor, danas podrazumeva primenu veštačke inteligencije. Shodno objašnjenjima koja su prethodno data, koncept inteligentnog upravljanja ima nekoliko srodnih pravaca razvoja, koji se međusobno razlikuju, ali u poslednje vreme i intenzivno dopunjuju [65]. Tako su danas prepoznatljivi pravci bazirani na "fuzzy" logici, veštačkim neuronskim mrežama, genetičkim algoritimima i, retko, ekspertnim sistemima, kao i sve češće, hibridnim sistemima koji objedinjuju dobre strane pomenutih pravaca razvoja veštačke inteligencije. Korišćenjem kamere-eksternog senzora, autonoman industrijski robot može da ostvari *adaptivno ponašanje*: on je sposoban da se fleksibilno prilagodi promenama u sopstvenom okruženju i da izvrši inteligentne tehnološke zadatke poput prepoznavanja i identifikacije objekata [38,41], njihove manipulacije [68], kao i tehnološku operaciju montaže [40] ili elektrolučno zavarivanje [91,101,138].

U poslednje vreme mnogi istraživači su, u svojim radovima i knjigama, predstavili i diskutovali mogućnosti primene kamere i veštačkih neuronskih mreža za inteligentno upravljanje robotom. Osnovna tema koja je razmatrana od ovih istraživača se odnosi na korišćenje veštačkih neuronskih mreža za učenje autonomnog industrijskog robota prilikom dobijanja dodatnih senzorskih informacija od kamere [22]. Inače, u kontekstu ove monografije, izdvajaju se rezultati nekoliko istraživačkih laboratorija. U Japanu predlažu sistem veštačkih neuronskih mreža koji uči odnos između promena unutrašnjih koordinata robota i promena koordinata karakterističnih tačaka objekta snimljenog kamerom [68]. U toku procesa učenja učestvuju dve neuronske mreže, "globalna" koja je namenjena učenju šireg radnog prostora end-efektora robota i "lokalna" koja uči uži radni prostor u blizini objekta koji je snimljen kamerom. Osnovni smisao uvođenja dve "backpropagation" (BP) neuronske mreže odnosi se na smanjenje broja obučavajućih parova. Drugi istraživači nude hibridni sistem baziran na novoj *fuzzy* neuronskoj mreži, nazvanoj FUZAMP, koja se koristi u situacijama kada se uključuje neodređenost raspoloživih obučavajućih podataka dobijenih korišćenjem sistema kompjuterskog gledanja [33]. Ono što se u ovim radovima uočava podrazumeva to da su industrijski roboti koji imaju razvijen sistem inteligentnog upravljanja, a koriste kameru za prepoznavanje objekata, pre svega

superiorniji u odnosu na konvencionalno upravljane robote, jer pozicije i orijentacije objekata mogu da budu proizvoljne u odgovarajućoj ravni radnog prostora robota [37]. Treba ipak biti obazriv kada se donosi zaključak o uspešnosti primene inteligentnog upravljanja kod autonomnih industrijskih robota, jer se pojavljuju mnogi problemi pri realizaciji, poput problema konvergencije ka globalnom minimumu prilikom učenja BP neuronske mreže, robusnosti sistema u pogledu tačnosti, specifikacije optimalne topologije neuronske mreže, itd.

Autonomni sistemi se odlikuju sposobnošću da uspešno rade u nestrukturisanom radnom okruženju, koje ima odgovarajući stepen neodređenosti. Naime, savremeni proizvodni sistemi podrazumevaju učešće autonomnih industrijskih robota i mašina alatki, koji izvršavaju tehnološke zadatke u interaktivnom i kooperativnom radu, kako bi se u inženjerski nedovoljno određenom okruženju uspešno realizovao tehnološki zadatak. Sprovedena istraživanja, predstavljena u ovoj monografiji, su imala za cilj razvoj i primenu upravljačkih algoritama za autonomne industrijske robote na bazi sistema prepoznavanja i učenja za tehnološki zadatak manipulacije prepoznatim i identifikovanim objektima u funkciji montaže.

U cilju sveobuhvatnog pristupa u rešavanju postavljenog problema kojim se bavi ova monografija, istraživanja su obuhvatila:

- Identifikaciju i klasifikaciju tehnoloških zadataka za autonomne sisteme industrijskih robota sa stanovišta sistema prepoznavanja;
- Analizu razvijenih modela mašinskog učenja, a posebno modela induktivnog učenja na bazi veštačkih neuronskih mreža;
- Konceptualizaciju empirijskog upravljačkog algoritma za autonomne industrijske robote primenom sistema prepoznavanja i mašinskog učenja;
- Razvoj eksperimentalnog sistema prepoznavanja za identifikaciju snimljenih objekata i izdvajanje značajnih karakteristika tih objekata, kao i eksperimentalnog sistema za senzorsko-motornu koordinaciju pri manipulaciji prepoznatih objekata na bazi mašinskog učenja pomoću sistema veštačkih neuronskih mreža;
- Testiranje razvijenog eksperimentalnog sistema, kroz laboratorijsku eksperimentalnu verifikaciju na edukacionom industrijskom robotu *MITSUBISHI Movemaster-EX* i realizovanom fizičkom modelu antropomorfnog robota *Don Kihot*, uz razvoj softverske podrške i simulaciju na računaru.

Dakle, monografija pruža uvid u procedure mogućeg načina rešavanja problema prilagođavanja autonomnog industrijskog robota tehnološkom radnom okruženju, uz primenu sistema prepoznavanja i učenja pri ostvarivanju

tehnološkog zadatka manipulacije pripremcima ili gotovim delovima, i to u korelaciji sa sledećim neodređenostima:

1. Greške vezane za model tehnološkog okruženja;
2. Greške u okviru upravljanja i senzorskog podsistema.

Aktivnosti čoveka u obavljanju svakodnevnih poslova podrazumevaju prilaženje, hvatanje i premeštanje objekata, uz učešće čula vida, motoričkih i mentalnih sposobnosti. Pri tome čovek ne rešava složene matematičko-mehaničke probleme (npr. inverzni kinematički problem). Praktično, oči čoveka "navode" ruku ka objektu, a zahvaljujući prethodno naučenoj motoričkoj veštini izvršava se korektno hvatanje i manipulacija objekta. Ideja, koja je realizovana i pokazana u ovoj monografiji, bazirana je na analogiji sa opisanom čovekovom aktivnošću. Ona podrazumeva da se, primenom inteligentnog upravljanja robotom, ostvaruje analogija sa "biološkim hardverom" čoveka, kod koga se sistemski generišu unutrašnje koordinate u funkciji rešavanja zadatka (manipulacija, pakovanje, spajanje, itd.). Na osnovu ove ideje je postavljen naučni cilj, da se u interakciji mehatronskih podsistema (mašinstva, elektronike, softvera), razvije upravljačka strategija hijerarhijskog inteligentnog upravljanja autonomnim industrijskim robotima na bazi sistema prepoznavanja i učenja, koja je namenjena novim proizvodnim tehnologijama. Da bi se to ostvarilo bilo je potrebno unaprediti upravljačke algoritme, a i iskoristiti i inovirati poznate principe sistema prepoznavanja kod robota nove generacije, primenom veštačke inteligencije i koncepta veštačkog života.

Osnovna hipoteza od koje se polazi podrazumeva da mehanizmi učenja, zasnovani na veštačkim neuronskim mrežama, treba da uspostave novi, bolji protok vizuelnih informacija od senzora, odnosno sistema prepoznavanja, ka upravljačkom podsistemu robota i aktuatorima, uz filtraciju signala i kompenzaciju grešaka pri izvršavanju izabranog tehnološkog zadatka (manipulacija objekata uopšte i u okviru montaže).

Uspostavljen je koncept razvoja i primene empirijskih upravljačkih algoritama za autonomne sisteme industrijskih robota na bazi veštačke inteligencije, odnosno sistema prepoznavanja i modela mašinskog učenja zasnovanih na principima veštačkih neuronskih mreža. Za ostvarivanje ovog koncepta korišćene su analitičke metode razvoja upravljačke strategije autonomnih industrijskih robota, sistem analiza i eksperimentalna verifikacija. Postavljeni koncept je praktično realizovan i testiran kroz primenu empirijskog upravljačkog algoritma, koji je baziran na učenju i eksperimentalnom sistemu prepoznavanja za autonomne industrijske robote, a verifikovan je na postojećim robotu *MITSUBISHI Movemaster-EX*, kao i posebno razvijenom fizičkom modelu robota *Don Kihot*, za izabrani tehnološki zadatak manipulacije.

Sva istraživanja su realizovana na Katedri za proizvodno mašinstvo, u okviru Laboratorije za industrijsku robotiku i veštačku inteligenciju, a dobijeni rezultati su u direktnoj vezi sa postavljenim smernicama višegodišnjeg razvoja Centra za Nove Tehnologije (*CeNT*), kao strateške naučno-istraživačke baze Univerziteta u Beogradu. Ti naučno-istraživački rezultati obuhvataju i realizaciju

većeg broja softverskih podsistema eksperimentalnog karaktera, a predstavljaju konkretne izlaze CeNT-a, koji jesu i mogu biti primenjeni i na razvoj drugih naučnih disciplina kojima se bavi Katedra za proizvodno mašinstvo. Tako je i nastala ideja da se jedan deo ovih razvijenih softverskih podsistema, metoda i algoritama primeni i na grubo projektovanje tehnoloških procesa za rotacione, osnosimetrične mašinske delove, shodno principima grupne tehnologije, što je takođe dato u ovoj monografiji. Softverski podsistemi koji se ovde posebno izdvajaju su: "ART-1 Simulator", baziran na ART-1 veštačkoj neuronskoj mreži, kao i "BPNET", koji se zasniva na "backpropagation" veštačkoj neuronskoj mreži. Pored ovih ključnih softverskih podsistema, realizovana su još tri značajna softverska podsistema: "Make it", za procesiranje i analizu 2D slike objekata primenom binarne segmentacije, kao i dva softvera za nadzor i upravljanje robotima MITSUBISHI Movemaster-EX i Don Kihot. Svi ovi softveri su realizovani za Windows® operativni sistem i instalirani su na IBM PC Pentium računarskoj platformi u CeNT-u.

Tekst ove monografije organizovan je u šest poglavlja. Pored uvodnih napomena datih u ovom poglavlju, polazišta se proširuju kroz objašnjavanje novog atributa-autonoman, koji se danas u robotici veoma koristi, a predstavlja bitno odredište za sva sprovedena istraživanja. U poglavlju je data klasifikacija industrijskih robota sa aspekta funkcija i primene sistema prepoznavanja. Takođe je predstavljen i novi pristup projektovanju tehnoloških procesa.

Poglavlje 2 pokazuje osnovne koncepte nastajanja veštačkih neuronskih mreža, algoritme učenja i kompletne matematičko-algoritamske podloge za BP neuronsku mrežu i ART-1 neuronsku mrežu. Kroz analizu koncepata, na konkretnim primerima, su date podloge za opis realizovanih softvera na bazi tih neuronskih mreža.

Poglavlje 3 definiše okvire sistema prepoznavanja, kroz proces formiranja slike, procesiranje i analizu slike sa posebnim osvrtom na proces segmentacije slike. Na kraju ovog poglavlja su date osnove primenjenog sistema prepoznavanja, odnosno poređenja objekata pri njihovoj identifikaciji, kao i primene sistema prepoznavanja u upravljanju robotom.

U poglavlju 4 je dat koncept hijerarhijskog inteligentnog upravljanja za autonomne industrijske robote, na osnovu koga je razvijena primenjena upravljačka strategija. Ona je bazirana na kameri i veštačkim neuronskim mrežama, a koristi uspostavljena pravila empirijskog upravljačkog algoritma. U poglavlju se daju i objašnjenja vezana za neuronski upravljački kontroler autonomnog mobilnog robota-insekt robota.

Poglavlje 5 prikazuje svih pet razvijenih softverskih podsistema za potrebe eksperimentalnog testiranja i verifikacije postavljene hipoteze i daje eksperimentalne rezultate koji su ostvareni primenom nove upravljačke strategije na oba robota korišćena u toku realizacije eksperimenata. Dati su i rezultati simulacije rada insekt robota.

Poglavlje 6 opisuje razvijenu proceduru primene ART-1 neuronske mreže u analizi sličnosti delova izabrane klase, uz prezentaciju algoritma učenja i

postupka identifikacije grupa delova na osnovu geometrijske i tehnološke sličnosti.

U zaključku su naglašene prednosti primene sistema veštačkih neuronskih mreža u novim proizvodnim tehnologijama, kao i razvijenog sistema hijerarhijskog inteligentnog upravljanja autonomnim industrijskim robotom, a date su i smernice daljeg istraživanja.

1.1 INTELIGENTNI SISTEMI U PROIZVODNIM TEHNOLOGIJAMA

Današnji inteligentni sistemi u proizvodnim tehnologijama podrazumevaju autonomno učenje i mogućnost adaptacije na neodređenosti u radnom okruženju, kako bi takav inteligentni tehnološki sistem mogao da odgovori na sve kompleksnije zadatke koji mu se u industrijskim uslovima nameću. Da bi se to ostvarilo neophodno je da inteligentni tehnološki sistem u sebi sadrži sledeća četiri elementa: *procesiranje senzorskih informacija*, *ocenjivanje stanja sistema*, *evolutivnost - empirijsko odlučivanje* i *generisanje autonomnog ponašanja*. Na osnovu ovih ključnih elemenata i njihove integracije, sva istraživanja predstavljena u ovoj monografiji ukazuju na to da se veštačke neuronske mreže, na implicitan ili eksplicitan način, uspešno koriste za modeliranje inteligentnih sistema u proizvodnim tehnologijama, poput autonomnih industrijskih robota.

1.2 AUTONOMNI INDUSTRIJSKI ROBOTI

1.2.1 Autonomnost robota

Američki Institut za robote (Robot Institute of America - RIA) je definisao robot kao *reprogramabilni multifunkcionalni manipulator projektovan da pomera materijal, delove, alate ili specijalne uređaje korišćenjem različitih programa kretanja pri izvršavanju različitih zadataka* [75]. U ovoj definiciji figurišu dve ključne reči *reprogramabilan* i *multifunkcionalan* (fleksibilan). To znači da je robot mašina koja može da se ponovo programira u funkciji novog zadatka, a i da je u stanju da fleksibilno prilagodi svoju namenu tim novim zadacima. Međutim, iako sličnu definiciju nudi i ISO standard [75], ima razmišljanja [72,156] koja ukazuju na to da postoje i drugi sistemi koji imaju ovakve karakteristike a nisu roboti, što govori o nedoslednosti ovih definicija. Zato je danas veoma teško dati potpuno jasnu definiciju robota, ali bi se uopšteno moglo reći da je robot aktivan veštački sistem, čije je okruženje fizički svet sa kojim je u stalnoj interakciji. Ovim definicijama, s obzirom na današnji stepen razvoja robota, nedostaju ključne reči kao što su *inteligentan* i *autonoman*, koje se razmatraju i objašnjavaju u ovoj monografiji.

Ako se uvede atribut *autonoman*¹⁾ do definicije robota je još teže doći. Može se reći da je autonoman onaj robot koji može da donosi samostalne odluke u ograničenom domenu, pri realizaciji zadatka, na osnovu upravljačke strategije bazirane na prethodnom učenju, korišćenjem povratnih veza koje ostvaruje pomoću signala od senzora. Postoje analogije [157] sa prirodnim sistemima koji uče na osnovu sopstvenog iskustva, tako da se danas smatra rezonskim, pristup koji veštačkom inteligentnom sistemu – robotu obezbeđuje inicijalno znanje i

¹⁾ Reč "*autonoman*" može da se tumači i kao "*nije pod doslednim upravljanjem od strane čoveka-operatera*".

spoznaju okruženja, sa mogućnošću učenja kroz evolutivnu nadgradnju servo-upravljanja. To znači da se za autonoman robot može reći da je "svestan sebe i okruženja". Da bi se razumela svrha uvođenja atributa *autonoman*, neophodno je naglasiti da robot možemo smatrati autonomnim samo ako donosi pravilne i pravovremene odluke o svojim akcijama u skladu sa realnim okruženjem. Realno okruženje poseduje svojstva koja bitno utiču na interakciju sa autonomnim robotom [156]. Ta svojstva su:

- *Realno okruženje je izvan ili na granici dostupnosti senzora*. Senzori nisu dovoljno savršeni, tako da mogu izvršiti merenje i/ili percepciju u okruženju samo ako su dovoljno blizu.
- *Realno okruženje je nedeterminističko*, posmatrano kroz aspekt rada robota. To znači da robot mora da bude u stanju da radi u neuređenoj sredini.
- *Realno okruženje nije epizodno*, jer se efekti u njemu menjaju u toku vremena. Robot mora zato da rešava probleme sekvencijalno i da uči.
- *Realno okruženje je dinamičko*. Zato, robot bi trebalo da zna kada je potrebno odložiti odluku o nekoj akciji, a kada je bolje reagovati odmah.
- *Realno okruženje je kontinualno*, u pogledu stanja i akcija koja proizlaze od kontinualnosti fizičkih sistema i procesa. To uslovljava specifičan skup mogućih akcija, što podrazumeva razvoj posebnih upravljačkih algoritama za učenje robota. Retke su situacije u kojima je realno okruženje *diskretno*. Postoje samo mogućnosti da se kod jednostavnijih problema realno okruženje diskretizuje, kao što je slučaj sa digitalizovanom slikom dobijenom od kamere, gde se mogu odrediti diskretne vrednosti osvetljenosti objekata u sceni.

Dakle, autonoman industrijski robot bi, u interakciji sa realnim okruženjem, morao da ima realizovane sledeće sposobnosti: *manipulativnost*, *komunikativnost*, *lokomociju*, *senzitivnost* i *rasuđivanje*. Ove sposobnosti su evoluirale u proteklom periodu razvoja robota [85], što se vidi u tabeli 1.1.

Kod autonomnih industrijskih robota, sa aspekta razvoja upravljačkih algoritama, veoma važne sposobnosti robota predstavljaju *senzitivnost* i *rasuđivanje*. U sprovedenim istraživanjima, te sposobnosti autonomnih robota su razvijane i testirane kroz primenu kamere – senzora i mašinskog učenja na bazi veštačkih neuronskih mreža. Da bi se razumeo razvoj upravljačkih algoritama za autonomne industrijske robote koji poseduju pomenute sposobnosti, neophodno je objasniti atribut autonoman u kontekstu njegovog upravljačkog sistema. Autonomnost robota je pre svega zasnovana na realizaciji njegovih upravljačkih funkcija, koje predstavljaju tako ukomponovan skup hardverskih i softverskih komponenata da se bez spoljašnje intervencije u dužem vremenskom periodu mogu izvršavati postavljeni zadaci, kao što je manipulacija prepoznatim objektima. Upravljački sistem autonomnog robota podrazumeva visok nivo

adaptacije prema promenama u njegovom realnom okruženju. Da bi se to ostvarilo koriste se metode kao što su:

- a) *algoritamsko-numeričke metode*, bazirane na identifikaciji i estimaciji, i
- b) *metode zasnovane na odlučivanju*, koje koriste tehnike veštačke inteligencije.

Tabela 1.1 Pregled funkcionalnih sposobnosti autonomnih industrijskih robota

SPOSOBNOST	Pre 1990.	1990-tih	Posle 2000.
Manipulativnost			
Sa aspekta industrijskih alata			
Sa aspekta antropomorfnosti			
Komunikativnost			
Jednosmerna (ka robotu)			
Dvosmerna			
Lokomocija			
Po šinama			
Pomoću točkova			
Po stazi			
Pomoću nogu			
Senzitivnost			
Kompjutersko gledanje			
Zvuk			
Taktilnost (dodir)			
Miris,boja			
Rasuđivanje			
Preko izolovanih činjenica			
Preko baze podataka			
Preko baze znanja			
Sopstvenim učenjem			

početak primene
 široka primena

Kompleksni upravljački problemi koji se javljaju kod autonomnih robota uslovljavaju da se, korišćenjem metoda zasnovanih na odlučivanju i primeni tehnika veštačke inteligencije, ostvari evolucija inteligentnih upravljačkih funkcija autonomnog robota. To znači da se, za razliku od konvencionalnih upravljačkih funkcija, kod inteligentnih upravljačkih funkcija evolutivnim postupkom, primenom veštačke inteligencije, obezbeđuje identifikacija i estimacija stanja sistema autonomnog robota, kako bi se korišćenjem empirijskog upravljačkog algoritma kompleksni upravljački problem uspešno rešio i zadatak robota realizovao sa najvećom mogućom verovatnoćom. Važno je da se naglasi i to da je za ostvarenje tih inteligentnih upravljačkih funkcija apsolutno neophodno da autonomni robot kontinuirano uči i da može da se adaptira novonastalom stanju. Veštačke neuronske mreže kao pogodna tehnika veštačke inteligencije se uspešno koriste u ove svrhe, jer je njihova izražena osobina upravo učenje. Formalizovani pristup realizaciji inteligentnih upravljačkih funkcija za autonomni robot je moguće ostvariti na više načina, pri čemu je jedan od najpogodnijih vezan za hijerarhijski, slojeviti vid upravljanja. Hijerarhijsko inteligentno upravljanje za autonomni robot podrazumeva moderan hardversko-softverski

povezani skup komponenata koje u međusobnoj interakciji, kroz više nivoa odlučivanja, realizuju autonomnost robota u pogledu njegovog uspešnog adaptiranja promenama u realnom okruženju i samostalnog odlučivanja o akcijama koje će pri izvršavanju postavljenog zadatka sprovoditi u dužem vremenskom periodu.

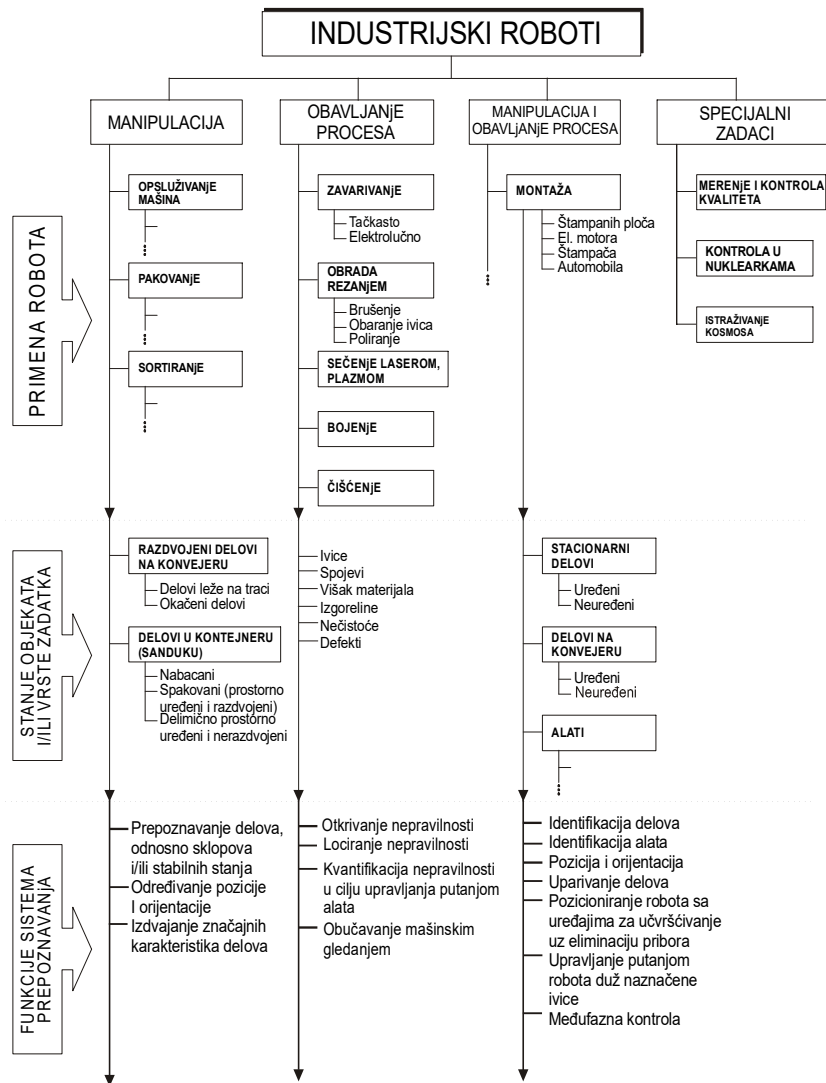
Na osnovu izloženog jasno je da autonoman robot mora da ima definisan cilj, koji ostvaruje kroz stalnu interakciju sa okruženjem preko povratnih veza, uz punu odgovornost za realizovane akcije.

1.2.2 Klasifikacija i primena industrijskih robota

Klasifikacija industrijskih robota sa aspekta funkcija i primene obuhvata četiri osnovne grupe tehnoloških zadataka: *manipulacioni, procesni, kombinovani* i *specijalni zadaci* [2,39,51,64,86,99,133,141,144,154,179]. Za autonomne robote je zadržana ova osnovna klasifikacija, s tim što se naglašava njihova osobina *lokomocije* [16,17,18,19,28,29,36,72,106,109,110,112,119], jer ima primena kod kojih je posedovanje mobilnih osa neophodno (nuklearna postrojenja, istraživanje svemira, servisni roboti, itd). Za autonomne robote važi ista konstatacija kao i za industrijske robote, a to je da nivo primene ne prati nivo razvijenosti, iako je razvijeni nivo inteligencije [30] takav da su autonomni roboti već laboratorijski testirani i za složene zadatke [26]. Razlozi za to su istorijske, kulturološke i tehnološke prirode. Cena periferije je takođe ograničavajući faktor i zbog njene "neinteligencije" trend razvoja i primene je usmeren ka inteligentnim tehnološkim sistemima, kojima pripadaju autonomni roboti. Inače, proizvodni programi se danas intenzivno menjaju, tako da je potreba za inteligentnim tehnološkim sistemima sve izraženija, jer su konvencionalni proizvodni sistemi kruto koncipirani, najčešće bez uključivanja veštačke inteligencije za rešavanje tehnoloških problema, tako da se automatizacija svodi na primenu jednostavnijih mašinskih sistema.

Kako se u ovoj monografiji razmatra primena sistema prepoznavanja kod industrijskih robota, uobičajena klasifikacija ovih sistema je dovedena u kontekst te primene [133], što je prikazano na slici 1.1. Funkcije sistema prepoznavanja kao kriterijumi za klasifikaciju, date na slici 1.1, mogu se svesti na pet osnovnih, kao i njihove kombinacije potrebne za pojedine klase zadataka [133]:

- prepoznavanje delova i/ili stabilnih stanja,
- određivanje pozicije i orijentacije,
- izdvajanje i lociranje značajnih karakteristika delova kao prostornih referenci,
- inspekcija/kontrola, i
- upravljanje putanjom robota.



Slika 1.1 Klasifikacija industrijskih robota sa stanovišta funkcija sistema prepoznavanja

Za tehnološki zadatak manipulacije uopšte i u montaži, izdvojene su funkcije sistema prepoznavanja koje direktno utiču na realizaciju tih zadataka. U tom smislu najbitnije su: prepoznavanje delova i/ili stabilnih stanja; identifikacija delova; određivanje pozicije i orijentacije delova; izdvajanje značajnih karakteristika delova i pozicioniranje end-efektora robota u odnosu na prepoznati deo. Poglavlje 3 ove monografije razmatra upravo te funkcije sistema prepoznavanja.

1.3 NOVI PRISTUP PROJEKTOVANJU TEHNOLOŠKIH PROCESA

Savremeni uslovi proizvodnje u domenu projektovanja tehnoloških procesa i upravljanja proizvodnjom zahtevaju fleksibilnost i prilagodljivost [11]. Nezavisan razvoj sistema za projektovanje tehnoloških procesa, upravljanje proizvodnjom i terminiranje uslovio je strogo razgraničenje između ovih sistema što dovodi do gubitka vremena, informacija, a zatim i do smanjenja kvaliteta i povećanja vremena proizvodnje [9]. U cilju prevazilaženja ovih problema neophodno je uvođenje novih ideja koje podrazumevaju integraciju projektovanja tehnoloških procesa i planiranja i upravljanja proizvodnjom. Ova monografija ima za cilj da prikaže koncept integralnog sistema za projektovanje tehnoloških procesa i upravljanje proizvodnjom [12] koji podrazumeva mogućnost direktnog preuzimanja projektnih informacija iz CAD sistema putem modula za tehnološko prepoznavanje, grubo i detaljno projektovanje tehnoloških procesa kroz primenu principa grupne tehnologije implementiranog pomoću veštačkih neuronskih mreža i prateće baze podataka sa podacima o režimima obrade. Simulacioni sistem služi za modeliranje pogona i proveru generisanih tehnoloških postupaka u odnosu na raspoložive resurse i trenutnu situaciju u pogonu. Rezultati simulacije mogu da ukažu na potrebu za promenom tehnoloških postupaka u smislu izbora alternativnih mašina i promene redosleda obrade. U poglavlju 6 ove monografije se detaljno objašnjava jedan segment postavljenog koncepta koji se odnosi na primenu ART-1 veštačke neuronske mreže u analizi geometrijske sličnosti osnosimetričnih cilindričnih delova, koja je neophodna u fazi grubog projektovanja tehnoloških procesa grupne tehnologije.

1.3.1 Arhitektura sistema

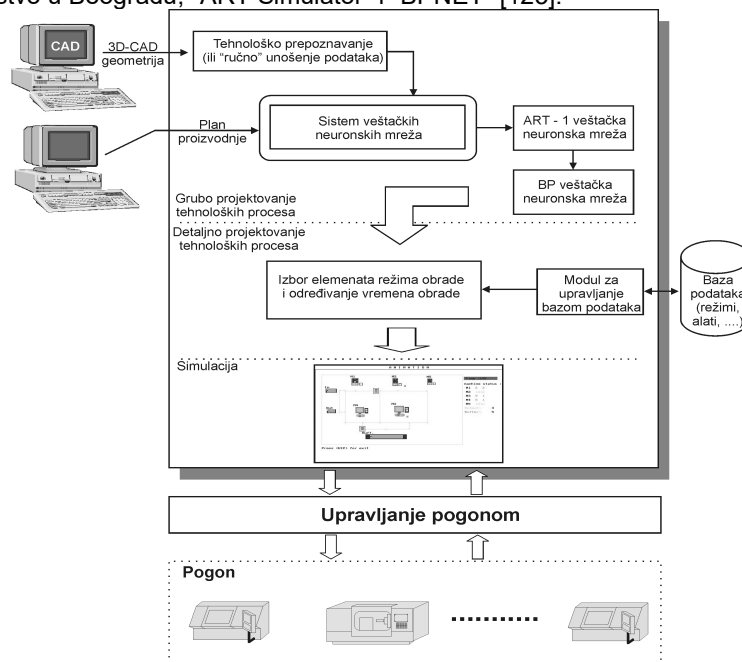
Ključni elementi integralnog sistema za projektovanje tehnoloških procesa i upravljanje proizvodnjom su (slika 1.2):

- modul za tehnološko prepoznavanje,
- modul za grubo projektovanje tehnoloških procesa,
- modul za detaljno projektovanje tehnoloških procesa,
- modul za upravljanje bazom podataka,
- modul za simulaciju

Osnovni ulaz za grubo projektovanje tehnoloških postupaka predstavljaju geometrijske i tehnološke informacije o delovima dopunjene podacima o porudžbinama i planu proizvodnje. Geometrijske i tehnološke informacije mogu se dati "ručno" ili se mogu direktno preuzeti iz CAD sistema putem odgovarajućeg modula za tehnološko prepoznavanje. Koncept tehnološkog prepoznavanja opisan je u [8,9,122].

Modul za grubo projektovanje tehnoloških procesa obuhvata sistem tehnološkog prepoznavanja, sistem planiranja proizvodnje i sistem veštačkih neuronskih mreža. Sistem tehnološkog prepoznavanja izdvaja binarni vektor koji definiše tipske tehnološke sekvence za odgovarajući mašinski deo, na osnovu koga se obezbeđuje ulazna informacija za sistem veštačkih neuronskih mreža. Dekompozicija mašinskog dela i procedura formiranja binarnog vektora data je u

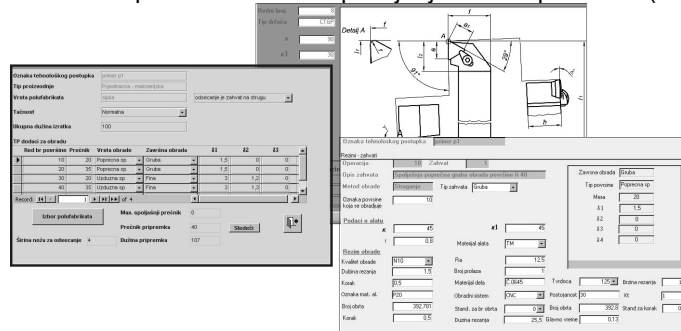
[122], a ovde se još napominje da je moguće, za neke jednostavnije, postojeće sisteme tehnološkog prepoznavanja, koristiti i ručno generisane binarne vektore. Tako generisani binarni vektori, za sve mašinske delove koji su planom proizvodnje predviđeni da se obrade u pogonu, predstavljaju skup uzoraka za obučavanje ART-1 veštačke neuronske mreže, koja ima zadatak da identifikuje njihovu geometrijsku i tehnološku sličnost. Na osnovu stepena sličnosti izdvajaju se grupe delova koje imaju shodno tome i srodan tehnološki postupak [111,116,131]. Kada su izdvojene grupe delova postupak grubog projektovanja tehnoloških procesa se nastavlja kroz učenje veštačke neuronske mreže sa prostiranjem greške unazad ("backpropagation" – BP mreža). Naime, ulazni skup uzoraka za obučavanje ove mreže je vezan za izdvojene grupe delova sa odgovarajućim binarnim vektorom generisanim iz ART-1 mreže. Izlazni sloj BP mreže, posle završenog procesa učenja, određuje redosled zahvata za svaku od izdvojenih grupa mašinskih delova. Dakle, modul za grubo projektovanje tehnoloških procesa ima zadatak da, korišćenjem veštačke inteligencije, odredi za svaku grupu, pa samim tim i za svaki mašinski deo unutar grupe, redosled obrade. Prednost ovog novog pristupa se ogleda u znatnom skraćenju vremena projektovanja, a značajno je reći da se time poboljšava i efikasnost upravljanja proizvodnjom. Ovaj modul koristi dva razvijena softvera na Katedri za proizvodno mašinstvo u Beogradu, "ART Simulator" i "BPNET" [125].



Slika 1.2 Arhitektura integralnog sistema za projektovanje tehnoloških procesa

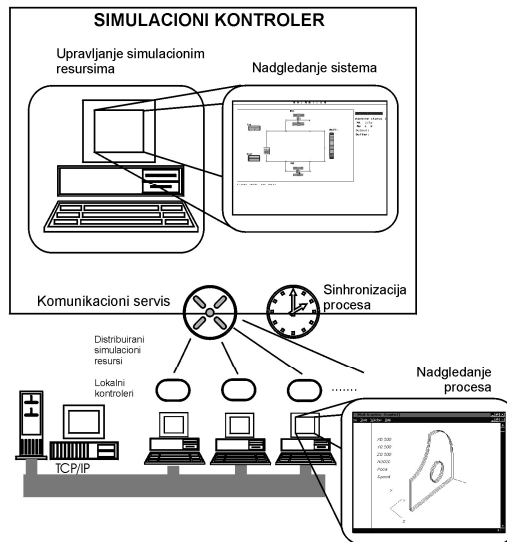
U okviru modula za detaljno projektovanje tehnoloških procesa [14] vrši se izbor režima obrade (korak, broj obrta, broj prolaza i glavno vreme obrade) za

zahvate definisane u prethodnom modulu. Izbor režima se vrši iz tabela preporučenih režima preko modula za upravljanje bazom podataka (slika 1.3).



Slika 1.3 Izbor elemenata režima obrade [14]

Simulacioni sistem FLEXY za distribuiranu simulaciju tehnoloških sistema [6,7,10,13] omogućuje generisanje virtualnog pogona na osnovu podataka iz pogona i na osnovu generisanih tehnoloških postupaka. Sistem virtualno prihvata sve upravljačke varijante koje se mogu pojaviti pri obradi i omogućuje analizu celokupnog tehnološkog procesa i daje osnove za optimizaciju tehnoloških postupaka u skladu sa raspoloživim resursima u pogonu. Sistem za distribuiranu simulaciju tehnoloških sistema prikazan je na slici 1.4.



Slika 1.4 Sistem za distribuiranu simulaciju tehnoloških sistema [13]

Prikazana arhitektura sistema treba da doprinese unapređenju informacione logistike u oblasti projektovanja tehnoloških procesa i upravljanja

proizvodnjom i zasniva se na integraciji projektovanja tehnoloških procesa i upravljanja proizvodnjom kroz razvoj i primenu kooperativnih agenata.

U ranim fazama projektovanja tehnoloških procesa uzimaju se u obzir planovi proizvodnje, rokovi i podaci o kapacitetima, koji uz podršku znanja o projektovanju tehnoloških procesa predstavljaju osnovu za generisanje globalnog tehnološkog postupka (grubo projektovanje). Fino planiranje i terminiranje zasniva se na akviziciji preporučenih režima obrade, podacima iz pogona i rezultatima distribuirane simulacije.



8. LITERATURA

- [1] Aleksander, I., Morton, H., An Introduction to Neural Computing, Chapman and Hall, 1990.
- [2] Andeen, G.B., (editor), Robot Design Handbook, SRI International, McGraw-Hill Book Company, 1988.
- [3] Anderson, D.Z., (editor), Neural Information Processing Systems, American Institute of Physics, 1988.
- [4] Arbib, M.A., Brains, Machines, and Mathematics, Springer-Verlag, 1987.
- [5] Åström, K.J., Wittenmark, B., Adaptive Control, Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- [6] Babić, B., *FLEXY* - inteligentni ekspert sistem za projektovanje FTS, monografija, Mašinski fakultet Beograd, 1994.
- [7] Babić, B., Towards an Intelligent System for FMS Design, in *L.M. Camarinha-Matos and H. Afsarmanesh (Eds.), Balanced Automation Systems II - Implementation challenges for anthropocentric manufacturing*, pp. 349-346, Chapman & Hall, 1996.
- [8] Babić, B., Miljković, Z., Feature Recognition as the Basis for Integration of CAD and CAPP Systems, Proceedings of the Second World Congress on Intelligent Manufacturing Processes and Systems, pp.596-601, Budapest, Hungary, 1997.

- [9] Babić,B., Projektovanje tehnoloških procesa, Mašinski fakultet u Beogradu, 1999.
- [10] Babić,B.,Putnik,G.,A Hierarchical Model of Distributed Simulation,*in Mertins K.,Krause O.,Schallock B.,(eds.)*, Global Production Management - IFIP WG5.7 International Conference on Advances in Production Management Systems APMS'99, pp. 26-33, Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [11] Babić,B., Axiomatic Design of Flexible Manufacturing Systems, *International Journal of Production Research*, Vol. 37, No. 5, pp. 1159-1173, 1999.
- [12] Babić,B., Miljković,Z., Novi pristup projektovanju tehnoloških procesa, 28. JUPITER Konferencija, 24. simpozijum NU * ROBOTI * FTS, Zbornik radova, str. 3.113-3.116, Beograd, 2002.
- [13] Babić,B., Architecture of Distributed Simulation System, Proceedings of the First International Conference on Manufacturing Engineering and EUREKA Partnering Event, pp. 357-364, Greece, 2002.
- [14] Babić,J.,Kalajdžić,M.,Babić,B., A Fully Integrated Process Planning System for Rotational Parts, Proceedings of the First International Conference on Manufacturing Engineering and EUREKA Partnering Event, pp. 365-372, Greece, 2002.
- [15] Ballard,D.H.,Brown,C.M., Computer Vision, Prentice Hall, Inc., 1982.
- [16] Beer,R.D., Intelligence as Adaptive Behavior – An Experiment in Computational Neuroethology, Perspectives in Artificial Intelligence Volume 6, Academic Press, Inc., 1990.
- [17] Beer,R.D.,Chiel,H.J.,Sterling,L.S., An Artificial Insect, *Journal American Scientist*, Vol.79, pp. 444-452, 1991.
- [18] Beer,R.D.,Ritzmann,R.E.,McKenna,T., Biological Neural Networks in Invertebrate Neuroethology and Robotics, Academic Press, Inc., 1993.
- [19] Bernard,T.M., Object Contour Tracking as Inspired by the "MAD RETINA" Paradigm, Proceedings of the *ICIP 94*, Austin-Texas, USA, 1994.
- [20] Besl,P.J.,Jain,R.C., Three-Dimensional Object Recognition, *Journal Computing Surveys*, Vol.17, No.1, pp. 75-145, 1985.
- [21] Bojković, Z.S., Digitalna obrada slike, Naučna knjiga, 1989.

- [22] Bojković,Z., Image Compression Using Artificial Neural Networks, Proceedings of the 4th Seminar on Neural Network Applications in Electrical Engineering – *NEUREL 97*, pp. 136-139, Beograd, 1997.
- [23] Bose,N.K.,Liang,P.,Neural Network Fundamentals with Graphs, Algorithms and Applications, McGraw-Hill, Inc., 1996.
- [24] Bradley,D.A.,Dawson,D.,Burd,N.C.,Loader,A.J., Mechatronics – Electronics in Products and Processes, Chapman and Hall, 1991.
- [25] Brown,R.A., Machines That Learn, Oxford University Press, 1994.
- [26] Brooks,R.A., Achieving AI Through Building Robots, AI Memo 899, MIT, Cambridge-Massachusetts, USA, 1986.
- [27] Brooks,R.A., A Robust Layered Control System For a Mobile Robot, IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA.2, NO.1, PP.14-23, 1986.
- [28] Brooks,R.A.,Flynn,A.M.,Marill,T., Self Calibration of Motion and Stereo Vision for Mobile Robot Navigation, AI Memo 984, MIT, Cambridge-Massachusetts, USA, 1987.
- [29] Brooks,R.A., New Approaches to Robotic, *Journal Science*, Vol.253., pp. 1227-1232, 1991.
- [30] Brooks,R.A., Artificial Life and Real Robots, MIT Press, pp. 3-10, 1992.
- [31] Buur,J., Positioning Mechatronics Design Between Mechanics, Electronics and Software, Proceedings of the International Conference on Advanced Mechatronics, pp. 189-194, 1989.
- [32] Cavaliere,S.,Martini,M.,Petrone,F.,Sinatra,R., A Neural Network Approach for Position-Error Optimization Problem in a Redundant Robot, Proceedings of the 9th World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms, Vol.3, pp.1684-1689, Milano, Italy, 1995.
- [33] Chen,B.,Hoberock,L.L., Machine Vision Recognition of Fuzzy Objects Using a New Fuzzy Neural Network, Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minneapolis-Minnesota, USA, 1996.
- [34] Cho,H.S.,Leu,M.C., Artificial Neural Networks in Manufacturing Processes: Monitoring and Control, Proceedings of the 9th Symposium on Information Control in Manufacturing, Vol.1, pp. 149-158, Nancy-Metz, France, 1998.

- [35] Chou,J.C.K.,Kamel,M., Finding the Position and Orientation of a Sensor on a Robot Mnaipulator Using Quaternions,*The International Journal of Robotics Research*, Vol.10.No.3, pp.240-254,1991.
- [36] Connell,J.H., Minimalist Mobile Robotics–A Colony–Style Architecture for an Artificial Creature, *Perspectives in Artificial Intelligence*, Volume 5, Academic Press, Inc. 1990.
- [37] Corke,P.I., “Visual Control of Robot Manipulators - a review ”, *Journal Visual Servoing World Scientific*, pp.1-31, 1993.
- [38] Corke,P.I., Visual Control of Robots: high – performance visual servoing, Research Studies Press LTD., John-Wiley&Sons,Inc.,1996.
- [39] Craig,J.J., Introduction to Robotics – Mechanics and Control, Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- [40] Dagli,C.H., Artificial Neural Networks in Intelligent Manufacturing, *Production Research 1993 – V.Orpana and A.Lukka (Editors)*, pp. 127-134, Elsevier Science Publishers, 1993.
- [41] Dagli,C.H.,(editor), Artificial Neural Networks for Intelligent Manufacturing, Chapman & Hall, 1994.
- [42] Davies,E.R., Design of Fast Vision Algorithms for Mechatronic Applications, *Proceedings of the 3rd International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice*, Vol.1, pp 1.309-1.314, Guimares, Portugal, 1996.
- [43] Diamantaras,K.I.,Kung,S.Y., *Principal Component Neural Networks – Theory and Applications*, John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [44] Dinsdale,J., *Mechatronics and Asics*, *Annals of the CIRP*, Vol 38/2/1989.
- [45] Donald,B.R., *Error Detection and Recovery in Robotics*, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol.336. Springer-Verlag, 1987.
- [46] Dougherty,E.R.,Giarolina,C.R., *Mathematical Methods for Artificial Intelligence and Autonomous Systems*, Prentice Hall, 1988.
- [47] Drexler,K.E., *Nanosystems – Molecular Machinery, Manufacturing and Computation*, John Wiley & Sons, Inc., 1992.
- [48] Dubois,D.,Prade,H., *Possibility theory – An Approach to Computerised Processing of Uncertainty*, Plenum Press, 1988.

- [49] Duda,R.O.,Hart,P.E., Pattern Classification and Scene Analysis, John Wiley & Sons, Inc., 1973.
- [50] El Wakil,S.D., Processes and Design for Manufacturing, Prentice Hall International, Inc., 1989.
- [51] Fang,G.,Dissanayake,M.W.M., On High-Speed Positioning of Industrial Robots, Proceedings of the 26th ISIR, pp. 351-356, Singapore, 1995.
- [52] Fessel,C.,Probst,R.,Kopacek,P., A Low Cost Vision System for Robot Manipulation, Proceedings of the 29th ISIR, 1998.
- [53] Flynn, A.M., Gnat Robots, IEEE, TH0204-8, 1987.
- [54] Flynn, A.M., Brooks, R.A., Tavrow, L.S., Twilight zones and Cornerstones (A Gnat Robot Double Feature), AI Memo 1126, MIT, Cambridge, Massachusetts, 1989.
- [55] Freeman,J.A, Simulating Neural Networks with *Mathematica*[®], Addison-Wesley Publishing Company, 1994.
- [56] Freeman, J.A., Skapura, D.M., Neural Networks – Algorithms, Applications and Programming Techniques, Addison-Wesley Publishing Company, 1991.
- [57] Fukuda,T.,Shibata,T.,Kosuge,K.,Arai,F., Sensing and Control of Robotic Manipulator by Neural Network, IEEE, pp. 985-990, 1991.
- [58] Fukuda,T.,Shibata,T., Theory and Applications of Neural Networks for Industrial Control Systems, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.39,No.6, pp. 472-489, 1992.
- [59] Fukuda,T., Neuromorphic Control: Adaptation and Learning, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.39,No.6, pp. 497-503, 1992.
- [60] Fukuda,T.,Arai,F.,Ishihara,H.,Sekiyama,K.,Matsuura,H., Laboratory of Micro System Control – Research Activities in 1997, Nagoya University, Japan, 1998.
- [61] Fukuda,T.,Kubota,N., Learning, Adaptation, and Evolution for Intelligent Robotic Systems, (invited paper), Proceedings of the International Conference on Advances in Systems, Signals, Control and Computers, Vol.1, pp. 59-68, Durban-South Africa, 1998.
- [62] Goldberg,D.E., Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley, Publishing Company, Inc., 1989.

- [63] Golden,R.M., Mathematical Methods for Neural Network Analysis and Design, MIT Press, 1996.
- [64] Groover,M.P.,Weiss,M.,Nagel,R.N.,Odrey,N.G., Industrial Robotics – Technology, Programming and Applications, McGraw-Hill Book Company, 1987.
- [65] Gupta,M.M.,Rao,D.H.(editors), Neuro-Control Systems – Theory and Applications, IEEE Press, 1994.
- [66] Guez,A.,Eilbert,J., Moshe,K., Neuromorphic Architectures for Fast Adaptive Robot Control, IEEE, pp. 145-149, 1988.
- [67] Hager,G.D.,Hutchinson,S.,Corke,P., Visual Servo Control –Tutorial TT3, IEEE International Conference on Robotics and Automation, USA, 1996.
- [68] Hashimoto,H.,Kubota,T., Visual Control of Robotic Manipulator Based on Neural Networks, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.39,No.6, pp. 490-496, 1992.
- [69] Haralick,R.M.,Shapiro,L.G., Computer and Robot Vision, Volume I, II, Addison-Wesley Publishing Company, 1992.
- [70] Haykin,S., Neural Networkks – A Comprehensive Foundation, Macmillan College Publishing Company, 1994.
- [71] Hecht-Nielsen,R., Neurocomputing, Addison-Wesley Publishing Co.,1989.
- [72] Holland,O., Towards True Autonomy, Proceedings of the 29th ISIR, 1998.
- [73] Holman,J.P., Experimental Methods for Engineers, McGraw-Hill International Editions, 1989.
- [74] Hornik,K.,Stinchcombe,M.,White,H., Multilayer Feedforward Networks are Universal Approximators, Journal *Neural Networks*,Vol.2,pp.359-366,1989.
- [75] Hunt,V.D.,Robotics Sourcebook,Elsevier Science Publishing Co.Inc.,1988.
- [76] Isermann,R., MECHATRONIC SYSTEM – A challenge for the design of intelligent control systems, Proceedings of the 3rd European Control Conference, pp. 2708-2713, Rome, Italy, 1993.
- [77] Jamshidi,M., Soft Computing Control of Complex Systems: From Expert Systems to *SoftLab*[®],(invited paper), Proceedings of the International Conference on Advances in Systems, Signals, Control and Computers, Vol.1, pp. 1-5, Durban-South Africa, 1998.

- [78] Janson,D.J.,Frenzel,J.F.,Training Product Unit Neural Networks with Genetic Algorithms, IEEE Expert, pp. 26-33, 1993.
- [79] Jocković,M., Veštačka Inteligencija, "Filip Višnjić", Beograd, 1994.
- [80] Kalajdžić,M., Tehnologija mašingradnje, Mašinski fakultet, Beograd, 2002.
- [81] Kalajdžić,M., Miljković,Z., Babić,B., i dr., Razvoj metoda automatizovanog projektovanja obradnih sistema i procesa, Projekat MNT Vlade Republike Srbije: 0127, Polugodišnji izveštaj, Beograd, 2002.
- [82] Kandel, E.R., Schwartz, J.H., Principles of Neural Science, Elsevier Science Publishing Co., Inc., 1985.
- [83] Kasabov,N.,Kozma,R.,(editors), Neuro-Fuzzy Techniques for Intelligent Information Systems, Physica-Verlag, Springer-Verlag Company,1999.
- [84] Katić,D.M., Neuronske mreže u robotici, Zbornik radova III seminara *NEUREL 95*, str. 72-87, Beograd,1995.
- [85] Kim,S.H., Designing Intelligence – A Framework for Smart Systems, Oxford University Press, 1990.
- [86] Klafter,R.D,Chmielewski,T.A.,Negin,M., Robotics Engineering – An Integrated Approach, Prentice Hall International, Inc., 1989.
- [87] Klir,G.J.,Folger,T.A., Fuzzy Sets, Uncertainty and Information, Prentice-Hall International, 1988.
- [88] Koivo,A.J., Fundamentals for Control of Robotic Manipulators, John Wiley & Sons, 1989.
- [89] Kosko,B., Neural Networks and Fuzzy Systems – A Dinamical System Approach to Machine Intelligence, Prentice Hall, 1992.
- [90] Kosko,B., Neural Networks for Signal Processing, Prentice Hall, 1992.
- [91] Kovacevic,R.,Zhang,Y.M.,Li.L.,Beardsley,H., Sensing and Control of Weld Pool Geometrical Appearance, Proceedings of the 26th International Conference on Production Engineering, pp. 813-824, Budva, 1996.
- [92] Kuffler, S.W., Nichols,J.G., Martin, A.R., From Neuron to Brain, Sinauer Associates, Sunderland, Massachusetts,1984.
- [93] Kuperstein,M., Generalized Neural Model for Adaptive Sensory-Motor Control of Single Postures, IEEE, pp. 140-144, 1988.

- [94] Langton, C.G. (editor), *Artificial Life*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1989.
- [95] Lanzetta, M., Santochi, M., Tantussi, G., *Computer-Aided Visual Inspection in Assembly*, *Annals of the CIRP*, Vol.48/1, pp.13-16, 1999.
- [96] Lu, Y.C., Chou, J.C.K., *Eight-Space Quateration Approach for Robotic Hand-eye Calibration*, *IEEE*, pp. 3316-3321, 1995.
- [97] Lu, B., Evans, B.L., Tošić, D.V., *Simulation and Synthesis of Artificial Neural Networks Using Dataflow Models in Ptolemy*, (invited paper), *Proceedings of the 4th Seminar on Neural Network Applications in Electrical Engineering – NEUREL 97*, pp. 84-89, Beograd, 1997.
- [98] Manolov, O., Milanova, M., *Path Generation of Mobile Robot Using Neural Networks and Sensory Data Fusion*, *Proceedings of the 4th Seminar on Neural Network Applications in Electrical Engineering – NEUREL 97*, pp. 207-209, Beograd, 1997.
- [99] McKerrow, P.J., *Introduction to Robotics*, Addison-Wesley Publishing Co., 1991.
- [100] Mester, G., *Neuro-Fuzzy-Genetic Control Algorithm of Intelligent Robots*, *Zbornik radova III seminara NEUREL 95*, str. 136-141, Beograd, 1995.
- [101] Milacic, M.V., Kovacevic, R., *Intelligent Welding with CO₂ Laser*, *The 4th International Seminar on Intelligent Manufacturing System – Theory and Practice*, ECPD-CIRP, Beograd, 1998.
- [102] Milačić, V.R., *Teorija projektovanja tehnoloških sistema*, *Serija Inteligentni tehnološki sistemi*, Knjiga 2, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, JUPITER – zajednica, Beograd, 1987.
- [103] Milačić, V.R., Spasić, Ž., *Kompjuterski integrisani tehnološki sistemi CIM-sistemi*, Mašinski fakultet, Beograd, 1990.
- [104] Milačić, V.R., Bojanić, P., Milačić, M., *Tehnička kibernetika*, Mašinski fakultet, Beograd, 1994.
- [105] Milačić, V.R., Miljković, Z., *Nanotehnologija, veštački život i insekt robot-novi izazov za inženjere*, 15. jugoslovenski simpozijum NU-ROBOTI-FS, *Zbornik radova*, pp. 77-82, Prohor Pčinjski, 1993.
- [106] Miljković, Z., *Istraživanje i razvoj mikrorobota za montažu mehatronskih sklopova*, *Magistarska teza*, Mašinski fakultet, Beograd, 1994.

- [107] Miljković,Z.,Milačić,V., Razvoj inteligentnih autonomnih mikrorobota, Časopis PROIZVODNO MAŠINSTVO, UDK621.7, ISSN 0354-6446, Godina 11, Vol.1-2, str.235-242, Novi Sad, 1994. (rad saopšten na 20. JUPITER konferenciji, a izabran od uređivačkog odbora časopisa za publikovanje u 1994.)
- [108] Miljković,Z.,Milutinović,D., Veštačke neuronske mreže za inteligentne autonomne sisteme u industrijskoj robotici, Zbornik radova 21. JUPITER konferencija, 17. jugoslovenski simpozijum "NU-ROBOTI-FTS", str. 3.105-3.110, Beograd, 1995.
- [109] Miljković,Z.,Milačić,V., Research and Development of the Intelligent Autonomous Microrobot for Assembly of Mechatronic Fits, Proceedings of the First World Congress on Intelligent Manufacturing Processes & Systems, Vol. 1., pp. 310-318, Mayagüez, Puerto Rico, 1995.
- [110] Miljković,Z.,Kokotović,B., Intelligent Control of Autonomous Mobile Robot Using Neural Networks, Proceedings of International A.M.S.E Conference: Systems – SYS'95, Symposium: Fuzzy Systems, Neural Networks, Artificial Intelligence, Vol1. pp.197-206, Brno, Czech. Rep., 1995.
- [111] Miljković,Z., Intelligent Tehnologies in Manufacturing Process Design Using Neural Networks, Proceedings of the International A.M.S.E Conference: ITHURS 96, Vol.2. pp. 3-9, Leon, Spain, 1996.
- [112] Miljković,Z.,Kokotović,B., Intelligent Control of Autonomous Manufacturing Systems, Proceedings of the 26th International Conference on Production Engineering, pp. 825-830, Budva, 1996.
- [113] Miljković,Z., Application of ART-1 Neural Network for Pattern Recognition in Robotics, (invited paper), Proceedings of the International A.M.S.E Conference: Communications, Signals and Systems – CSS96, Vol.1. pp. 235-238, Brno, Czech. Rep., 1996.
- [114] Miljković,Z., Intelligent Control of Industrial Robot Using Recognition System and Artificial Neural Nets, Proceedings of the 10th International Conference on Industrial Systems, Vol.1. pp.229-234, Novi Sad, 1996.
- [115] Miljković,Z., Hierarchical Intelligent Robot Control Based on Artificial Neural Network System, Proceedings of the 11th Int. Conf. on Mathematical and Computer Modelling and Scientific Computing will be published as the special issue of the Journal *Mathematical Modelling and Scientific Computing* (ISSN 1067-0688), Vol.8 (accepted paper), Washington, DC., USA, 1998.

- [116] Miljković,Z., Application of ART-1 Neural Network in Group Technology Design, AMSE Journal *Advances in Modeling & Analysis*, Series D: Mathematical Tools, General Computer Tools, Vol.1 No.2, pp. 1-16, France, June 1998.
- [117] Miljković,Z.,Lazarević,I., "ART-1 Simulator" for Identification of Objects in Robotics, Proceedings of the International A.M.S.E Conference on Contribution of Cognition to Modelling-CCM'98, pp.5.48-5.51, Lyon, France, 1998.
- [118] Miljković,Z.,Lazarević,I., Control Strategy for Learning Industrial Robot Based on Artificial Neural Network System,Proceedings of the International Conference on Systems, Signals, Control, Computers – SSCC'98, Vol.3, pp.124-128, Durban-South Africa, 1998.
- [119] Miljković,Z.,Babić,B., Adaptive Behaviour of Autonomous Mobile Robot Based on Heterogeneous Neural Networks, Proceedings of the International Conference on Systems, Signals, Control, Computers – SSCC'98, Vol.3, pp.129-133, Durban-South Africa, 1998.
- [120] Miljković,Z., Upravljačka strategija autonomnog industrijskog robota bazirana na "BPNET" kompjuterskoj simulaciji, 27. Savetovanje proizvodnog mašinstva Jugoslavije (sa međunarodnim učešćem), Zbornik radova na CD-u, Niš-Niška banja, 1998.
- [121] Miljković,Z., Procesiranje slike 2D-objekata i njihova identifikacija korišćenjem "ART-1 Simulatora", Zbornik radova 25. JUPITER Konferencija, 21. simpozijum NU * ROBOTI * FTS, str.3.73-3.78, Beograd, 1999.
- [122] Miljković,Z.,Babić,B., Decomposing Functionality of the Feature Recognizer Based on Artificial Neural Network System, International A.M.S.E Conf. on Artificial Inteligence-ICAI'99, printed in "*Development and Practice of Artificial Inteligence Techniques*" by Bajic.V.B. and Daohang Sha (*Editors*), IAAMSAD (ISBN 0-620-24836-x), pp.248-250, Durban-South Africa, September 1999.
- [123] Miljković,Z., Primena sistema prepoznavanja u upravljanju industrijskim robotom, 26. JUPITER Konferencija, 22. simpozijum NU * ROBOTI * FTS, Zbornik radova, str. 3.21-3.26 , Beograd, 2000.
- [124] Miljković,Z., Da li mehatronski sistem-robot može da uči?, Međunarodna naučno-stručna konferencija MMA2000-FLEKSIBILNE TEHNOLOGIJE, Zbornik radova, str.139-140, Novi Sad, 2000.

- [125] Miljković,Z., Razvoj upravljačkih algoritama za autonomne industrijske robote na bazi sistema prepoznavanja i učenja, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet u Beogradu, 2000.
- [126] Miljković,Z., Hierarchical Intelligent Control of Learning Robot Using Camera and System of Artificial Neural Networks, *International Journal of Applied Computer Science* (ISSN 1507-0360), Special Issue: *Selected Applications of Artificial Intelligence*, Vol.8 No.2, pp.79-97, Poland, 2000.
- [127] Miljković,Z., Empirical Control Strategy for Autonomous Industrial Robot Based on Recognition System and Machine Learning, *International Journal of Production Engineering and Computers* (ISSN 1450-5096), Vol.3 No.3, pp. 29-34, Yugoslavia, 2000.
- [128] Miljković,Z., Autonomnost robota bazirana na empirijskom upravljačkom algoritmu, 28. Savetovanje proizvodnog mašinstva Jugoslavije (sa međunarodnim učešćem), Zbornik radova, str. 4.12-4.18, Mataruška banja, Septembar 2000.
- [129] Miljković,Z., Algoritam empirijskog upravljanja kao osnova za realizaciju autonomnog ponašanja industrijskog robota, 27. JUPITER Konferencija, 23. simpozijum NU * ROBOTI * FTS, Zbornik radova, str. 3.57-3.60 , Beograd, 2001.
- [130] Miljković,Z., Intelligent Control System of Autonomous Robot, Proceedings of the Fourth International Conference - Heavy Machinery HM 2002, pp. D.105-D.108, Kraljevo-Yugoslavia, 2002.
- [131] Miljković,Z., Babić,B., Kalajdžić,M., Manufacturing Similarity Identification in Group Technology Design Based on the "ART-1 Simulator", Proceedings of the First International Conference on Manufacturing Engineering and EUREKA Partnering Event, pp. 325-335, Greece, 2002.
- [132] Miljković,Z., Empirical Control System for Robots That Learn, Proceedings of the First International Conference on Manufacturing Engineering and EUREKA Partnering Event, pp. 759-768, Greece, 2002.
- [133] Milutinović,D., Sistemi prepoznavanja kod robota za fleksibilne tehnološke sisteme i montažu, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Beograd, 1987.
- [134] Milutinovic,D.S.,Milacic,V.R., A Model-Based Vision System Using a Small Computer, *Annals of the CIRP*, Vol.36/1,pp.327-330,1987.
- [135] Mitrofanov,S.P., Naučni temelji grupne tehnologije, Privreda, 1964.

- [136] Monostori,L.,Barschdorff,D., Artificial Neural Networks in Intelligent Manufacturing, *Journal Robotics & Computer-Integrated Manufacturing*, Vol.9, No.6, pp. 421-437, 1992.
- [137] Monostori,L.,Markus,A.,Van Brussel,H.,Westkampfer,E., Machine Learning Approaches to Manufacturing, *Annals of the CIRP*, Vol.45/2, pp. 675-712,1996.
- [138] Nayak,N.,Ray,A., Intelligent Seam Tracking for Robotic Welding, *Advances In Industrial Control Series*, Springer-Verlag, 1993.
- [139] Nelson,D.H.,Schneider,G., Applied Manufacturing Process Planning, Prentice Hall, Inc., 2001.
- [140] Nnaji,B.O., Theory of Automatic Robot Assembly and Programming, Chapman & Hall, 1993.
- [141] Nof,S.Y.(editor), Handbook of Industrial Robotics, John Wiley & Sons, 1985.
- [142] O'Hare,G.M.,Jennings,N.R.(editors), Foundations of Distributed Artificial Intelligence, Sixth-Generation Computer Technology Series, John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [143] Okada,N.,Maruki,Y.,Yoshida,A.,Shimizu,Y.,Kondo,E., A Self-Organizing Visuo-Motor Map for a Redundant Manipulator in Environments with Obstacles, *Proceedings of the 9th International Conference on Advanced Robotics – 99 ICAR*, Tokyo, Japan, 1999.
- [144] Parkin,R.E., Applied Robotic Analysis, Prentice Hall, 1991.
- [145] Parsaei,H.R.,Jamshidi,M., Design and Implementation of Intelligent Manufacturing Systems From Expert Systems, Neural Networks to Fuzzy Logic, Prentice Hall, 1995.
- [146] Patterson,D.W., Artificial Neural Networks – Theory and Applications, Prentice Hall, 1996.
- [147] Pfeiffer,F.,Reithmeier,E., *Roboterdyamik*, B.G. Teubner Stuttgart, 1987.
- [148] Pugh,A.,(editor), Robot Vision and Sensory Controls, *Proceedings of the 4th International Conference*, IFS (Publications) Ltd and North-Holland, 1984.
- [149] Putnik,G.D., Primena induktivnog učenja baziranog na teoriji automata za izbor alata u projektovanju tehnoloških procesa obrade metala rezanjem, *Doktorska disertacija*, Mašinski fakultet, Beograd, 1992.

- [150] Putnik,G.D., The 2nd Definition of Mechatronics and Implications for a New Generation Robots, Proceedings of the 3rd International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice, Vol.1,pp. 1.143-1.150, Guimares, Portugal, 1996.
- [151] Radjenović-Mrčarica,J.,Detter,H., Neural Network Based System for Microparts Assembly, Proceedings of the First ECPD International Conference on Advanced Robotics and Intelligent Automation, pp. 209-214, Greece, 1995.
- [152] Rao,V.B.,Rao,H.V., C++ Neural Networks and Fuzzy Logic, MIS:Press, 1993.
- [153] Rathmill,K.,(editor), Robotics Assembly, International Trends in Manufacturing Technology, IFS (Publications) Ltd. Springer-Verlag, 1985.
- [154] Rivin,E.J., Mechanical Design of Robots, McGraw-Hill Book Company, 1988.
- [155] Rumelhart,D.E.,McClelland, Parallel Distributed Processing, Explorations in the Microstructure of Cognition Vol.1, The MIT Press, 1986.
- [156] Russel,S.J.,Norving,P., Artificial Intelligence – A Modern Approach, Prentice Hall, 1995.
- [157] Russell,S.J., The Use of Knowledge in Analogy and Induction, Morgan Kaufmann Publishers, Inc., San Mateo, California, 1989.
- [158] Sitti,M.,Hoummady,M.,Hashimoto,H., Trends on Mechatronics for Micro/Nano Telemanipulation: Survey and Requirements, Proceedings of the 9th Symposium on Information Control in Manufacturing, Vol.2, pp. 193-198, Nancy-Metz, France, 1998.
- [159] Schultz,A.C.,Grefenstette,J.J.,De Jong,K.A., Test and Evaluation by Genetic Algorithms, IEEE Expert, pp. 9-14, 1993.
- [160] Shibata,T.,Fukuda,T.,Kosuge,K.,Arai,F.,Tokita,M.,Mitsuoka,T., Hybrid Symbolic and Neuromorphic Control for Hierarchical Intelligent Control, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2081-2085, Nice, France, 1992.
- [161] Shoham,M.,Li,C.J.,Hacham,Y.,Kreindler,E., Neural Network Control of Robot Arm, Annals of the CIRP, Vol.41/1, pp. 407-410, 1992.
- [162] Skapura,D.M., Building Neural Networks, Addison-Wesley Publishing Company, 1996.

- [163] Spong,M.W., Vidyasagar,M., Robot Dynamics and Control, John Wiley & Sons, 1989.
- [164] Szalay,T.,Nagy,Z., Increasing the Intelligence of Industrial Robots Using Sensors, Proceedings of the 24th ISIR, pp. 153-160, 1993.
- [165] Szu,H.,Hsu,C., Neural Network Blind De-mixing Technology, (invited paper), Proceedings of the International Conference on Advances in Systems, Signals, Control and Computers, Vol.1, pp. 51-58, Durban-South Africa, 1998.
- [166] Tanimoto,S.L., The Elements of Artificial Intelligence – An Introduction Using LISP, ...
- [167] Trabasso,L.G.,Aumond,B.D., Automatic Visual Pattern Recognition for Robotic Tasks Based on Invariant Image Attributes Using an Artificial Neural Network, Proceedings of the 3rd International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice, Vol.1, pp.1.279-1.284, Guimares, Portugal, 1996.
- [168] Trimmer, W.S.N., Gabriel, K.J., Design Considerations for a Practical Electrostatic Micro-motor,Sensors and Actuators,Vol.11,pp.189-206, 1987.
- [169] Tsay,T.I.J.,Chen,J-Y., Intelligent Visual Control of Robot Manipulators, Proceedings of the 30th ISIR, pp.445-452, Tokyo,Japan, 1999.
- [170] Ueda,K.,Ohkura,K., A Biological Approach to Complexity in Manufacturing Systems, Journal *Manufacturing Systems*, Vol.25, No.1, pp. 57-65, 1996.
- [171] Veelenturf,L.P.J, Analysis and Applications of Artificial Neural Networks, Prentice Hall, 1995.
- [172] Visual Basic 5.0, Enterprise edition, *Microsoft Corporation*, 1997.
- [173] Vukobratović,M., Kako upravljati industrijskim manipulatorima?, Separat,...
- [174] Vukobratović,M., Stokić,D., Kirćanski,N., Kirćanski,M., Hristić,D., Karan,B., Vujić, D.Đurović,M., Uvod u robotiku, Institut "Mihajlo Pupin", Beograd, 1986.
- [175] Vukobratović,M., Katić,D., Learning Control of Industrial Robots Interacting with Dynamic Environment by Application of Multilayer Perceptrons, Proceedings of the 26th ISIR, pp.583-588, Singapore, 1995.
- [176] Vukobratović,M., Trendovi istraživanja u robotici i inteligentnim konstrukcijama, Mašinstvo za XXI vek, str. 625-642, Novi Sad, 1995.

- [177] Wang,Y.,Yuan,W.,Zhou,J.,Wang,S., An Edge Detection of Cumulate Particles Using Hybrid Neural Network, Proceedings of the International Conference on Advances in Systems, Signals, Control and Computers, Vol.2, pp. 236-239, Durban-South Africa, 1998.
- [178] Walter Van de Velde (editor), Toward Learning Robots, MIT Press, Special Issues of *Robotics and Autonomous Systems*, 1993.
- [179] Warnecke,H.J.,Schraft, R.D., Industrie–roboter – Handbuch für Industrie und Wissenschaft, Springer-Verlag, 1990.
- [180] Wassermann,P.D., Neural Computing – Theory and Practice, Van Nostrand Reinhold, 1989.
- [181] Welstead,S.T., Neural Network and Fuzzy Logic Applications in C/C++, John Wiley & Sons, Inc., 1994.
- [182] Werbos,P., Beyond regression: New tools for prediction and analysis in the behavioral sciences, Ph.D. dissertation, Committee on Applied Mathematics, Harvard University, Cambridge, MA, USA, 1974.
- [183] Werbos,P., Backpropagation Through Time: What It Does and How to Do It, Proc. IEEE, Vol.78, No.10, pp. 1550-1560, 1990.
- [184] Widrow,B.,Lehr,M.A., 30 Years of Adaptive Neural Networks: Perceptron, Madaline, and Backpropagation, Proceedings of the IEEE, Vol.78, No.9, 1990.
- [185] Williams, G., Williams, P., Nervous System Construction Kit for IBM Compatibles, Version 3.0, HartIdeas Publishing, 1991.
- [186] Wolfram,S., *Mathematica™*: A System for Doing Mathematics by Computer, Wolfram Research Inc., 1988.
- [187] Young,I.T.,Gerbrands,J.J.,VanVliet,L.J., Fundamentals of Image Processing, Delft University of Technology, The Netherlands, 1999.
- [188] Zadeh,L., Fuzzy Logic, Neural Networks, and Soft Computing, Journal *Fuzzy systems*, Vol.37, No.3, pp. 77-84, 1994.
- [189] Zalzala,A.M.S.,Morris,A.S., Neural Networks for Robotic Control -Theory and Applications, Ellis Horwood Limited, 1996.
- [190] Zlacy,E.J., Computer Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical Systems, Volume I: Basic Methods, Allyn and Bacon, 1989.

Предмет: Рецензија монографије "Системи вештачких неуронских мрежа у производним технологијама", аутора доц. др Зорана Ђ. Миљковића.

На основу одлуке Научног већа Машинског факултета која је донета на седници одржаној 06.06.2002.год. именован сам као један од рецензената за предметну монографију.

На основу примљеног материјала, и то 16.11.2002. год., подносим следећу

Р Е Ц Е Н З И Ј У

Рукопис предметне монографије предат је на рецензију у облику који је припремљен за штампу, и то у Б5 формату на 185/Х страна, где се додатних десет страна односи на подкорицу, предговор, садржај, номенклатуру ознака, списак акронима и апстракт на енглеском језику. Целокупна садржина рукописа подељена је на 7 поглавља, и то:

1. Увод,
2. Машинско учење и вештачке неуронске мреже,
3. Системи препознавања код робота,
4. Интелигентно управљање аутономним роботима,
5. Експериментални системи интелигентног управљања аутономним роботима,
6. Групна технологија и вештачке неуронске мреже, и
7. Закључак.

Поред тога се на крају даје списак коришћене литературе са 190 наслова и прилог. Наводи се да је текст рукописа илустрован са 92 слике и цртежа.

Аутор у свом уводу представља резултате својих истраживања који се односе на системе вештачких неуронских мрежа, поставља их у центар интелигентних технолошки система, који треба да омогуће позитиван тренд развоја производних технологија у овом веку, и то кроз интеграцију софтверске и хардверске архитектуре мехатронских

система. Такође, овде се дефинише и место аутономних робота у пројектовању и реализацији технолошких процеса.

У другом поглављу се дефинишу и описују вештачке неуронске мреже, алгоритми за учење, а на крају се даје и класификација модела вештачких неуронских мрежа.

Полазећи од тога да вештачко гледање код робота преко камере обухвата следеће активности: (i) формирање слике, (ii) процесирање слике, (iii) препознавање, и (iv) акције (одзив) робота, то се, даље, у трећем поглављу, детаљно описују и анализирају све наведене активности. Коначно, управљање роботима се дефинише (i) на основу карактеристика које су издвојене из слике, и/или (ii) на основу грешке која је у директној корелацији са параметрима слике.

Полазећи од значаја, улоге и везе са интелигентним роботима, у четвртој поглављу се прво дефинише мехатроника, и детаљно анализирају аутономни инсект роботи, који подразумевају креирање интелигентног електромеханичког система који се састоји од интелигентног управљачког система, микро-сензора, микромотора и извора енергије, односно, аутор га дефинише као аутономни мобилни микроробот базиран на интелигенцији инсекта.

Посебно су описани експериментални системи индустријских робота, који су структурисани на бази едукационог индустријског робота "MITSUBISHI MOVEMASTER-EX", и робота "Don Kihot" који је посебно развијен и реализован у лабораторији за индустријску роботiku и вештачку интелигенцију Машинског факултета у Београду. Истиче се, што је посебан допринос свих истраживања, да су код овог другог непотребне многе функције "класичног" управљања роботима, ако се угради стратегија интелигентног управљања. Постављени модели илустровани су примером пројектоване структуре.

У шестом поглављу се детаљно "реафирмише" основни концепт групне технологије кроз примену вештачке неуронске мреже. Наиме, за разлику од класичног класификовања и груписања делова, вештачке неуронске мреже омогућују технолошко препознавање делова, и кроз више процедура омогућују фино пројектовање технологије за типске захвате.

Аутор у закључцима, поред осталог истиче да је хијерархијско интелигентно управљање аутономним индустријским роботима

засновано на систему вештачких неуронских мрежа, а кроз добијене резултате показује њихову предност у односу на друге технике вештачке интелигенције.

Посебно се истиче:

- (1) Да је аутор изложио једну сложену материју јасно и прегледно са природним и логичним увођењем у проблематику;
- (2) Употребљене су и коришћене ознаке и термини сагласно позитивним прописима и конвенцијама на Машинском факултету;
- (3) Целокупни рукопис представља оригинални научни рад, са научним доприносом у примени вештачких неуронских мрежа у производним технологијама, што има и инжењерску примену; и даље,

главни резултати спроведених истраживања, који су били доступни стручно научној јавности и кроз одбраћену докторску дисертацију "Развој управљачких алгоритама за аутономне индустријске роботе на бази система препознавања и учења", као и кроз 28 објављених радова, који су аутоцитирани у овом рукопису, показују широке могућности примене развијених вештачких неуронских мрежа у производним технологијама, односно примене вештачких неуронских мрежа у управљању шестоножним инсект роботом и могућности апликације у групној технологији.

На основу горенаведених закључака предлажем да се предметни рукопис штампа као монографија у едицији Центра за нове технологије Интелигентни технолошки системи.

Рецензент

Београд, 18.11.2002.године

Проф. др Милисав Калајић

Предмет: Извештај по издавању монографије.

На основу решења бр. 451-03-2414/2002-02 од 12.02.2003. године, о финансирању публикавања научне монографије, Министарство за науку, технологију и развој Владе Републике Србије финансирало је трошкове штампања монографије "Системи вештачких неуронских мрежа у производним технологијама", аутора др Зорана Миљковића, доцента Машинског факултета у Београду, у износу од 66.000,00 динара.

Као аутор монографије извештавам Министарство за науку, технологију и развој Владе Републике Србије о следећем:

- Монографија је изашла из штампе почетком фебруара 2003. године у тиражу од 500 примерака.
- У овој монографији су дати резултати машинског учења едукационог индустријског робота *MITSUBISHI Movemaster-EX* и посебно развијеног антропоморфног робота названог *Дон Кихот*, који су потврдили основаност хипотезе да механизми машинског учења, засновани на вештачким неуронским мрежама и концепту вештачког живота, могу да обезбеде мехатронском систему - роботу одговарајућу аутономност при извршавању технолошког задатка манипулације препознатих објеката уопште и у оквиру монтаже.
- У овој осмој књизи серије монографских дела *Интелигентни технолошки системи* такође је показано како се користе хетерогене вештачке неуронске мреже при реализацији локомоционог неуронског управљачког система *инсект робота*.
- Вештачке неуронске мреже могу да се користе и за грубо пројектовање технолошких процеса, тако да је у овој монографији представљена и примена "ART-1" неуронске мреже у пројектовању групне технологије за осносиметричне цилиндричне машинске делове.

Аутор монографије

У Београду, 10.04.2003. год.



др Зоран Миљковић, доцент

Na početku trećeg milenijuma, proizvodne tehnologije se nalaze na prekretnici u istraživačko-razvojnim programima, kao i u prisutnoj izgradnji novih tehnoloških kapaciteta, za proizvodnju neslućeno bogatijeg asortimana proizvoda.

Program inteligentnih tehnoloških sistema, u okviru kojih je i serija Inteligentni tehnološki sistemi, je jedan od osnovnih naučno-inženjerskih programa u oblasti proizvodnog mašinstva.

V. R. Milačić

Serija monografskih dela INTELIGENTNI TEHNOLOŠKI SISTEMI

Urednik serije: Prof. dr Vladimir R. MILAČIĆ

Naslovi u seriji:

1. Milačić M., Teorija prepoznavanja inženjerskih sistema, 1987.
2. Milačić V.R., Teorija projektovanja tehnoloških sistema, 1987.
3. Milačić V.R., Spasić Ž., Kompjuterski integrisani tehnološki sistemi, 1990.
4. Veljović A., Elementi ekspert sistema za projektovanje tehnoloških procesa, 1990
5. Babić B.R., Inteligentni ekspert sistem za projektovanje FTS, 1994.
6. Majstorović V.D., Koncept totalnog kvaliteta - Novi prilazi za tehnološke sisteme, 1995.
7. Petrović P.B., Inteligentni sistemi za montažu, 1999.
8. Miljković Z.Đ., Sistemi veštačkih neuronskih mreža u proizvodnim tehnologijama, 2003.

The series of monograph books INTELLIGENT MANUFACTURING SYSTEMS

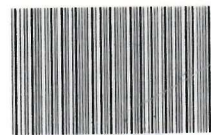
Editor: Prof. Dr Vladimir R. MILAČIĆ

Titles:

1. Milačić M., Engineering Systems Recognition Theory, 1987.
2. Milačić V.R., Manufacturing Systems Design Theory, 1987.
3. Milačić V.R., Spasić Ž., Computer Integrated Manufacturing Systems, 1990.
4. Veljović A., Expert System for Manufacturing Process Design, 1990
5. Babić B.R., FLEXY - Intelligent Expert System for FMS Design, 1994.
6. Majstorović V.D., Total Quality Concept - Advanced Approach to Manufacturing Systems, 1995.
7. Petrović P.B., Intelligent Assembly Systems, 1999.
8. Miljković Z.Đ., Systems of Artificial Neural Networks in Production Technologies, 2003.



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



86-7083-455-3

ISBN 86-7083-455-3