

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

ЗОРАН Ђ. МИЉКОВИЋ

МИЛИЦА М. ПЕТРОВИЋ

ИНТЕЛИГЕНТНИ ТЕХНОЛОШКИ СИСТЕМИ

са изводима из роботике и вештачке интелигенције



Машински факултет
Београд, 2021.

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

ЗОРАН Ђ. МИЉКОВИЋ

МИЛИЦА М. ПЕТРОВИЋ

Интелигентни технолошки системи

са изводима из роботике и вештачке интелигенције

Прво издање

МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ

Београд, 2021. године

Аутори:
Проф. др Зоран Ђ. Миљковић
Доц. др Милица М. Петровић

ИНТЕЛИГЕНТНИ ТЕХНОЛОШКИ СИСТЕМИ
са изводима из роботике и вештачке интелигенције
I издање

Рецензенти:
Проф. др Бојан Бабић
Проф. др Живана Јаковљевић

Издавач:
Универзитет у Београду - Машински факултет
11120 Београд 35, Краљице Марије 16

За издавача:
Проф. др Радивоје Митровић, декан

Штампање одобрила:
Комисија за издавачку делатност
Машинског факултета у Београду,
и
Декан Машинског факултета у Београду
одлуком бр. 12/2021
од 25.05.2021. године.

Главни и одговорни уредник:
Проф. др Милан Лечић,
председник Комисије за издавачку делатност
Машинског факултета у Београду

Тираж: 300 примерака

Штампа:
Planeta print
11000 Београд, Игора Васиљева 33р, тел.: +381 650 65 64

ISBN 978-86-6060-071-6

**Прештампавање или фотокопирање није дозвољено.
Сва права задржавају издавач и аутори.**

Предговор

Овај уџбеник обухвата вишедеценијска искуства аутора остварена како кроз реализацију докторских дисертација, магистарских и мастер теза, као и при реализацији активности научно-истраживачких пројеката у домену развоја интелигентних технолошких система, тако и током образовног процеса и рада са бројним студентима на обавезним предметима мастер академских студија Катедре за производно машинство под називом *Интелигентни технолошки системи, Индустијски роботи и Методе одлучивања*, а од 2020. године и на новоуспостављеном Студијском програму мастер академских студија *Индустија 4.0*, у оквиру обавезних предмета *Роботика и вештачка интелигенција, Машинско учење интелигентних роботских система* и изборног предмета *Терминирање технолошких система и процеса*.

У овом уџбенику, поред детаљно обрађених наставних целина и брижљиво одабраних примера за набројане предмете, дате су и одговарајуће корисне дискусије аутора у домену производно оријентисаних напредних технологија, роботике и вештачке интелигенције, као и биолошки инспирисаних алгоритама оптимизације. Аутори очекују да, осим студентима, овај уџбеник може корисно послужити и свима који се баве истраживањем, развојем и увођењем интелигентних технолошких система и концепта *Индустија 4.0*.

Аутори дугују посебну захвалност посвећеним рецензентима, проф. др Бојану Бабићу и проф. др Живани Јаковљевић, на драгоценим сугестијама и саветима који су утицали на побољшање квалитета овог уџбеника.

Аутори користе ову прилику да се најискреније захвале и својим сарадницима, студентима докторских студија, истраживачу сараднику Александру Јокићу, мастер инжењеру машинства, истраживачу приправнику Катарини Миљковић, мастер инжењеру машинства, истраживачу приправнику Ђорђу Јевтићу, мастер инжењеру машинства и стручном сараднику Лазару Ђокићу, мастер инжењеру машинства, на уложеном труду и изузетној помоћи у припреми овог уџбеника.

Аутори позивају све читаоце овог уџбеника, почевши од студената на свим нивоима студија, да својим сугестијама и примедбама укажу на евентуалне пропусте како би следеће издање овог уџбеника било унапређено.

Београд, мај 2021. године

Аутори

САДРЖАЈ

1	УВОД	1
1.1	Интелигентни технолошки системи – дефиниција, структура и значај	1
1.1.1	Дефиниција ИТС.....	2
1.1.2	Структура ИТС.....	3
1.1.3	Значај развоја ИТС.....	4
1.2	Аутономни роботски системи за 21. век	8
1.2.1	Аутономност робота	9
1.2.2	Класификација и примена робота	12
1.3	Технолошки системи и стратегије одлучивања	15
1.3.1	Машинска интелигенција – интелигентне технологије у производном машинству	15
1.3.2	Одлучивање у технолошком окружењу – променљиве одлучивања.....	18
1.3.3	Пројектовање диспозиционог плана технолошког система.....	22
2	ИНДУСТРИЈСКИ МОБИЛНИ РОБОТИ	35
2.1	Мобилни роботи – класификација, специфичности и значај	35
2.1.1	Класификација мобилних робота	38
2.1.2	Специфичности мобилних робота	39
2.1.3	Значај развоја мобилних робота	41
2.2	Основе кинематике мобилних робота – модели кретања	44
2.2.1	Модел кретања на основу пређеног пута	47
2.2.2	Брзински модел кретања мобилног робота	50
2.3	Перцепција окружења мобилног робота	54
2.3.1	Основни модели перцепције мобилних робота	54
2.3.2	Основна класификација сензора код мобилних робота	58
2.4	Проблеми локализације мобилних робота	60
2.4.1	Општа класификација.....	61
2.5	Калманов филтер	63
2.6	Линеаризовани Калманов филтер	68
2.6.1	Опис алгоритма	75
2.6.2	Математичко дефинисање алгоритма	77
2.6.3	Пример примене Линеаризованог Калмановог филтера	81

2.7	Оцењивање положаја робота и карактеристичних објеката у окружењу	89
2.7.1	Експериментални резултати оцене положаја мобилног робота применом алгорита Линеаризованог Калмановог филтера.....	92
3	МАШИНСКО УЧЕЊЕ ВЕШТАЧКИХ НЕУРОНСКИХ МРЕЖА.....	95
3.1	Вештачка интелигенција – дефиниција, историјат и значај.....	97
3.1.1	Дефиниција	101
3.1.2	Вештачка интелигенција – историјат и значај.....	101
3.2	Архитектура интелигентних система	104
3.2.1	Интелигентни системи и вештачка интелигенција.....	105
3.2.2	Интелигентне формализоване методологије и машинско учење ..	109
3.3	Вештачке неуронске мреже – основни концепти	113
3.3.1	Дефиниција	114
3.3.2	Вештачки неуронски систем – анализа перформанси	114
3.3.3	Неурон – процесирајући елемент вештачке неуронске мреже	117
3.3.4	Алгоритми машинског учења вештачких неуронских мрежа	123
3.4	Изабрани модели вештачких неуронских мрежа	125
3.4.1	Перцептрон.....	126
3.4.2	Перцептрон – решени пример.....	130
3.4.3	<i>Backpropagation</i> (BP) неуронска мрежа.....	134
3.4.4	<i>Backpropagation</i> (BP) неуронска мрежа – решени пример	142
3.4.5	ART-1 неуронска мрежа.....	149
3.4.6	ART-1 неуронска мрежа – решени пример	163
4	СИСТЕМИ ПРЕПОЗНАВАЊА КОД МОБИЛНИХ РОБОТА.....	173
4.1	Структура система препознавања базираних на камери.....	174
4.1.1	Општа структура система препознавања	178
4.1.2	Карактеристике процеса формирања дигиталне слике.....	179
4.2	Процесирање и анализа бинарне слике	181
4.3	Сегментација преко контура.....	183
4.3.1	Сегментација преко региона	185
4.3.2	Препознавање објекта у сцени робота	194
4.4	Системи препознавања и управљање мобилних робота	197
5	ИНТЕЛИГЕНТНО УПРАВЉАЊЕ АУТОНОМНИХ РОБОТА.....	203
5.1	Интелигентно управљање роботских система	203
5.1.1	Алгоритам емпиријског управљања	209
5.2	Аутономни работи и емпиријско управљање	213
5.2.1	Декомпозиција интелигентног управљања аутономног робота	215

5.2.2	Експериментални систем интелигентног управљања аутономног робота.....	218
5.2.3	Нови приступ роботици – неуронски управљачки систем инсект робота	225
5.2.4	Симулација рада инсект робота.....	234
5.2.5	Процесирање и анализа дигиталне слике објеката у сцени робота	242
5.2.6	Калибрација камере.....	249
5.2.7	Идентификација објеката снимљених камером.....	253
5.3	Примери експериментално развијених интелигентних управљачких система за аутономне роботе – резултати машинског учења.....	256
5.3.1	Експериментални резултати машинског учења.....	263
6	ГРУПНА ТЕХНОЛОГИЈА И ВЕШТАЧКЕ НЕУРОНСКЕ МРЕЖЕ.....	269
6.1	Увод у пројектовање групне технологије.....	269
6.2	Одређивање геометријске и технолошке сличности машинских делова применом ART-1 неуронске мреже	271
6.3	Класификација и формирање група машинских делова на основу геометријске сличности.....	275
7	БИОЛОШКИ ИНСПИРИСАНИ АЛГОРИТМИ ОПТИМИЗАЦИЈЕ	281
7.1	Метахеуристички алгоритми оптимизације – основни појмови и класификације	281
7.2	Генетички алгоритми	286
7.2.1	Генерисање јединки у иницијалној популацији.....	286
7.2.2	Евалуација функције циља и иницијализација параметара генетичких алгоритама	286
7.2.3	Селекција.....	287
7.2.4	Оператор укрштања.....	287
7.2.5	Оператор мутације	288
7.2.6	Псеудокод GA алгоритма	290
7.3	Алгоритам симулираног жарења.....	290
7.3.1	Параметри SA алгоритма	291
7.3.2	Псеудокод SA алгоритма.....	292
7.4	Алгоритам инспирисан интелигенцијом роја честица.....	294
7.4.1	Математичко моделирање алгоритма роја честица.....	295
7.4.2	Псеудокод PSO алгоритма	296
7.5	Алгоритам инспирисан колонијом мрава	297
7.5.1	Математичко моделирање ACO алгоритма	298
7.5.2	Псеудокод ACO алгоритма.....	300

7.6	Алгоритам инспирисан колонијом свитаца	300
7.6.1	Псеудокод FA алгоритма	302
7.7	Алгоритам инспирисан интелигенцијом мраволоваца	303
7.7.1	Оператори ALO алгоритма	304
7.7.2	Случајна кретања мрава	305
7.7.3	Математичко моделирање хватања мрава.....	305
7.7.4	Математичко моделирање клизања мрава према мраволовцу	306
7.7.5	Математичко моделирање елитизма	306
7.7.6	Псеудокод ALO алгоритма	307
7.8	Алгоритам инспирисан интелигенцијом чопора вукова	308
7.8.1	Математичко моделирање социјалне хијерархије сивих вукова.....	309
7.8.2	Математичко моделирање опкољавања плена.....	309
7.8.3	Математичко моделирање напада плена	310
7.8.4	Псеудокод GWO алгоритма.....	311
7.9	Алгоритам инспирисан интелигенцијом јата китова	311
7.9.1	Тражење плена (фаза експлорације).....	312
7.9.2	Приближавање плену.....	313
7.9.3	Спирално приближавање циљу (фаза експлоатације).....	314
7.9.4	Псеудокод WOA алгоритма	315
8	ФЛЕКСИБИЛНИ ТЕХНОЛОШКИ ПРОЦЕСИ.....	317
8.1	Пројектовање и оптимизација флексибилних технолошких процеса	317
8.1.1	Математички модел за оптимизацију технолошких процеса	324
8.1.2	Генетички алгоритми у оптимизацији флексибилних технолошких процеса са пет типова флексибилности	326
9	ТЕРМИНИРАЊЕ ПРОИЗВОДНО ТЕХНОЛОШКИХ ЕНТИТЕТА	331
9.1	Терминирање и оптимизација флексибилних технолошких процеса	331
9.1.1	Математички модел за оптимизацију планова терминирања	336
9.1.2	Терминирање технолошких процеса са пет типова флексибилности	337
9.1.3	Генетички алгоритми у оптималном терминирању технолошких процеса	346
10	ПРИМЕРИ ТЕРМИНИРАЊА ФЛЕКСИБИЛНИХ ТЕХНОЛОШКИХ ПРОЦЕСА	351
10.1	Пример 1	351
10.1.1	Математички модел за оптимизацију флексибилних технолошких процеса	353

10.1.2	Оптимизација технолошких процеса применом генетичких алгоритама.....	354
10.1.3	Математички модел за оптимизацију планова терминирања	357
10.1.4	Генетички алгоритми у оптимизацији планова терминирања	357
10.1.5	Експериментални резултати оптимизације планова терминирања флексибилних технолошких процеса	361
10.2	Пример 2	363
10.2.1	Генерисање оптималних технолошких процеса	365
10.2.2	Терминирање технолошких процеса применом генетичких алгоритама.....	368
10.2.3	Приказ резултата оптималних планова терминирања	370
11	ЛИТЕРАТУРА	373
12	ПРИЛОЗИ	391
12.1	Основе теорије вероватноће	391
12.2	Линеарна алгебра	396
12.2.1	Извод вектора и матричне функције	396
12.2.2	Квадратна форма и извод квадратне форме.....	397
12.2.3	Извод сложене векторске функције	398
12.2.4	Инверзна матрична лема – општи и специјални случај	398
12.2.5	Развијање векторске функције у Тејлоров ред	400
12.2.6	Норма Махаланобиса	401
12.3	Антропоморфни робот Дон Кихот.....	402
12.3.1	Решење директног кинематичког проблема	405
12.3.2	Решење инверзног кинематичког проблема	407

СПИСАК АКРОНИМА

ИТС	Интелигентни Технолошки Систем
CNC	енгл. <i>Computer Numerical Control</i> (Компјутерско Нумеричко Управљање – КНУ)
AI	енгл. <i>Artificial Intelligence</i> (Вештачка интелигенција)
CIM	енгл. <i>Computer Integrated Manufacturing</i> (Компјутерски Интегрисане Технологије – КИТ)
CAD	енгл. <i>Computer Aided Design</i> (Компјутерски подржано пројектовање)
CAM	енгл. <i>Computer Aided Manufacturing</i> (Компјутерски подржана производња)
CAPP	енгл. <i>Computer Aided Process Planning</i> (Компјутерски подржано пројектовање технолошких процеса)
FMS	енгл. <i>Flexible Manufacturing System</i> (Флексибилни Технолошки Систем – ФТС)
ИР	Индустријски Робот
МА	Машина Алатка
К	Компјутери
TQM	енгл. <i>Total Quality Management</i> (Менаџмент тоталним квалитетом)
AGV	енгл. <i>Automated Guided Vehicle</i> (Аутоматски Вођена Робоколица – АВР)
RAICO	енгл. <i>Robot with Artificial Intelligence based COgnition</i>
DOMINO	енгл. <i>Deep learning based Omnidirectional Mobile robot with INtelligent cOntrol</i>
DRL	енгл. <i>Deep Reinforcement Learning</i>
SLAM	енгл. <i>Simultaneous Localization And Mapping</i>
CLAM	енгл. <i>Concurrent Localization And Mapping</i>
ЛКФ	Линеаризовани Калманов филтер

КФ	Калманов Филтер
ХУА	Хибридна Управљачка Архитектура
ЛТЗ	Листа Транспортних Задатака
FM	<i>Feynman</i> -ова Машина
ИАМ	Интелигентни Аутономни Микроробот
BP	енгл. <i>BackPropagation</i>
Цент	Центар за Нове Технологије
AMP	Аутономни Мобилни Робот
ANN	енгл. <i>Artificial Neural Networks</i> (Вештачке неуронске мреже)
DARPA	енгл. <i>Defence Advanced Research Projects Agency</i>
BHC	Вештачки Неуронски Систем
ART	енгл. <i>Adaptive Resonance Theory</i>
STM	енгл. <i>Short-Term Memory</i>
LTM	енгл. <i>Long-Term Memory</i>
CCD	енгл. <i>Charge-Coupled Device</i> сензор
NSC	енгл. <i>Neural Servo Controller</i> (Неуронски Серво Контролер)
TCP	енгл. <i>Tool Center Point</i> (Врх робота)
IC	енгл. <i>Integrated Circuit</i> (Интегрисано коло)
RC	енгл. <i>Resistor-Capacitor</i> (Отпорник-кондензатор)
EA	енгл. <i>Evolutionary Algorithms</i> (Еволуциони алгоритми)
GA	енгл. <i>Genetic Algorithms</i> (Генетички алгоритми)
ES	енгл. <i>Evolution Strategy</i> (Еволуционе стратегије)
GP	енгл. <i>Genetic Programming</i> (Генетичко програмирање)

DE	енгл. <i>Differential Evolution</i> (Диференцијална еволуција)
ACO	енгл. <i>Ant Colony Optimization</i> (Алгоритам инспирисан колонијом мрава)
PSO	енгл. <i>Particle Swarm Optimization</i> (Алгоритам инспирисан интелигенцијом роја честица)
ABC	енгл. <i>Artificial Bee Colony</i> (Алгоритам инспирисан ројем пчела)
FA	енгл. <i>Firefly Algorithm</i> (Алгоритам инспирисан колонијом свитаца)
CS	енгл. <i>Cuckoo Search</i> (Алгоритам инспирисан претрагом кукавица)
BA	енгл. <i>Bat Algorithm</i> (Алгоритам инспирисан интелигенцијом слепих мишева)
FOA	енгл. <i>Fruit fly Optimization Algorithm</i> (Алгоритам инспирисан трагањем за храном воћних инсеката)
GWO	енгл. <i>Grey Wolf Optimizer</i> (Алгоритам инспирисан интелигенцијом чопора сивих вукова)
ALO	енгл. <i>Ant Lion Optimizer</i> (Алгоритам инспирисан интелигенцијом мраволоваца)
WOA	енгл. <i>Whale Optimization Algorithm</i> (Алгоритам инспирисан интелигенцијом јата китова)
SA	енгл. <i>Simulated Annealing</i> (Алгоритам симулираног жарења)
GSA	енгл. <i>Gravitational Search Algorithm</i> (Алгоритам гравитационог претраживања)
GLSA	енгл. <i>Gravitational Local Search Algorithm</i> (Алгоритам локалног гравитационог претраживања)
ACROA	енгл. <i>Artificial Chemical Reaction Optimization Algorithm</i> (Алгоритам заснован на вештачким хемијским реакцијама)
CFO	енгл. <i>Central Force Optimization</i> (Алгоритам базиран на законима дејства централне силе)
RO	енгл. <i>Ray Optimization algorithm</i> (Алгоритам базиран на закону преламања светлости)

TLBO	енгл. <i>Teaching Learning Based Optimization</i> (Оптимизација заснована на учењу)
TS	енгл. <i>Tabu (Taboo) Search</i> (Алгоритам табу претраге)
GSO	енгл. <i>Group Search Optimizer</i> (Алгоритам групне претраге)
ICA	енгл. <i>Imperialist Competitive Algorithm</i> (Империјалистички конкуритивни алгоритам)
LCA	енгл. <i>League Championship Algorithm</i> (Алгоритам лигашког првенства)
ISA	енгл. <i>Interior Search Algorithm</i> (Алгоритам унутрашње претраге)
PT	енгл. <i>Production Time</i> (Производно време)
TW	енгл. <i>Working Time</i> (Главно време обраде)
TT	енгл. <i>Transportation Time</i> (Време транспорта)
TCT	енгл. <i>Tool Change Time</i> (Укупно време измене алата)
SCT	енгл. <i>Set-up Change Time</i> (Укупно време промене оријентације алата)
TWPT	енгл. <i>Total Weighted Production Time</i> (Укупно производно време)
TAD	енгл. <i>Tool Access Direction</i> (Оријентација алата)
NP-hard	енгл. <i>Nondeterministic Polynomial optimization problems</i> (Недетерминистички полиномно оптимизациони проблеми)

1

1 УВОД

1.1 Интелигентни технолошки системи – дефиниција, структура и значај

Интеллигентни технолошки системи (ИТС – српски акроним), као значајна област науке и образовања у оквиру производног машинства, успоставља се крајем 20. века, а потпуну афирмацију реализује у првим декадама 21. века. Пионирске активности остварене су у САД, почевши од прве објављене књиге професора *Andrew Kusiak*-а [98], који дефинише структуру и функције интелигентних технолошких система базираних на знању и оптимизацији, обухватајући пројектовање производа и технолошких процеса, пројектовање диспозиционог плана распореда CNC машина алатки, аутоматизованих система и индустријских робота (енгл. *layout design*) у оквиру групне технологије, као и планирање и терминирање технолошких ресурса. Данас, ова напредна област технике и производних технологија остварује индустријску верификацију кроз развој и примену концепта *Индустрија 4.0* [76],[108], насталог у Немачкој 2011. године, што је детаљно анализирано у објављеном прегледном раду престижног научног часописа [218].

Овај уџбеник, као први у Србији који третира развој и примену ИТС код нас, обухвата тридесетогодишње искуство аутора у овој области [109],[131], посебно ослањајући се на заједничка достигнућа са коаутором [163],[168], остварена током последњих десет година рада како у активностима научно-истраживачких пројеката, тако и током образовног процеса и рада са бројним студентима на обавезним предметима мастер академских студија Катедре за производно машинство под називом

Интелигентни технолошки системи, Индустриски роботи и Методе одлучивања, а од 2020. године и на новоуспостављеном Студијском програму мастер академских студија Индустрија 4.0, у оквиру обавезних предмета Роботика и вештачка интелигенција, Машинско учење интелигентних роботских система и изборног предмета Терминирање технолошких система и процеса.

У овом уџбенику, поред детаљно обрађених наставних целина за набројане предмете, дате су одговарајуће корисне дискусије аутора у домену производно оријентисаних напредних технологија, роботике и вештачке интелигенције, као и биолошки инспирисаних алгоритама вишекритеријумске оптимизације [132]. У наставку, дају се полазне основе ове мултидисциплинарне области, од дефиниције до структуре и значаја ИТС.

1.1.1 Дефиниција ИТС

„Интелигентни технолошки систем¹ (ИТС) је највиша класа флексибилних технолошких система која је остварила синергију вештачке интелигенције и компјутерски интегрисаних технологија, са циљем да систем има могућност реализације активности у неодређеном технолошком окружењу, уз перманентан пораст вероватноће успешног понашања“.

Напомене:

- Основа за реализацију свих парцијалних циљева ИТС се налази у компјутерској „снази“ система;
- Основу пројектовања и реализације ИТС чине комплексни алгоритми (нпр. машинског учења, оптимизације) које систем користи за процесирање сензорских улазних информација, уз подршку софистицираних компонената система (агената);
- Информације и величине (стања система) од пресудног значаја, ИТС мора да „чува“ (меморише) због успешности будућих одлука при остваривању интелигентног понашања агената.

¹ Од самог почетка, када је **P.Owen** у свом раду „*Observation on the Effects of the Manufacturing System* (1815. године)“ увео појам технолошког система, па до почетка осамдесетих година 20. века када је **Dr. Hatvany** промовисао идеју о ИТС публиковану у раду „*Advanced Manufacturing Systems in Modern Society* (1982. године)“, прошло је више индустријских револуција и скоковитих успона у научном и стручном развоју производног инжењерства.

1.1.2 Структура ИТС

Дакле, *вештачка интелигенција* (енгл. *Artificial Intelligence* – AI) [110],[119] је, у првој фази развоја интелигентних технолошких система, коришћена преко инжењерства знања (експертни системи), док је данашњи развој ИТС оријентисан на адаптивно процесирање информација коме превасходно припадају вештачке неуронске мреже. Од осталих интелигентних формализованих методологија одређену заступљеност, посебно у **хибридним интелигентним технолошким системима** имају фази системи (енгл. *fuzzy systems*) и генетички алгоритми, који су готово увек у спрези са вештачким неуронским мрежама.

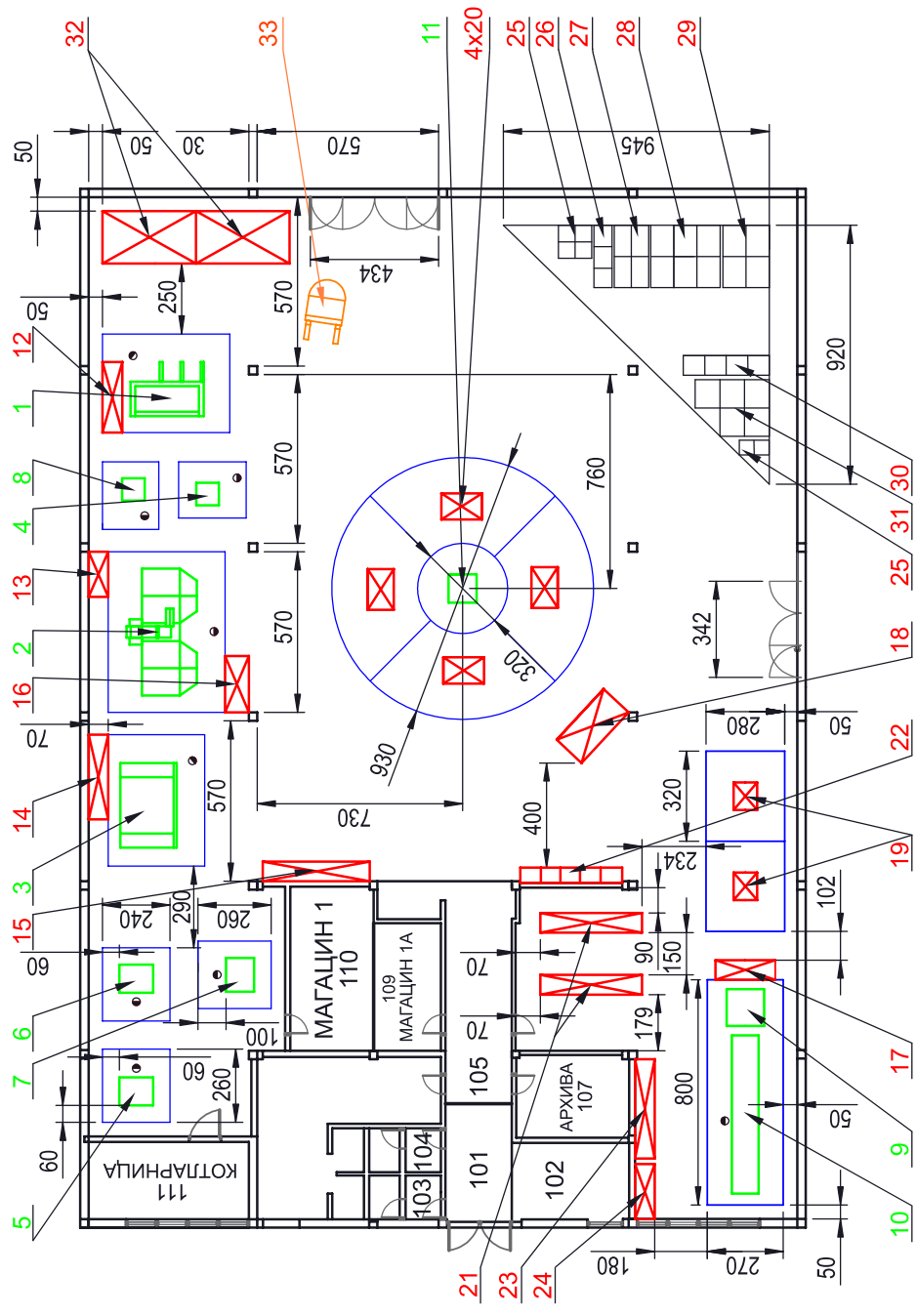
Друга кључна синергијска компонента ИТС је скуп *компјутерски интегрисаних технологија* (КИТ – српски акроним, енгл. *Computer Integrated Manufacturing* – CIM) [9], који чине елементи: компјутерски подржано пројектовање (енгл. *Computer Aided Design* – CAD), компјутерски подржана производња (енгл. *Computer Aided Manufacturing* – CAM), компјутерски подржано пројектовање технолошких процеса (енгл. *Computer Aided Process Planning* – CAPP) и флексибилни технолошки систем (енгл. *Flexible Manufacturing System* – FMS). Флексибилни технолошки систем (ФТС – српски акроним) чине: машине алатке (МА), индустријски роботи (ИР – стационарни и мобилни) и компјутери – К (уз МА и ИР, као и надређени у оквиру управљања ИТС преко комуникационо-информационе мрежне структуре).

Ако се синергијски спрегну сви ови елементи са вештачком интелигенцијом, онда коначни логичко-структурни израз за ИТС гласи [105],[106],[107]:

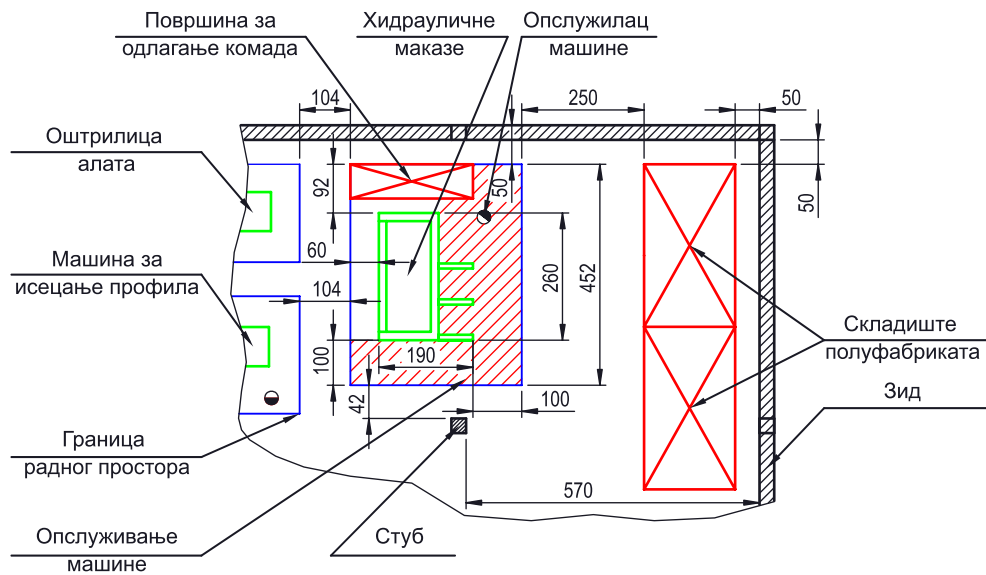
$$\text{ИТС}(\text{AI} \wedge \text{CIM}(\text{CAD} \wedge \text{CAM} \wedge \text{CAPP} \wedge \text{FTS}(\text{МА} \wedge \text{ИР} \wedge \text{К})))$$

Ова структура је истовремено и хијерархијска, а обухвата вертикалну и хоризонталну аутоматизацију технолошког система. Вертикална аутоматизација користи информационе садржаје ослоњене у великој мери на AI, док хоризонтална аутоматизација повезује елементе система у веће компоненте CIM.

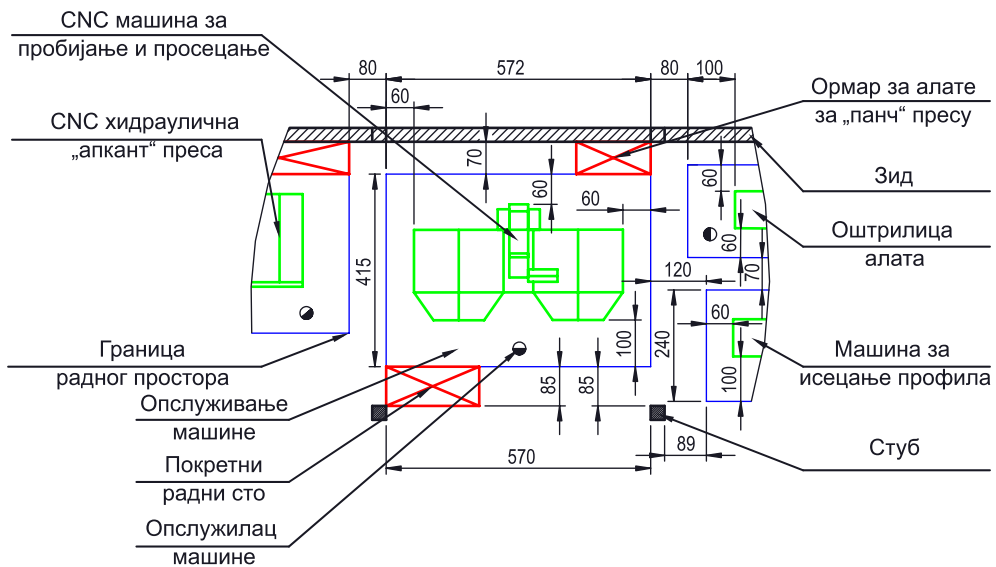
Интелигентни роботи као интегративни део CIM система, односно ИТС [110],[119], већ су достигли такав ниво развоја да се могу имплементирати у аутоматизоване (дигиталне) фабрике. Неопходно је, у следећем кораку увођења и примене у оквиру ИТС, извршити потпуну хардверско-софтверску интеграцију ових интелигентних агената.



Слика 1.8: Layout производно-монтажног технолошког система предузећа „Монтпроект“



Слика 1.9: Диспозиција маказа за сечење



Слика 1.10: Диспозиција CNC машине алатке за просецање и пробијање

2

2 ИНДУСТРИЈСКИ МОБИЛНИ РОБОТИ

2.1 Мобилни роботи – класификација, специфичности и значај

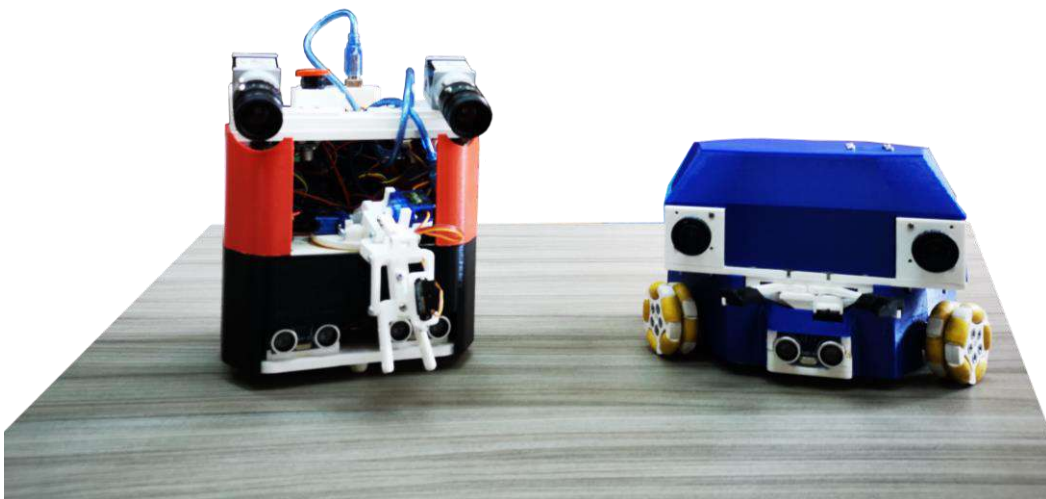
Индустријски мобилни роботи су започели свој развој у 20. веку, почевши од аутоматски вођених робоколица (АВР – српски акроним), да би се развојем и применом техника вештачке интелигенције, данас дошло и до нивоа лабораторијског тестирања интелигентног понашања одговарајуће већ утврђене аутономности током експлоатације, што ће бити детаљно представљено сопственим резултатима у овом уџбенику. Тежиште овог уџбеника је оријентисано на интелигентне мобилне роботе са израженим својством аутономности, попут сада већ архетипског примера успешно реализованог аутономног мобилног робота [101],[196] приказаног у специфичном окружењу и условима рада, познатог имена **Opportunity**, под службеним називом **MER-B (Mars Exploration Rover – B)** или **MER-1**, односно надимком „**Опру**“, послатог на планету Марс 2004. године са оперативним „задужењима“ све до 2018. године (слика 2.1).



Слика 2.1: Архетипски пример мобилног робота – *Opportunity* [221]

3. У сваком тренутку **мобилни робот може да самостално дефинише путању кретања и спроведе планирано кретање**, у складу са датим технолошким задатком;
4. **Итеративно понављање** поменутих способности се подразумева, посебно код *емпиријског управљања*, што ће бити детаљно разматрано у поглављу 5.

У том смислу, на Катедри за производно машинство Машинског факултета Универзитета у Београду, кроз активности *Лабораторије за индустријску роботiku и вештачку интелигенцију*, развијена су два лабораторијска прототипа *интелигентних мобилних робота*, са циљем да им се аутономност перманентно уздиже, и то на бази развоја поменутих способности, посебно когнитивности [40],[164]. То су интелигентни мобилни роботи названи од милоште **Рајко** (RAICO – Robot with Artificial Intelligence based COgnition) и **DOMINO** (Deep learning based Omnidirectional Mobile robot with INtelligent cOntrol), са стерео визуелним интелигентним управљањем, а приказани су на слици 2.5.



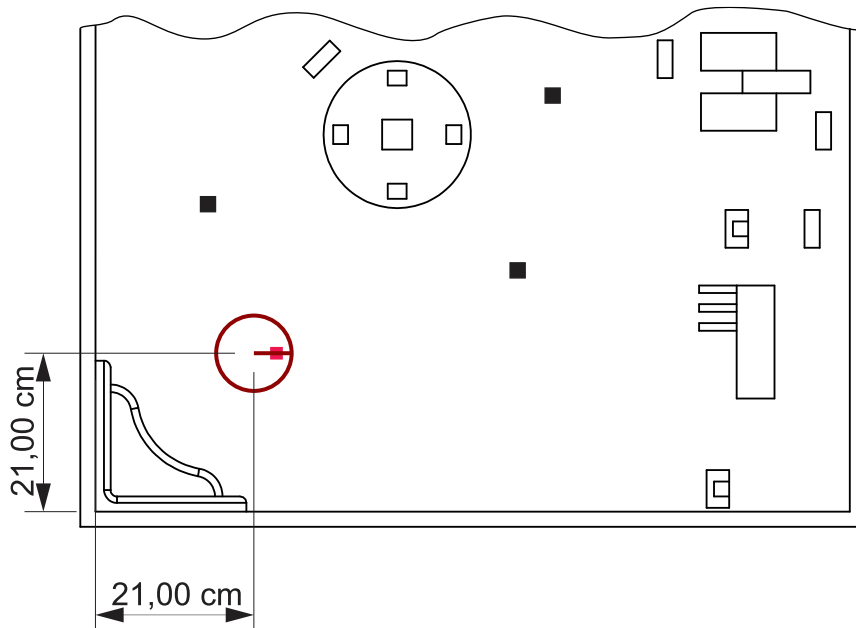
Слика 2.5: Робот *Рајко* (RAICO – Robot with Artificial Intelligence based COgnition), лево и робот *DOMINO* (Deep learning based Omnidirectional Mobile robot with INtelligent cOntrol), десно

приликом мерења, употребом сензора. Да би на основу ове претпоставке алгоритам, а тиме и мобилни робот, успешно функционисао у реалним условима, мапа окружења мора да буде *апсолутно тачна* и *поуздана*. С друге стране, сваки објекат посредством вектора идентификације мора да буде адекватно представљен, без обзира да ли се ради о боји, висини или некој другој карактеристичној особини објекта.

Претходна претпоставка, која је са успехом имплементирана у алгоритам, може да представља основу на којој би сам алгоритам био уопштен и више прилагођен реалним ситуацијама. Наиме, у општем случају апсолутно препознавање објекта не мора да буде тачно (и није), с обзиром на то да се и ова целокупна научна област развијала и развија управо због проблема са поверењем у сензорске информације и акције актуатора. Једно од уопштења основног алгоритма Линеаризованог Калмановог филтера базира се на претпоставци да је вектор идентификације објекта једнак вектору идентификације оног објекта који има највише шанси да буде примећен у датом делу окружења. Резултат ове претпоставке је имплементација додатне петље у већ постојећу петљу, а све у циљу адекватне идентификације објектата. Као што се из анализе и дискусије може видети, процес *корекције* самог Калмановог филтера и свих његових верзија, укључујући и линеаризовани облик филтера – ЛКФ, и даље траје.

2.6.3 Пример примене Линеаризованог Калмановог филтера

Како би се представила практична примена алгоритма Линеаризованог Калмановог филтера, приказан је следећи пример. Почетни положај мобилног робота који се креће у равни је представљен вектором стања μ_0 , док је матрицом коваријанси Σ_0 представљена несигурност робота у свој тренутни положај. Оцена промене стања мобилног робота се врши применом модела кретања на основу пређеног пута, где су управљачке величине пређени пут десног и левог точка. Растојање између точка мобилног робота је дефинисан променљивом b , док се са R дефинише полупречник точка. Мобилни робот је постављен у лабораторијски модел технолошког окружења (слика 2.13) где су три карактеристична објекта постављена на подлогу окружења. Координате x и y карактеристичних објектата су унапред познате и приказане у оквиру матрице \mathbf{m} . Мобилни робот може помоћу оптичког сензора (приказан црвеним квадратом на слици 2.13) детектовати карактеристичне објекте, уколико се у току кретања сензор нађе изнад карактеристичног објекта. Шум мерења је емпиријски одређен и представљен матрицом \mathbf{Q} .



Слика 2.13: Почетни положај мобилног робота у окружењу

Напомена: Све дужинске мере су представљене у сантиметрима.

$$\mu_0 = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 21 \\ 21 \\ 0 \end{bmatrix}; \Sigma_0 = \begin{bmatrix} 0,1 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1 & 0 \\ 0 & 0 & 0,1 \end{bmatrix}; b = 10; R = 2,5;$$

$$Q = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 100 \end{bmatrix}; m = \begin{bmatrix} 59 & 15 & 60 \\ 36 & 40 & 55 \end{bmatrix}$$

Потребно је на основу познатих углова ротације вратила (φ_d и φ_l), које се одређују на основу вредности очитаних са енкодера, за четири инкремента кретања извршити предикцију положаја мобилног робота и матрице коваријанси.

$$\varphi_d = [278 \quad 272 \quad 93 \quad 270]; \varphi_l = [274 \quad 270 \quad -91 \quad 266]$$

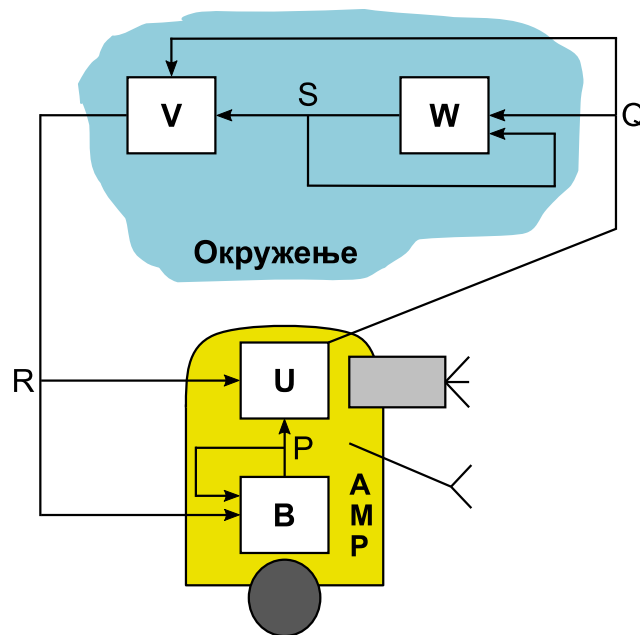
Такође, након четвртог инкремента кретања потребно је извршити корак корекције Калмановог филтера.

Вредности очитане са енкодера након првог инкремента кретања (транслације) су:

$$\varphi_{d1} = 278^\circ; \varphi_{l1} = 274^\circ$$

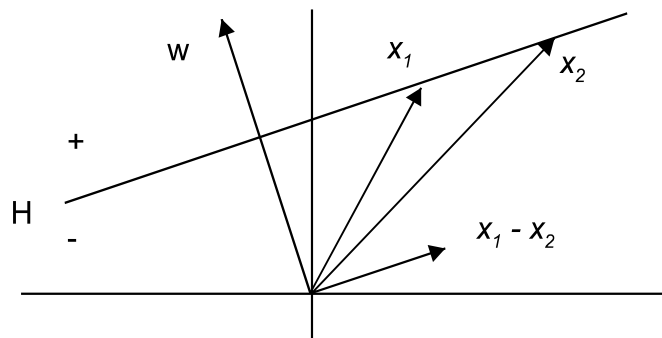
скуп стања окружења, Q улаз у окружење који представља резултат акција које АМР обавља у окружењу, тј. резултат излаза из АМР-а, R је излаз из окружења који утиче на понашање АМР, W представља функцију прелаза стања окружења која на основу тренутног улаза и тренутног стања окружења дефинише његово наредно стање ($W: Q \times S \rightarrow S$), а V је функција излаза окружења која на основу тренутног стања и тренутног улаза дефинише излаз из окружења ($V: Q \times S \rightarrow R$).

На сличан начин АМР се може дефинисати као петорка $\langle P, R, Q, B, U \rangle$ где је P скуп унутрашњих стања АМР-а, R улаз у АМР (излаз из окружења), Q излаз из АМР (улаз у окружење), а B ($B: R \times P \rightarrow P$) и U ($U: R \times P \rightarrow Q$) представљају функцију прелаза стања и функцију излаза АМР-а, респективно. Процес интеракције АМР-а са окружењем приказан је на слици 3.5. Окружење је у интерном стању (S), које утиче на понашање (B) АМР-а помоћу улаза R , а резултира акцијом АМР-а кроз одговарајући излаз. Тај излаз са старим стањем окружења трансформише окружење у ново стање помоћу функције прелаза W , што значи да овај интелигентни систем на тај начин учи.



Слика 3.5: Интеракција АМР-а са окружењем

Аутономни мобилни робот је архетипски пример интелигентног агента (роботског система) и као што је показано он организује сопствену интерну структуру у циљу адекватног остварења циљева у



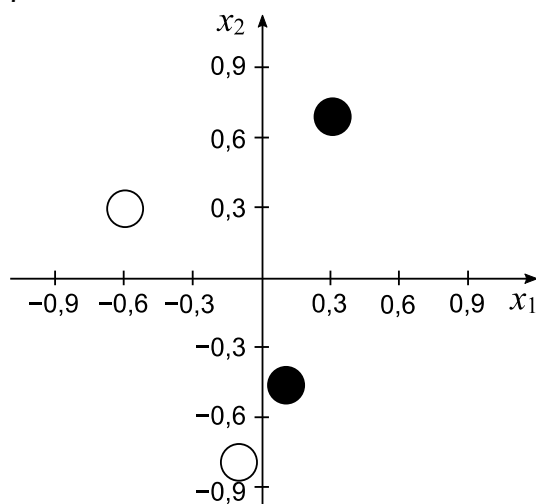
Слика 3.15: Пример раздвајања дводимензионалног простора

Перцептрон, као линеарни сепаратор, има велика ограничења у погледу нелинеарних пресликавања. То значи да је проблем његове примене везан за нелинеарно раздвајање класа, јер он користи *бинарну активациону функцију*, која условљава да неуронска мрежа има дисконтинуитете.

3.4.2 Перцептрон – решени пример

Применом алгоритма учења перцептрона, потребно је извршити класификацију следећих података:

$\mathbf{s}_1 = [0,3 \ 0,7]^T$, $o_1 = 1$; $\mathbf{s}_2 = [-0,6 \ 0,3]^T$, $o_2 = 0$; $\mathbf{s}_3 = [-0,1 \ -0,8]^T$, $o_3 = 0$; $\mathbf{s}_4 = [0,1 \ -0,45]^T$, $o_4 = 1$, слика 3.16. Вектор тежинских коефицијената при иницијализацији је $\mathbf{w} = [0,8 \ -0,5]$. Активациона функција је бинарна. Параметар учења је $\eta = 0,5$.



Слика 3.16: Визуелни приказ обучавајућих парова

Поставка задатка:

Нека ART-1 неуронска мрежа има 7 неурона у F_1 нивоу и иницијално постоји само једна могућа класа (1 неурон у F_2 нивоу). Параметар сличности је $\rho = 0,7$, а улазни вектори су следећи:

$$I_1 = [1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1],$$

$$I_2 = [0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0],$$

$$I_3 = [1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0],$$

$$I_4 = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0],$$

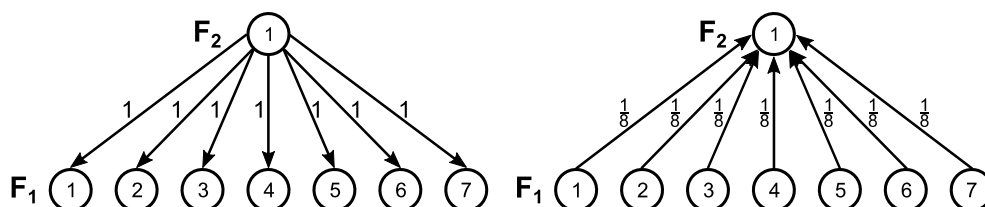
$$I_5 = [1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0].$$

Решење задатка:

Процес обучавања се одвија сходно процедури представљеној Алгоритмом 3.4.

Иницијализују се тежински односи одозго надоле (**Корак 1**): $z_{i,j}(0) = 1$, слика 3.26 а).

Иницијализују се тежински односи одоздо нагоре (**Корак 2**): $z_{j,i}(0) = \frac{1}{n+1} = \frac{1}{8}$, слика 3.26 б).



Слика 3.26: Иницијална архитектура вештачке неуронске мреже

Представља се **први** улазни облик узорка за учење $I_1 = [1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]$ (**Корак 3**), и израчунава се активација неурона у F_2 нивоу (**Корак 4**):

$$T_1 = \frac{1}{8} \cdot 1 + \frac{1}{8} \cdot 1 + \frac{1}{8} \cdot 0 + \frac{1}{8} \cdot 0 + \frac{1}{8} \cdot 0 + \frac{1}{8} \cdot 0 + \frac{1}{8} \cdot 1 = \frac{3}{8}$$

7

7 БИОЛОШКИ ИНСПИРИСАНИ АЛГОРИТМИ ОПТИМИЗАЦИЈЕ

7.1 Метакхеуристички алгоритми оптимизације – основни појмови и класификације

Метакхеуристички алгоритми оптимизације су постали врло популарни у научно-истраживачкој заједници током последње две деценије. Поред великог броја теоријских радова, ове технике оптимизације остварују и успешне практичне примене у разним областима и дисциплинама [66],[163],[167],[168]. Природно се намеће и поставља питање зашто су метакхеуристичке методе постале толико заступљене. Одговор на ово питање се може сажети у четири главна разлога [139]:

- једноставност,
- флексибилност,
- механизми деловања нису засновани на изводима,
- могућност избегавања локалних оптимума.

Метакхеуристички алгоритми су углавном инспирисани врло једноставним концептима. Инспирације су обично повезане са физичким феноменима, понашањем јединки у природи или еволуционим концептима. Једноставност у приступу и моделирању омогућава корисницима да симулирају различите природне концепте, унапређују тренутне алгоритме, предлажу нове метакхеуристике, или пак хибридују постојеће методе да би користећи њихове најбоље индивидуалне карактеристике остварили боље перформансе добијених решења [140].

Са друге стране, флексибилност се односи на брзу и лаку применљивост метахеуристичких алгоритама на различите проблеме, без потребе за значајним променама у структури самог алгорита. Метахеуристика је стога применљива на различите оптимизационе проблеме имајући у виду да су само улазни и излазни подаци система важни за процес оптимизације. Дакле, све што пројектант треба да зна је како да представи (кодира) свој проблем за одабрани метахеуристички алгоритам.

Већина метахеуристичких алгоритама нема механизме засноване на изводима. За разлику од традиционалних оптимизационих приступа који се базирају на градијентним поступцима, метахеуристички алгоритми припадају групи метода стохастичке оптимизације. То, дакле, значи да процес оптимизације започиње случајно иницијализованим решењима и да нема потребе за израчунавањем извода да би се пронашло оптимално решење. Ова карактеристика чини метахеуристичке алгоритме изузетно погодним за имплементацију на реалне комбинаторно-оптимизационе инжењерске проблеме, код којих не постоји могућност одређивања извода ради извршавања оптимизације.

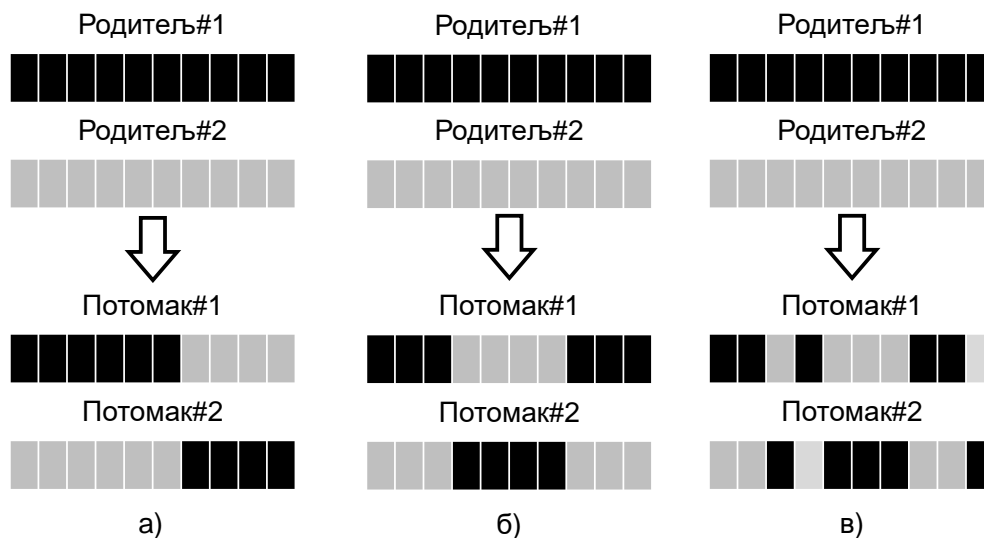
Коначно, у поређењу са традиционалним техникама оптимизације које су детерминистичке природе (градијентни метод, Њутнов метод, метод коњугованих градијената итд.) [211], метахеуристичке методе поседују супериорне способности да избегну „заробљавање“ алгорита у локалном оптимуму. Стохастичка природа ових алгоритама омогућава им да избегну стагнацију у локално оптималним решењима, као и опсежно претраживање читавог простора могућих решења. Простор за претрагу могућих решења реалних инжењерских проблема обично је непознат и врло сложен, са огромним бројем локалних оптимума, тако да су метахеуристички алгоритми добар избор у оптимизацији оваквих проблема.

Генерално говорећи, метахеуристички алгоритми оптимизације могу се класификовати у две главне групе:

1. Алгоритми базирани на јединственим решењима (енгл. *single-solution algorithms*);
2. Алгоритми базирани на свим решењима у популацији (енгл. *population-based algorithms*).

Алгоритми базирани на јединственим решењима, попут алгорита симулираног жарења (енгл. *Simulated Annealing – SA*), табу претраге (енгл. *Tabu Search – TS*) и претраге променљивих суседства (енгл. *Variable Neighborhood Search*), примењују се у циљу модификације само једног случајно генерисаног иницијалног решења. Са друге стране, алгоритми

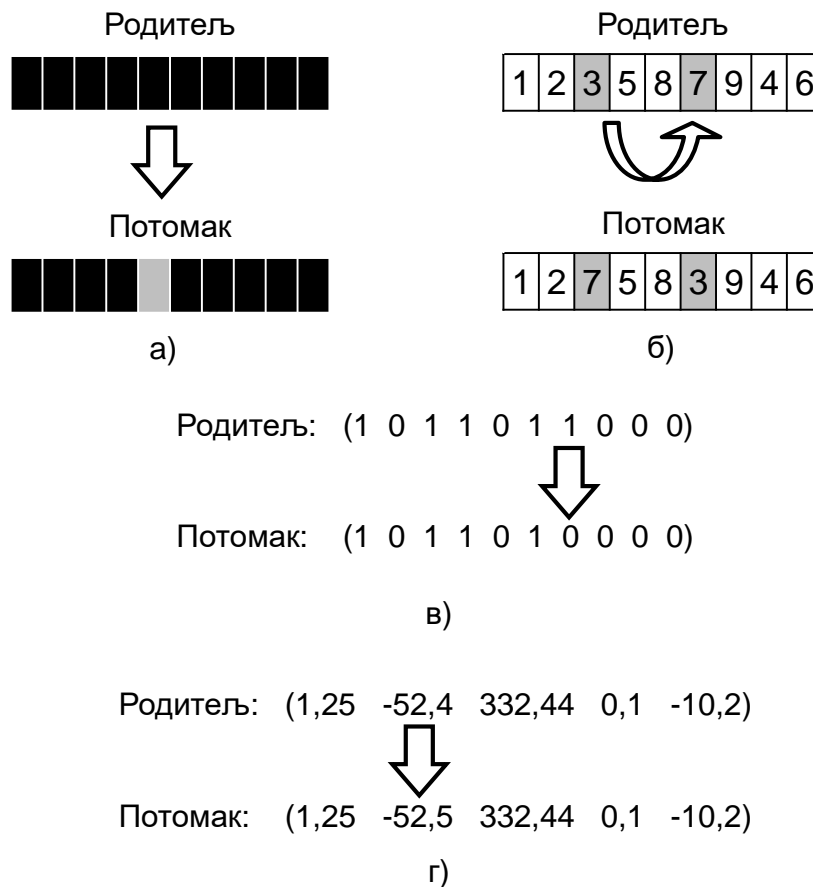
а тамо где је 0 у маски, ген се копира од родитеља 1). За пример приказан на слици 7.2 в) бинарна маска има вредности 1 1 0 1 0 0 0 1 1 0.



Слика 7.2: Оператор укрштања а) једнопозиционо укрштање, б) двопозиционо укрштање, в) униформно укрштање

7.2.5 Оператор мутације

Након примене оператора укрштања, а у складу са дефинисаном вероватноћом мутације p_m , неке јединке су случајно одабране за мутацију (енгл. *mutation*). На основу случајно генерисане позиције мутације, на сваки од одабраних хромозома – родитеља примењен је оператор мутације, а као резултат су добијени потомци са мутираним геном. Примери различитих оператора мутације приказани су на слици 7.3, и то општи пример једнопозиционе мутације (слика 7.3 а), двопозициона мутација замене два гена (слика 7.3 б), мутација бинарно кодираних стрингова хромозома (слика 7.3 в), мутација стрингова хромозома кодираних реалним бројевима (слика 7.3 г).



Слика 7.3: Оператор мутације а) мутација једног гена, б) мутација – замена два гена, в) мутација бинарно кодираних стрингова, г) мутација стрингова кодираних реалним бројевима

У циљу обезбеђивања конвергенције генетичког алгорита ка оптималном решењу, одређени проценат најбољих јединки у тренутној генерацији се селекује и без измене преноси у наредну генерацију. Овај процес чувања најбољег решења у тренутној генерацији назива се елитизам, а јединке са најбољом функцијом циља називају се елитне (енгл. *elite chromosomes*). На елитне јединке се, дакле, не примењују оператори укрштања и мутације.

Претходно наведени кораци се понављају жељени број генерација. Број генерација M је дефинисан при иницијализацији параметара генетичког алгорита.

8

8 ФЛЕКСИБИЛНИ ТЕХНОЛОШКИ ПРОЦЕСИ

8.1 Пројектовање и оптимизација флексибилних технолошких процеса

Компјутерски подржано пројектовање технолошких процеса – CAPP (енгл. *Computer Added Process Planning*) је настало крајем деведесетих година 20. века са циљем да споји и интегрише Компјутерски подржано пројектовање – CAD (енгл. *Computer-Aided Design*) и Компјутерски подржану производњу – CAM (енгл. *Computer-Aided Manufacturing*). Овај систем има за циљ да одреди детаљне методе којима се делови или склопови (у случају монтаже) могу произвести економично и конкурентно, од иницијалне фазе (радионички цртеж готовог дела), преко међуфаза (сиров материјал, припремак, обрадак), до завршне фазе (жељени облик готовог дела). Улази за пројектовање технолошког процеса су пројектни подаци, подаци о сировом материјалу, подаци о обрадним системима (подаци о машинама алаткама, алатима, стезним приборима), подаци о захтевима квалитета и подаци о типу производње (појединачна, малосеријска, великосеријска, масовна). Излаз из поменутог система је технолошки процес којим се дефинише редослед одвијања свих активности (операција) потребних да се од полазног материјала (сировине или полуфабриката) обликује готов део (производ) [160].

Увођење појма флексибилности у домен пројектовања технолошких процеса произилази из потребе да се одговори све већим захтевима тржишта и прилагоди све чешћим променама у технолошким окружењима. Такође, потврђено је да се увођењем флексибилности, кроз алтернативне начине обраде делова, могу остварити боља решења у погледу оптималних флексибилних технолошких процеса. Најчешће примењивани типови флексибилности технолошких процеса су: (i) флексибилност машина алатки (енгл. *machine flexibility*), (ii) флексибилност

алата (енгл. *tool flexibility*), (iii) флексибилност оријентација алата (енгл. *Tool Access Direction – TAD flexibility*), (iv) флексибилност процеса (енгл. *process flexibility*) и (v) флексибилност редоследа операција (енгл. *sequencing flexibility*).

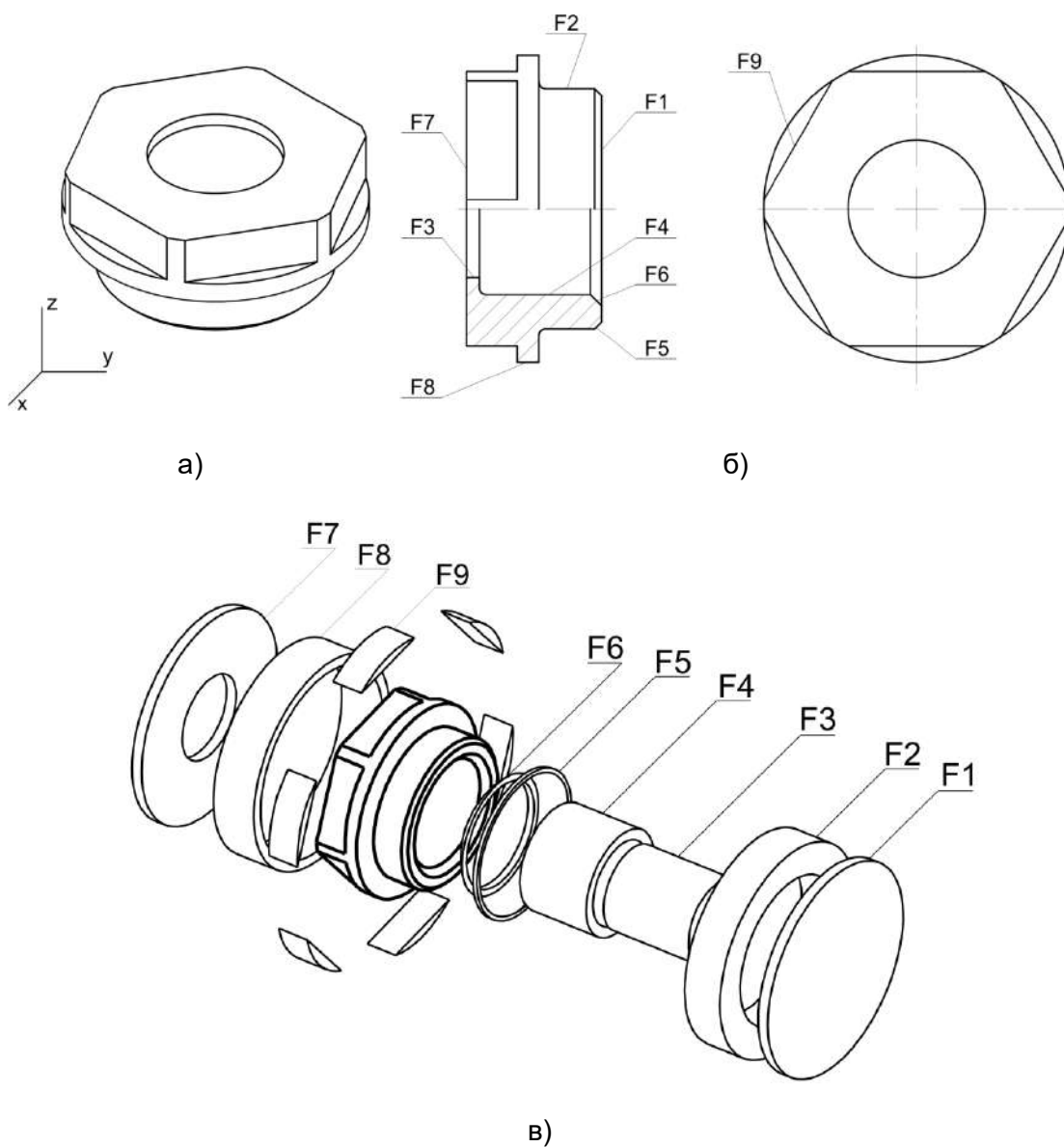
- Флексибилност машина алатки подразумева могућност извођења једне операције на више алтернативних машина алатки, при чему су време трајања операције и трошкови за сваку од машина различити;
- Флексибилност алата обезбеђује могућност извођења исте операције коришћењем различитих алтернативних алата;
- Флексибилност оријентације алата подразумева могућност извођења исте операције коришћењем различитих алтернативних оријентација алата;
- Флексибилност процеса се односи на могућност обраде истог дела на различите начине, користећи технолошке процесе са алтернативним операцијама и/или алтернативним редоследом операција;
- Флексибилност редоследа операција представља могућност измене редоследа операција при оптимизацији технолошких процеса, уз остваривање захтеваног квалитета обраде (тачности обраде и квалитета обрађене површине).

Разматрање поменутих типова флексибилности је од значаја за остваривање бољих перформанси технолошких система (на пример побољшања у смислу смањења производног времена и трошкова производње), као и побољшања у погледу њихове ефикасности и ефективности. У циљу додатног појашњења претходно поменутих типова флексибилности, предложен је репрезентативан реалан део приказан на слици 8.1 [160]. Репрезентативни део састоји се од девет технолошких форми (енгл. *features*) које се могу добити коришћењем 25 операција²⁰. Техничке карактеристике дела, које укључују класе толеранције, класе храпавости са одговарајућим вредностима параметра храпавости R_a (средње аритметичко одстојање профила), алтернативне операције, алтернативне машине алатке, алате и оријентације алата приказане су у табели 8.1.

Свака технолошка форма репрезентативног дела може бити добијена применом две или три операције, где се свака од операција може изводити на алтернативним машинама алаткама (што представља флексибилност машина алатки), коришћењем алтернативних алата (што

²⁰ Напомена: свака технолошка операција везана је за алтернативну машину алатку. Уколико се нека операција састоји од више захвата, или више пролаза у оквиру једног захвата, време трајања операције је једнако збиру главних времена обраде за сваки од захвата.

се односи на флексибилност алата), као и оријентација алата (флексибилност оријентација алата).



Слика 8.1: Пример репрезентативног дела са девет технолошких форми
а) 3D модел дела, б) и в) технолошке форме

На пример, технолошка форма F1 може бити добијена операцијом 1, на алтернативним машинама M1, M2, или M3, коришћењем алтернативних алата T1 или T2, и оријентацијом алата у смеру +z.

11

11 ЛИТЕРАТУРА

- [1] Alatas, B. (2011). ACROA: Artificial Chemical Reaction Optimization Algorithm for global optimization. *Expert Systems with Applications*, 38(10), 13170–13180.
- [2] Albus, J. S. (1991). Outline for a theory of intelligence. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 21(3), 473–509.
- [3] Aleksander, I., & Morton, H. (1990). *An Introduction to Neural Computing*. Chapman and Hall.
- [4] Anderson, D. Z. (1988). *Neural Information Processing Systems*. American Institute of Physics.
- [5] Åström, K. J., & Wittenmark, B. (1989). *Adaptive Control*. Addison-Wesley Publishing Company.
- [6] Atashpaz-Gargari, E., & Lucas, C. (2007). Imperialist competitive algorithm: An algorithm for optimization inspired by imperialistic competition. *In 2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2007*, 4661–4667.
- [7] Babic, B. (1999). Axiomatic design of flexible manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 37(5), 1159–1173.
- [8] Babic, B. (1996). Towards an intelligent system for FMS design. *International Conference on Information Technology for Balanced Automation Systems*, 349–356.
- [9] Babić, B. (2017). *Računarski integrisani sistemi i tehnologije*. Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet.
- [10] Babić, B. (1999). *Projektovanje tehnoloških procesa*. Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet.

- [11] Babić, B., Miljković, Z., Vuković, N., & Antić, V. (2012). Towards implementation and autonomous navigation of an intelligent automated guided vehicle in material handling systems. *Iranian Journal of Science and Technology Transaction B: Engineering*, 36(1), 25–40.
- [12] Babic, B., Nestic, N., & Miljkovic, Z. (2008). A review of automated feature recognition with rule-based pattern recognition. *Computers in Industry*, 59(4), 321–337.
- [13] Babić, B. R., Nešić, N., & Miljković, Z. (2011). Automatic feature recognition using artificial neural networks to integrate design and manufacturing: Review of automatic feature recognition systems. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing: AI EDAM*, 25(3), 289.
- [14] Ballard, D. H., & Brown, C. M. (1982). *Computer vision*. Prentice Hall, Inc.
- [15] Basturk, B. (2006). An artificial bee colony (ABC) algorithm for numeric function optimization. *IEEE Swarm Intelligence Symposium*.
- [16] Bateux, Q., Marchand, E., Leitner, J., & Chaumette, F. (2018). Training Deep Neural Networks for Visual Servoing. *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 1–8.
- [17] Beer, R. D., Chiel, H. J., & Sterling, L. S. (1991). An artificial insect. *American Scientist*, 79(5), 444–452.
- [18] Beer, R. D., Ritzmann, R. E., & McKenna, T. M. (1993). *Biological neural networks in invertebrate neuroethology and robotics*. Academic Press.
- [19] Besl, P. J., & Jain, R. C. (1985). Three-dimensional object recognition. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 17(1), 75–145.
- [20] Bojković, Z. S. (1989). *Digitalna obrada slike*. Naučna knjiga.
- [21] Bradley, D. A., Dawson, D., Burd, N. C., & Loader, A. J. (1991). *Mechatronics – Electronics in Products and Processes*. Chapman and Hall.
- [22] Brooks, R. A. (1992). Artificial life and real robots. *Proceedings of the First European Conference on Artificial Life*, 3–10.
- [23] Brooks, R. A. (1986). A Robust Layered Control System For A Mobile Robot. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 2(1), 14–23.
- [24] Brooks, R. A. (1991). New Approaches to Robotics. *Science*, 253(5025), 1227–1232.
- [25] Brooks, R. A., Flynn, A. M., & Marill, T. (1987). *Self Calibration of Motion and Stereo Vision for Mobile Robot Navigation*.

- [26] Brown, R. A. (1994). *Machines That Learn*. Oxford University Press.
- [27] Carpenter, G. A., & Grossberg, S. (1990). ART 3: Hierarchical search using chemical transmitters in self-organizing pattern recognition architectures. *Neural Networks*, 3(2), 129–152.
- [28] Cavalieri, S., Martini, M., Petrone, F., & Sinatra, R. (1995). 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*, 3, 1684–1689.
- [29] Chen, B., & Hoberock, L. L. (1996). Machine vision recognition of fuzzy objects using a new fuzzy neural network. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2, 1596–1601.
- [30] Chen, S. Y. (2012). Kalman filter for robot vision: A survey. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(11), 4409–4420.
- [31] Cho, H. S., & Leu, M. C. (1998). Artificial Neural Networks in Manufacturing Processes: Monitoring and Control. *Proceedings of the 9th Symposium on Information Control in Manufacturing*, 31(15), 529–537.
- [32] Chou, J. C. K., & Kamel, M. (1991). Finding the Position and Orientation of a Sensor on a Robot Manipulator Using Quaternions. *The International Journal of Robotics Research*, 10(3), 240–254.
- [33] Corke, P. (1996). *Visual Control of Robots: High-Performance Visual Servoing*. Taunton, UK: Research Studies Press.
- [34] Corke, P. I. (1993). Visual Control of Robot Manipulators - a review. In *Visual Servoing: Real-Time Control of Robot Manipulators Based on Visual Sensory Feedback* (pp. 1–31).
- [35] Dagli, C. H. (1994). *Artificial Neural Networks for Intelligent Manufacturing*. Chapman & Hall.
- [36] Dagli, C. H. (1993). Artificial Neural Networks in Intelligent Manufacturing. In *Production Research 1993* (V.Orpana and A.Lukka, pp.127–134). Elsevier Science Publishers.
- [37] Davies, E. R. (1996). Design of Fast Vision Algorithms for Mechatronic Applications. *Third International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice*, 1, 1.309-1.314.
- [38] Diryag, A., Mitić, M., & Miljković, Z. (2014). Neural networks for prediction of robot failures. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 228(8), 1444–1458.
- [39] Đokić, L. (2019). *Stereo vizuelno upravljanje inteligentnog mobilnog*

robota u funkciji detekcije udaljenosti karakterističnih objekata u okviru scene. Master rad, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet.

- [40] Đokić, L., Jokić, A., Petrović, M., & Miljković, Z. (2019). Stereo vision-based algorithm for control of nonholonomic mobile robot. *The Third International Students' Scientific Conference "Multidisciplinary Approach to Contemporary Research - Cultural and Industrial Heritage,"* 69–82.
- [41] Donald, B. R. (1987). Error Detection and Recovery in Robotics. In *Lecture Notes in Computer Science* (Vol. 336). Springer-Verlag.
- [42] Dorigo, M. (1992). *Optimization, learning and natural algorithms.* PhD Thesis, Politecnico di Milano.
- [43] Dorigo, M., Birattari, M., & Thomas, S. (2006). Ant Colony Optimization. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 1(4), 28–39.
- [44] Dorigo, M., Maniezzo, V., & Colomi, A. (1996). The Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part B (Cybernetics)*, 26(1), 29–41.
- [45] Dougherty, E., & Giardina, C. (1988). *Mathematical Methods for Artificial Intelligence and Autonomous Systems.* Prentice-Hall, Inc.
- [46] Dubois, D., & Prade, H. (1988). An Approach to Computerised Processing of Uncertainty. In *Possibility theory.* Plenum Press.
- [47] Duda, R. O., & Hart, P. E. (1973). *Pattern Classification and Scene Analysis.* John Wiley & Sons, Inc.
- [48] El Wakil, S. D. (1989). *Processes and Design for Manufacturing.* Prentice Hall International, Inc.
- [49] Eric, D. K., Erdman, M. F., & Berge, R. (1992). *Nanosystems: molecular machinery, manufacturing, and computation.* New York: John Wiley & Sons.
- [50] Fessel, C., Probst, R., & Kopacek, P. (1998). A Low Cost Vision System for Robot Manipulation. *Proceedings of the 29th International Symposium on Robotics.*
- [51] Feynman, R. (1960). There's plenty of room at the bottom. *Engineering and Science*, 23(5), 22–36.
- [52] Formato, R. A. (2007). Central force optimization: A new metaheuristic with applications in applied electromagnetics. *Progress in Electromagnetics Research*, 77, 425–491.
- [53] Freeman, J. A., & Skapura, D. M. (1991). Algorithms, Applications, and Programming Techniques. In *Neural Networks.* Addison-Wesley Publ. Co.

- [54] Fukuda, T., & Kubota, N. (1998). Learning, Adaptation, and Evolution for Intelligent Robotic Systems, (invited paper). *Proceedings of the International Conference on Advances in Systems, Signals, Control and Computers*, 1, 59–68.
- [55] Fukuda, T., & Shibata, T. (1992). Theory and Applications of Neural Networks for Industrial Control Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 39(6), 472–489.
- [56] Fukuda, T., Shibata, T., Kosuge, K., & Arai, F. (1991). Sensing and control of robotic manipulator by neural network. *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 2, 985–990.
- [57] Fukuda, T., Shibata, T., Tokita, M., & Mitsuoka, T. (1992). Neuromorphic Control: Adaptation and Learning. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 39(6), 497–503.
- [58] Gandomi, A. H. (2014). Interior search algorithm (ISA): A novel approach for global optimization. *ISA Transactions*, 53(4), 1168–1183.
- [59] Glover, F. (1989). Tabu search – Part I. *ORSA Journal on Computing*, 1(3), 190–206.
- [60] Glover, F. (1990). Tabu search – Part II. *ORSA Journal on Computing*, 2(1), 4–32.
- [61] Goldberg, D. E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley, Publishing Company, Inc.
- [62] Golden, R. M. (1996). *Mathematical Methods for Neural Network Analysis and Design*. MIT Press.
- [63] Groover, M. P., Weiss, M., Nagel, R. N., & Odrey, N. G. (1987). *Industrial Robotics: Technology, Programming, and Applications*. McGraw-Hill Book Company.
- [64] Guez, A., Eilbert, J., & Kam, M. (1988). Neuromorphic architectures for fast adaptive robot control. *1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 145–149.
- [65] Gupta, M. M., & Rao, D. H. (1994). *Neuro-control systems: theory and applications*. IEEE Press.
- [66] Haber, R., Strzelczak, S., Miljković, Z., Castaño, F., Fumagalli, L., & Petrović, M. (2020). Digital twin-based Optimization on the basis of Grey Wolf Method. A Case Study on Motion Control Systems. *2020 IEEE Conference on Industrial Cyberphysical Systems (ICPS)*, 1, 469–474.
- [67] Hager, G., Hutchinson, S., & Corke, P. (1996). Tutorial TT3: a Tutorial on

Visual Servo Control. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*.

- [68] Harlick, R., & Shapiro, L. (1992). *Computer and Robot Vision, Volume I, II*. Addison-Wesley Publishing Company.
- [69] Hashimoto, H., Harashima, F., Kubota, T., & Sato, M. (1992). Visual Control of Robotic Manipulator Based on Neural Networks. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 39(6), 490–496.
- [70] He, S., Wu, Q. H., & Saunders, J. R. (2006). A novel group search optimizer inspired by animal behavioural ecology. *2006 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2006*, 1272–1278.
- [71] He, S., Wu, Q. H., & Saunders, J. R. (2009). Group search optimizer: An optimization algorithm inspired by animal searching behavior. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 13(5), 973–990.
- [72] Hecht-Nielsen, R. (1989). *Neurocomputing*. Addison-Wesley Publishing Co.
- [73] Holland, J. H. (1975). Adaptation in natural and artificial systems, *Ann Arbor: University of Michigan Press*.
- [74] Hornik, K., Stinchcombe, M., & White, H. (1989). Multilayer feedforward networks are universal approximators. *Neural Networks*, 2(5), 359–366.
- [75] Inoue, T., De Magistris, G., Munawar, A., Yokoya, T., & Tachibana, R. (2017). Deep reinforcement learning for high precision assembly tasks. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 819–825.
- [76] Jakovljevic, Z., Petrovic, M., Mitrovic, S., & Miljkovic, Z. (2018). Intelligent sensing systems – Status of research at KaProm. In *Lecture Notes in Mechanical Engineering* (pp. 18–36). Springer, Cham.
- [77] Janson, D. J., & Frenzel, J. F. (1993). Training Product Unit Neural Network with Genetic Algorithms. *IEEE Expert*, 8(5), 26–33.
- [78] Jokić, A. (2017). *Vizuelno upravljanje inteligentnog mobilnog robota u funkciji terminiranja unutrašnjeg transporta*. Master rad, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet.
- [79] Jokić, A., Petrović, M., & Miljković, Z. (2018). Methods for visual servoing of robotic systems: A state of the art survey. *Tehnika*, 73(6), 801–816.
- [80] Jokić, A., Petrović, M., Miljković, Z., & Babic, B. (2018). Metaheuristički algoritmi optimizacije u terminiranju robotizovanog unutrašnjeg transporta materijala. 41. *JUPITER Konferencija*, 37. *Simpozijum „NU-ROBOTIFTS“*, Zbornik Radova - CD, 3.14-3.22.

- [81] Jun, T. (2010). A color image segmentation algorithm based on region growing. *2010 2nd International Conference on Computer Engineering and Technology*, 6, 634–637.
- [82] Kalajdžić, M., Miljković, Z., Babić, B., & drugi. (2002). *Razvoj metoda automatizovanog projektovanja obradnih sistema i procesa - Polugodišnji izveštaj*. Projekat MNTR Vlade Republike Srbije: MIS.3.02.0127B.
- [83] Kalman, R. E. (1960). A new approach to linear filtering and prediction problems. *Transactions of the ASME-Journal of Basic Engineering*, 82(Series D), 35–45.
- [84] Kasabov, N., & Kozma, R. (1999). *Neuro-Fuzzy Techniques for Intelligent Information Systems*. Physica-Verlag, Springer-Verlag Company.
- [85] Kashan, A. H. (2009). League Championship Algorithm: A new algorithm for numerical function optimization. *2009 International Conference of Soft Computing and Pattern Recognition (SoCPaR 2009)*, 43–48.
- [86] Katić, D. M. (1995). Neuronske mreže u robotici. *Zbornik Radova III Seminara NEUREL 95*, 72–87.
- [87] Kaveh, A., & Khayatazad, M. (2012). A new meta-heuristic method: Ray Optimization. *Computers and Structures*, 112–113, 283–294.
- [88] Kennedy, J. (1997). The particle swarm: social adaptation of knowledge. *Proceedings of 1997 IEEE International Conference on Evolutionary Computation (ICEC'97)*, 303–308.
- [89] Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Network*, 1942–1948.
- [90] Kim, S. H. (1990). *Designing intelligence: A framework for smart systems*. Oxford University Press, USA.
- [91] Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*, 220(4598), 671–680.
- [92] Klir, G. J., & Folger, T. A. (1988). *Fuzzy Sets, Uncertainty and Information*. Prentice-Hall International.
- [93] Koivo, A. J. (1989). *Fundamentals for Control of Robotic Manipulators*. John Wiley & Sons.
- [94] Kosko, B. (1992). *Neural networks for signal processing*. Prentice-Hall, Inc.
- [95] Kovacevic, R., Zhang, Y. M., Li, L., & Beardsley, H. (1996). Sensing and Control of Weld Pool Geometrical Appearance. *Proceedings of the 26th*

International Conference on Production Engineering, 813–824.

- [96] Koza, J. R. (1992). *Genetic programming: on the programming of computers by means of natural selection* (Vol. 1). MIT press.
- [97] Kuperstein, M. (1988). Generalized neural model for adaptive sensory-motor control of single postures. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 140–144.
- [98] Kusiak, A. (1990). *Intelligent Manufacturing Systems*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- [99] Lanzetta, M., Santochi, M., & Tantussi, G. (1999). Computer-aided visual inspection in assembly. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 48(1), 13–16.
- [100] Lu, Y. C., & Chou, J. C. K. (1995). Eight-space quaternion approach for robotic hand-eye calibration. *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 4, 3316–3321.
- [101] Maimone, M., Biesiadecki, J., Tunstel, E., Cheng, Y., & Leger, C. (2006). Surface navigation and mobility intelligence on the Mars Exploration Rovers. In *Intelligence for space robotics* (pp. 45–69).
- [102] Manolov, O., & Milanova, M. (1997). 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*, 84–89.
- [103] Markovic, V., Jakovljevic, Z., & Miljkovic, Z. (2019). Feature sensitive three-dimensional point cloud simplification using support vector regression. *Tehnički Vjesnik*, 26(4), 985–994.
- [104] McKerrow, P. J. (1991). *Introduction to Robotics*. Addison-Wesley Publishing Co.
- [105] Milačić, R. V. (1987). *Teorija projektovanja tehnoloških sistema, Serija Intelligentni tehnološki sistemi, Knjiga 2*. Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, JUPITER – zajednica.
- [106] Milačić, V. R., Bojanić, P., & Milačić, M. (1994). *Tehnička kibernetika*. Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet.
- [107] Milačić, V. R., & Spasić, Ž. (1990). *Kompjuterski integrisani tehnološki sistemi CIM-sistemi*. Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet.
- [108] Miljković, Z. (2020). *Deep Machine Learning and Swarm Intelligence-based Optimization Algorithms for Control and Scheduling of Cyber-Physical Systems in Industry 4.0 - MISSION4.0*. Projekat, Program za razvoj projekata iz oblasti veštačke inteligencije.

- [109] Miljković, Z. (2000). *Razvoj upravljačkih algoritama za autonomne industrijske robote na bazi sistema prepoznavanja i učenja*. Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet.
- [110] Miljković, Z. (2003). *Sistemi veštačkih neuronskih mreža u proizvodnim tehnologijama, Serija monografskih dela Inteligentni tehnološki sistemi (Urednik serije: Prof. dr Vladimir Milačić), Knjiga 8 (V. Milačić (Ed.))*. Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet.
- [111] Miljković, Z. (1994). *Istraživanje i razvoj mikrorobota za montažu mehatronskih sklopova*. Magistarska teza, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet.
- [112] Miljković, Z. (1996). 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*, 235–238.
- [113] Miljković, Z. (1996). Intelligent Control of Industrial Robot Using Recognition System and Artificial Neural Nets. *Proceedings of the 10th International Conference on Industrial Systems*, 229–234.
- [114] Miljković, Z. (2000). Primena sistema prepoznavanja u upravljanju industrijskim robotom. *JUPITER Konferencija, 22. Simpozijum NU * ROBOTI * FTS*, 3.21–3.26.
- [115] Miljković, Z. (1999). Procesiranje slike 2D-objekata i njihova identifikacija korišćenjem "ART-1 Simulatora." *Zbornik Radova 25. JUPITER Konferencija, 21. Simpozijum NU * ROBOTI * FTS*, 3.73–3.78.
- [116] Miljković, Z. (1997). Hierarchical Intelligent Robot Control Based on Artificial Neural Network System. *Journal Mathematical Modelling and Scientific Computing*, 8(1–2), 331–336.
- [117] Miljković, Z. (1996). Intelligent Technologies in Manufacturing Process Design Using Neural Networks. *Proceedings of the International A.M.S.E Conference: ITHURS 96*, 2, 3–9.
- [118] Miljković, Z. (1998). Application of ART-1 Neural Network in Group Technology Design. *AMSE Journal Advances in Modeling & Analysis, Series D: Mathematical Tools, General Computer Tools*, 1(2), 1–16.
- [119] Miljković, Z., & Aleksendrić, D. (2018). *Veštačke neuronske mreže - zbirka rešenih zadataka sa izvodima iz teorije (II izdanje)*. Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet.
- [120] Miljković, Z., & Babic, B. (1998). Adaptive Behaviour of Autonomous Mobile Robot Based on Heterogeneous Neural Networks. *Proceedings of the International Conference on Systems, Signals, Control, Computers –*

SSCC'98, 3, 129–133.

- [121] Miljković, Z., & Babić, B. (2007). Empirical control strategy for learning industrial robot. *FME Transactions*, 35(1), 1–8.
- [122] Miljković, Z., & Babić, B. (1999). Decomposing Functionality of the Feature Recognizer Based on Artificial Neural Network System. In V. B. Bajic & D. Sha (Eds.), *International A.M.S.E Conf. on Artificial Intelligence-ICAI 99, printed in "Development and Practice of Artificial Intelligence Techniques"* (pp. 248–250).
- [123] Miljković, Z., Babić, B., & Kalajdžić, M. (2002). 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*, 325–335.
- [124] Miljković, Z., & Kokotović, B. (1995). 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*, 1, 197–206.
- [125] Miljković, Z., & Kokotović, B. (1996). Intelligent Control of Autonomous Manufacturing Systems. *Proceedings of the 26th International Conference on Production Engineering*, 825–830.
- [126] Miljković, Z., & Lazarević, I. (1998). "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*, 5.48–5.51.
- [127] Miljković, Z., & Lazarević, I. (1998). Control Strategy for Learning Industrial Robot Based on Artificial Neural Network System. *Proceedings of the International Conference on Systems, Signals, Control, Computers – SSCC'98*, 6, 124–128.
- [128] Miljković, Z., Lazarević, I., & Babić, B. (2010). „BPnet V1.0” – aplikacioni softver baziran na Back-Propagation veštačkoj neuronskoj mreži. Tehničko rešenje.
- [129] Miljković, Z., & Milačić, V. R. (1995). Research and Development of the Intelligent Autonomous Microrobot for Assembly of Mechatronic Fits. *Proceedings of the First World Congress on Intelligent Manufacturing Processes & Systems*, 1, 310–318.
- [130] Miljković, Z., Milanović, D., Nešić, N., Stošić, D., & Milanović, S. (2004). *Projektovanje proizvodnih procesa u preduzeću „Montprojekt”- Beograd*.
- [131] Miljković, Z., Mitić, M., Lazarević, M., & Babić, B. (2013). Neural network Reinforcement Learning for visual control of robot manipulators. *Expert*

Systems with Applications, 40(5), 1721–1736.

- [132] Miljković, Z., & Petrović, M. (2017). Application of modified multi-objective particle swarm optimisation algorithm for flexible process planning problem. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 30(2–3), 271–291.
- [133] Miljković, Z., Vuković, N., & Mitić, M. (2016). Neural extended Kalman filter for monocular SLAM in indoor environment. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 230(5), 856–866.
- [134] Miljković, Z., Vuković, N., Mitić, M., & Babić, B. (2013). New hybrid vision-based control approach for automated guided vehicles. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 66(1–4), 231–249.
- [135] Milutinović, D. (1987). *Sistemi prepoznavanja kod robota za fleksibilne tehnološke sisteme i montažu*. Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet.
- [136] Milutinović, D. S., & Milačić, V. R. (1987). A Model-Based Vision System Using a Small Computer. *CIRP Annals*, 36(1), 327–330.
- [137] Mirjalili, S. (2015). The ant lion optimizer. *Advances in Engineering Software*, 83, 80–98.
- [138] Mirjalili, S., & Lewis, A. (2016). The Whale Optimization Algorithm. *Advances in Engineering Software*, 95, 51–67.
- [139] Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., & Lewis, A. (2014). Grey Wolf Optimizer. *Advances in Engineering Software*, 69, 46–61.
- [140] Mitić, M., Vuković, N., Petrović, M., & Miljković, Z. (2015). Chaotic fruit fly optimization algorithm. *Knowledge-Based Systems*, 89.
- [141] Mitić, M. (2014). *Empirijsko upravljanje inteligentnog mobilnog robota bazirano na mašinskom učenju*. Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet.
- [142] Mitić, M., & Miljković, Z. (2015). Bio-inspired approach to learning robot motion trajectories and visual control commands. *Expert Systems with Applications*, 42(5), 2624–2637.
- [143] Mitić, M., & Miljković, Z. (2014). Neural network learning from demonstration and epipolar geometry for visual control of a nonholonomic mobile robot. *Soft Computing*, 18(5), 1011–1025.
- [144] Mitić, M., Miljković, Z., Vuković, N., Babić, B., & Lazarević, I. (2011). *Novi hibridni empirijski upravljački sistem inteligentnog robota vertikalne*

zglobne konfiguracije baziran na informacijama od kamere. Tehničko rešenje.

- [145] Mitić, M., Vuković, N., Petrović, M., & Miljković, Z. (2018). Chaotic metaheuristic algorithms for learning and reproduction of robot motion trajectories. *Neural Computing and Applications*, 30(4), 1065–1083.
- [146] Mitrofanov, S. P. (1964). *Naučni temelji grupne tehnologije*. Privreda.
- [147] Monostori, L., & Barschdorff, D. (1992). Artificial neural networks in intelligent manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 9(6), 421–437.
- [148] Monostori, L., Markus, A., Van Brussel, H., & Westkämpfer, E. (1996). Machine Learning Approaches to Manufacturing. *CIRP Annals*, 45(2), 675–712.
- [149] Morgenstern, O., & Von Neumann, J. (2007). *Theory of games and economic behavior (commemorative edition)*. Princeton University Press.
- [150] Nelson, D. H., & Schneider, G. (2001). *Applied Manufacturing Process Planning*. Prentice Hall, Inc.
- [151] Nikodijević, S. (2020). *Namenski stereo vizuelni sistem prepoznavanja za identifikaciju tehnoloških entiteta u funkciji praćenja karakterističnih objekata*. Master rad, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet.
- [152] Nof, S. Y. (1985). *Handbook of Industrial Robotics*. John Wiley & Sons, Inc.
- [153] O'Hare, G. M., & Jennings, N. R. (1996). *Foundations of Distributed Artificial Intelligence (Vol. 9)*.
- [154] Pan, W.-T. (2012). A new fruit fly optimization algorithm: taking the financial distress model as an example. *Knowledge-Based Systems*, 26, 69–74.
- [155] Parsaei, H. R., & Jamshidi, M. (1995). *Design and Implementation of Intelligent Manufacturing Systems From Expert Systems, Neural Networks to Fuzzy Logic*. Prentice Hall.
- [156] Petrović, M., Miljković, Z., & Babić, B. (2013). Integration of process planning, scheduling, and mobile robot navigation based on TRIZ and multi-agent methodology. *FME Transactions*, 41(2).
- [157] Petrović, M., Mitić, M., Vuković, N., & Miljković, Z. (2016). Chaotic particle swarm optimization algorithm for flexible process planning. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 85(9–12).
- [158] Petrovic, M., Wolniakowski, A., Ciekowski, M., Romaniuk, S., & Miljkovic, Z. (2020). Neural network-based calibration for accuracy

improvement in lateration positioning system. *15th International Conference Mechatronic Systems and Materials, MSM 2020*.

- [159] Petrović, M. (2010). *Prilog razvoju inteligentnog tehnološkog sistema u domenu unutrašnjeg transporta baziran na mašinskom učenju*. Master rad, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet.
- [160] Petrović, M. (2016). *Veštačka inteligencija u projektovanju inteligentnih tehnoloških sistema*. Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet.
- [161] Petrović, M., & Miljković, Z. (2017). Grey Wolf Optimization Algorithm for Single Mobile Robot Scheduling. *Proceedings of 4th International Conference on Electrical, Electronics and Computing Engineering, IcETRAN*, ROI1.2.1-6.
- [162] Petrović, M., Miljković, Z., Babić, B., Vuković, N., & Čović, N. (2012). Towards a conceptual design of intelligent material transport using artificial intelligence. *Strojarstvo*, 54(3), 205–219.
- [163] Petrović, M., Miljković, Z., & Jokić, A. (2019). A novel methodology for optimal single mobile robot scheduling using whale optimization algorithm. *Applied Soft Computing*, 81, 105520.
- [164] Petrović, M., Mystkowski, A., Jokić, A., Đokić, L., & Miljković, Z. (2020). Deep Learning-based Algorithm for Mobile Robot Control in Textureless Environment. *2020 International Conference Mechatronic Systems and Materials (MSM)*, 1–4.
- [165] Petrović, M., Petronijević, J., Mitić, M., Vuković, N., Miljković, Z., & Babić, B. (2016). The Ant Lion Optimization Algorithm for Integrated Process Planning and Scheduling. *Applied Mechanics and Materials*, 834, 187–192.
- [166] Petrović, M., Petronijević, J., Mitić, M., Vuković, N., Plemić, A., Miljković, Z., & Babić, B. (2015). The ant lion optimization algorithm for flexible process planning. *Journal of Production Engineering*, 18(2), 65–68.
- [167] Petrovic, M., Villalonga, A., Miljkovic, Z., Castano, F., Strzelczak, S., & Haber, R. (2019). Optimal tuning of cascade controllers for feed drive systems using particle swarm optimization. *IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 325–330.
- [168] Petrović, M., Vuković, N., Mitić, M., & Miljković, Z. (2016). Integration of process planning and scheduling using chaotic particle swarm optimization algorithm. *Expert Systems with Applications*, 64, 569–588.
- [169] Phanden, R. K., & Jain, A. (2019). Integration of Process Planning and Scheduling: Introduction. In *Integration of Process Planning and*

Scheduling: Approaches and Algorithms.

- [170] Pugh, A. (1984). Robot Vision and Sensory Controls. *Proceedings of the 4th International Conference, IFS (Publications) Ltd and North-Holland*, 1.
- [171] Putnik, G. D. (1992). *Primena induktivnog učenja baziranog na teoriji automata za izbor alata u projektovanju tehnoloških procesa obrade metala rezanjem*. Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet.
- [172] Radjenović-Mrčarica, J., & Detter, H. (1995). Neural Network Based System for Microparts Assembly. *Proceedings of the First ECPD International Conference on Advanced Robotics and Intelligent Automation*, 209–214.
- [173] Rao, R. V., Savsani, J. V., & Vakharia, D. P. (2011). Teaching-learning-based optimization: A novel method for constrained mechanical design optimization problems. *Computer Aided Design*, 43(3), 303–315.
- [174] Rao, V., & Rao, H. V. (1993). *C++ Neural Networks and Fuzzy Logic*. MIS:Press.
- [175] Rashedi, E., Nezamabadi-pour, H., & Saryazdi, S. (2009). GSA: A Gravitational Search Algorithm. *Information Sciences*, 179(13), 2232–2248.
- [176] Rechenberg, I. (1965). Cybernetic solution path of an experimental problem. *Royal Aircraft Establishment Library Translation 1122*.
- [177] Rechenberg, I. (1971). *Evolutionsstrategie: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution*. Doctoral dissertation, Technical University of Berlin, Department of Process Engineering, Germany.
- [178] Rivin, E. I. (1987). *Mechanical design of robots*. McGraw-Hill, Inc.
- [179] Rumelhart, D. E., & McClelland, J. L. (1986). Explorations in the Microstructure of Cognition. In *Parallel Distributed Processing*. The MIT Press.
- [180] Russell, S., & Norvig, P. (2002). *Artificial intelligence: a modern approach*.
- [181] Russell, S. J. (1989). *The use of knowledge in analogy and induction*. Morgan Kaufmann Publishers Inc.
- [182] Sadeghi, F., Toshev, A., Jang, E., & Levine, S. (2018). Sim2Real Viewpoint Invariant Visual Servoing by Recurrent Control. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 4691–

4699.

- [183] Schultz, A. C., Grefenstette, J. J., & De Jong, K. A. (1993). Test And Evaluation by Genetic Algorithms. *IEEE Expert*, 8(5), 9–14.
- [184] Schwefel, H.-P. (1975). *Evolutionsstrategie und numerische Optimierung*. Technical University of Berlin, Germany.
- [185] Schwefel, H.-P. (1977). Evolutionsstrategien für die numerische optimierung. In *Numerische Optimierung von Computer-Modellen mittels der Evolutionsstrategie* (pp. 123–176). Springer.
- [186] Skapura, D. M. (1996). *Building Neural Networks*. Addison-Wesley Publishing Company.
- [187] Storn, R., & Kenneth, P. (1997). Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces. *Journal of Global Optimization*, 11(4), 341–359.
- [188] Suh, N. (1998). Axiomatic Design Theory for Systems. *Research in Engineering Design*, 10(4), 189–209.
- [189] Suh, N. P. (1990). *The principles of design*. Oxford University Press, USA.
- [190] Taniguchi, N. (1974). On the basic concept of nano-technology. *International Conference on Production Engineering, Part II*.
- [191] Tanimoto, S. L. (1987). *The elements of artificial intelligence: an introduction using LISP*. Computer Science Press, Inc.
- [192] Thrun, S., Burgard, W., & Fox, D. (2005). *Probabilistic robotics*. MIT Press Cambridge.
- [193] Trabasso, L. G., & Aumond, B. D. (1996). 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*, 1, 1.279-1.284.
- [194] Trimmer, W. S. N., & Gabriel, K. J. (1987). Design considerations for a practical electrostatic micro-motor. *Sensors and Actuators*, 11(2), 189–206.
- [195] Tsay, T. I. J., & Chen, J.-Y. (1999). Intelligent Visual Control of Robot Manipulators. *Proceedings of the 30th International Symposium on Robotics*, 445–452.
- [196] Tunstel, E., Maimone, M., Trebi-Ollenu, A., Jeng Yen, Petras, R., & Willson, R. (2005). Mars Exploration Rover Mobility and Robotic Arm Operational Performance. *2005 IEEE International Conference on*

Systems, Man and Cybernetics, 2, 1807–1814.

- [197] Ueda, K., & Ohkura, K. (1996). A Biological Approach to Complexity in Manufacturing Systems. *Manufacturing Systems*, 25(1), 57–65.
- [198] Veelenturf, L. (1995). *Analysis and applications of Artificial Neural Networks*. Prentice Hall.
- [199] Vukobratović, M., & Katić, D. (1995). Learning Control of Industrial Robots Interacting with Dynamic Environment by Application of Multilayer Perceptrons. *Proceedings of the 26th International Symposium on Industrial Robots*, 583–588.
- [200] Vukobratović, M., Stokić, D., Kirćanski, N., Kirćanski, M., Hristić, D., Karan, B., Vujić, D., & Djurović, M. (1986). *Uvod u robotiku*. Institut „Mihajlo Pupin“.
- [201] Vuković, N. (2012). *Razvoj mašinskog učenja inteligentnog mobilnog robota baziran na sistemu veštačkih neuronskih mreža*. Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet.
- [202] Vuković, N., & Miljković, Z. (2009). New hybrid control architecture for intelligent mobile robot navigation in a manufacturing environment. *FME Transactions*, 37(1), 9–18.
- [203] Vuković, N., & Miljković, Z. (2015). Robust sequential learning of feedforward neural networks in the presence of heavy-tailed noise. *Neural Networks*, 63, 31–47.
- [204] Vuković, N., & Miljković, Z. (2013). A growing and pruning sequential learning algorithm of hyper basis function neural network for function approximation. *Neural Networks*, 46, 210–226.
- [205] Vuković, N., Miljković, Z., Mitić, M., & Babić, B. (2011). *Hibridni upravljački algoritam za upravljanje i estimaciju položaja inteligentnog mobilnog robota baziranog na kalibrisanoj kameri*. Tehničko rešenje.
- [206] Vuković, N., Miljković, Z., Mitić, M., & Petrović, M. (2012). *Novi algoritam za simultano ocenjivanje položaja mobilnog robota i položaja karakterističnih objekata baziran na neuronskom linearizovanom Kalmanovom filtru i senzorskoj informaciji dobijenoj od kalibrisane kamere*. Tehničko rešenje.
- [207] Vuković, N., Mitić, M., & Miljković, Z. (2015). Trajectory learning and reproduction for differential drive mobile robots based on GMM/HMM and dynamic time warping using learning from demonstration framework. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 45, 388–404.
- [208] Webster, B., & Bernhard, P. J. (2003). A local search optimization algorithm based on natural principles of gravitation. *Proceedings of the*

International Conference on Information and Knowledge Engineering, 1, 255–261.

- [209] Yang, X.-S. (2010). *Nature-inspired metaheuristic algorithms*. Luniver press.
- [210] Yang, X.-S. (2010). *Engineering optimization: an introduction with metaheuristic applications*. John Wiley & Sons.
- [211] Yang, X.-S., & He, X.-S. (2019). *Mathematical foundations of nature-inspired algorithms*. Springer.
- [212] Yang, X. S. (2009). Firefly algorithms for multimodal optimization. In Z. T. (eds) Watanabe O. (Ed.), *In: Stochastic Algorithms: Foundations and Applications. SAGA 2009. Lecture Notes in Computer Science* (pp. 169–178). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [213] Yang, X. S. (2010). A new metaheuristic bat-inspired algorithm. *Studies in Computational Intelligence*, 65–74.
- [214] Yang, X. S., & Deb, S. (2009). Cuckoo search via Lévy flights. *2009 World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing (NaBIC), IEEE*, 210–214.
- [215] Young, I. T., Gerbrands, J. J., & Vliet, L. J. (1999). *Fundamentals of Image Processing*. Delft University of Technology, The Netherlands.
- [216] Zadeh, L. A. (1994). Fuzzy Logic, Neural Networks, and Soft Computing. *Fuzzy Systems*, 37(3), 77–84.
- [217] Zalzala, A. M. S., & Morris, A. S. (1996). *Neural Networks for Robotic Control -Theory and Applications*. Ellis Horwood Limited.
- [218] Zhong, R. Y., Xu, X., Klotz, E., & Newman, S. T. (2017). Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review. *Engineering*, 3(5), 616–630.
- [219] Zrnić, Đ. (2016). *Fabrička postrojenja i tehnička logistika*. Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet.
- [220] *Strategija razvoja veštačke inteligencije u Republici Srbiji za period 2020-2025. godine*. (2020).
- [221] <https://photojournal.jpl.nasa.gov/jpeg/PIA04413.jpg>
- [222] <https://cssanalytics.files.wordpress.com/2013/09/swarm1.png?w=670>
- [223] <http://www.asergeev.com/pictures/k/Antlion.htm>
- [224] <https://phys.org/news/2014-11-merrier-ecologists-larger-group-aids.html>

Изводи из рецензија

„ ... Уџбеник на оригиналан начин разматра проблематику интелигентних технолошких система. Рукопис је писан јасним стилем. Материја која се обрађује је изложена врло систематично и илустрована брижљиво одабраним примерима. Треба нагласити да су аутори уградили у уџбеник своја вишегодишња искуства остварена кроз реализацију научних и индустријских пројеката у области интелигентних технолошких система. Мишљења сам да ће публикација представљати велику помоћ за студенте да лакше савладају наставни садржај предмета за који је намењена. Због оскудности литературе у овој области уџбеник ће добро доћи и студентима других факултета као и стручњацима из индустрије. Са посебним задовољством препоручујем да се наведени рукопис публикује као основни универзитетски уџбеник.“

Проф. др Бојан Бабић
Универзитет у Београду - Машински факултет
Катедра за производно машинство

„ ... Садржај уџбеника у потпуности одговара наставним целинама предвиђеним програмом предмета Интелигентни технолошки системи. Излагање је прилагођено намени, са јасно дефинисаним појмовима и методички распоређеним целинама. Уџбеник је тематски изузетно актуелан и, иако је првенствено намењен студентима Машинског факултета, може се користити како у истраживањима, тако и у инжењерској пракси у области пројектовања интелигентних технолошких система. На основу изложеног, са великим задовољством предлажем да се понуђени рукопис без измена и допуна штампа као уџбеник из предмета Интелигентни технолошки системи.“

Проф. др Живана Јаковљевић
Универзитет у Београду - Машински факултет
Катедра за производно машинство

