

Факултет Машински

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

Веће научних области техничких наука
(Назив стручног већа коме се захтев упућује, сагласно

члану 6. и чл. 7 став 1. овог правилника)

219/3

(Број захтева)

06.02.2014. године

(Датум)

ЗАХТЕВ**за давање сагласности на реферат о урађеној докторској дисертацији**

Молимо да, сходно члану 46. ст. 5 тач. 4. Статута Универзитета у Београду („Гласник Универзитета“, број 131/06), дате сагласност на реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата:

МАРКА (МИОДРАГ) МИТИЋА

(име, име једног од родитеља и презиме)

КАНДИДАТ **МАРКО (МИОДРАГ) МИТИЋ** **уписан на Докторске студије 2009. године.**

(име, име једног од родитеља и презиме)

Поднео је захтев за израду докторске дисертације:

ЕМПИРИЈСКО УПРАВЉАЊЕ ИНТЕЛИГЕНТНОГ МОБИЛНОГ РОБОТА БАЗИРАНО НА МАШИНСКОМ УЧЕЊУ

Универзитет је дана 17.09.2012. год. својим актом под бр. 06-20264/29-12 дао сагласност на предлог теме докторске дисертације која је гласила:

ЕМПИРИЈСКО УПРАВЉАЊЕ ИНТЕЛИГЕНТНОГ МОБИЛНОГ РОБОТА БАЗИРАНО НА МАШИНСКОМ УЧЕЊУКомисија за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата: **МАРКА (МИОДРАГ) МИТИЋА**

(име, име једног од родитеља и презиме)

Образована је на седници одржаној 26.12.2013. године, одлуком факултета под бр. 2591/2, у саставу:

Име и презиме члана комисије	звање	научна област	установа у којој је запослен
1. Др Зоран Миљковић	Ред.проф.	Производно машинство	Машински факултет Београд
2. Др Бојан Бабић	Ред.проф.	Производно машинство	Машински факултет Београд
3. Др Живана Јаковљевић	Доцент	Производно машинство	Машински факултет Београд
4. Др Радиша Јовановић	Доцент	Аутоматско управљање	Машински факултет Београд
5. Др Жарко Ћојбашић	Ред.проф.	Аутоматско управљање	Универзитет у Нишу – Машински факултет

Наставно-научно веће факултета прихватило је извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације на седници одржаној дана 06.02.2014. године.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Проф.др Милорад Милованчевић

Прилог: 1. Извештај комисије са предлогом.

2. Акт Наставно-научног већа факултета о усвајању извештаја.

3. Примедбе дате у току стављања извештаја на увид јавности, уколико је таквих примедби било.

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ –
Број: 219/2
Датум: 06.02.2014.
Београд, Краљице Марије 16

На основу чл. 30. Закона о високом образовању (Сл.гласник 76/05, 100/07 и 44/10) и чл. 37. Правилника о докторским студијама Машинског факултета Универзитета у Београду и извештаја Комисије у саставу: проф.др Зоран Миљковић, ментор, проф.др Бојан Бабић, доц.др Живана Јаковљевић, доц.др Радиша Јовановић и др Жарко Ћојбашић, Универзитет у Нишу – Машински факултет, о оцени докторске дисертације „Емпиријско управљање интелигентног мобилног робота базирано на машинском учењу“ докторанта Марка Митића, дипл.инж.маш. Наставно-научно веће Машинског факултета на седници одржаној 06.02.2014. године, донело је следећу

ОДЛУКУ

Усваја се извештај за оцену и одбрану докторске дисертације **„ЕМПИРИЈСКО УПРАВЉАЊЕ ИНТЕЛИГЕНТНОГ МОБИЛНОГ РОБОТА БАЗИРАНО НА МАШИНСКОМ УЧЕЊУ“** докторанта **МАРКА МИТИЋА**, дипл.инж.маш.

Извештај о оцени и одбрани докторске дисертације, по истеку рока од 30 дана увида јавности, доставља се на сагласност Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

Одлуку доставити: Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, докторанту, ментору и архиви факултета.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Проф.др Милорад Милованчевић

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији
кандидата Марка Митића, дипл.инж.маш.

Одлуком Наставно-научног већа Машинског факултета у Београду бр. 2591/2 од 26.12.2013.г. именовани смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Марка Митића, дипл.инж.маш., под насловом:

„ЕМПИРИЈСКО УПРАВЉАЊЕ ИНТЕЛИГЕНТНОГ МОБИЛНОГ РОБОТА БАЗИРАНО НА МАШИНСКОМ УЧЕЊУ”

После прегледа достављене Дисертације, других пратећих материјала и разговора са Кандидатом, Комисија је сачинила следећи

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Кандидат је пријавио тему докторске дисертације под називом: „ЕМПИРИЈСКО УПРАВЉАЊЕ ИНТЕЛИГЕНТНОГ МОБИЛНОГ РОБОТА БАЗИРАНО НА МАШИНСКОМ УЧЕЊУ” и за ментора је предложио проф. др Зорана Миљковића. На основу пријаве кандидата ННВ МФБгд. је одлуком бр. 1133/2 од 12.07.2012.г. прихватило предлог и именovalo Комисију за подношење извештаја о прихватању теме докторске дисертације и њене научне заснованости у саставу: др Зоран Миљковић, ред.проф. (ментор), др Бојан Бабић, ред.проф., др Живана Јаковљевић, доцент, др Радиша Јовановић, доцент, др Жарко Ћојбашић, ред.проф. На основу извештаја Комисије и одлуке ННВ МФБгд. поднет је захтев Машинског факултета Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду (захтев бр. 1133/5 од 30.08.2012.г.) које је на седници одржаној 17.09.2012.г. донело одлуку да се даје сагласност на предлог теме докторске дисертације Марка Митића, дипл.инж.маш. (одлука бр. 06-20264/29-12 од 17.09.2012.г.), а на основу чега је 2.10.2012.г. Декан Машинског факултета у Београду донео закључак бр. 1746/1 о одобравању рада на предметној дисертацији под менторством проф. др Зорана Миљковића.

На основу извештаја проф. др Зорана Миљковића, ментора, да је докторанд Марко Митић завршио докторску дисертацију под називом "ЕМПИРИЈСКО УПРАВЉАЊЕ ИНТЕЛИГЕНТНОГ МОБИЛНОГ РОБОТА БАЗИРАНО НА МАШИНСКОМ УЧЕЊУ", као и предлога Катедре за производно машинство, Наставно-научно веће Машинског факултета донело је одлуку број 2591/2 од 26.12.2013. године о именовању Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације у истом саставу: др Зоран Миљковић, ред.проф., др Бојан Бабић, ред.проф., др Живана Јаковљевић, доцент, др Радиша Јовановић, доцент, др Жарко Ћојбашић, ред.проф.

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација „ЕМПИРИЈСКО УПРАВЉАЊЕ ИНТЕЛИГЕНТНОГ МОБИЛНОГ РОБОТА БАЗИРАНО НА МАШИНСКОМ УЧЕЊУ” припада области техничких наука (машинство) и ужој научној области Производно машинство. Израдом докторске дисертације руководио је др Зоран Миљковић, редовни професор на Катедри за производно машинство Машинског факултета Универзитета у Београду.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Марко (Миодраг) Митић, дипл.инж.маш., рођен је 17.07.1984. године у Београду, Република Србија. Основну школу „Јован Дучић”, као и Политехничку академију - средњу техничку школу (звање: *техничар за роботiku и флексибилне производне системе*) завршио је у Београду. На Машински факултет у Београду уписао се школске 2003/2004. године, а дипломирао је 2. децембра 2009.г. на Катедри за аутоматско управљање са просечном оценом 9,03 (девет и 03/100) и оценом 10 (десет) на дипломском раду, завршивши студије према Статуту факултета из 1999. године.

Након дипломирања уписао је докторске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду школске 2009/2010. године. Током првог семестра утврђени су правци научноистраживачког рада на Катедри за производно машинство, да би 8.03.2010.г. био озваничен и Програм усавршавања који се реализује под руководством проф. др Зорана Миљковића.

Од 1.04.2010. до 30.04.2013. године имао је статус истраживача-докторанда (стипендисте) тада Министарства за науку и технолошки развој, а сада Министарства просвете, науке и технолошког развоја Владе Републике Србије, одлука бр. 451-03-00098/2010-02/01 од 3.03.2010. године (Уговор бр. 828). Ангажован је на научноистраживачким пројектима Владе Републике Србије, прво у оквиру Министарства за науку и технолошки развој на пројекту под називом *Флексибилна аутоматизација и имплементација интелигентних технолошких система у домену производње делова од лима* (евид.бр. TP14031, руководилац: проф. др Бојан Бабић, Београд, 2008 - 2010.г.), а сада у оквиру Министарства просвете, науке и технолошког развоја на актуелном пројекту под називом *Иновативни приступ у примени интелигентних технолошких система за производњу делова од лима заснован на еколошким принципима* (евид. бр. TP35004, руководилац: проф. др Бојан Бабић, Београд, 2011 - 2014.г.).

Као студент докторских студија, кандидат је кроз вишегодишњи рад на научноистраживачким пројектима, постао аутор и коаутор укупно 15 радова објављених у водећим међународним и националним часописима, као и у зборницима радова међународних и националних научних скупова. Истовремено, реализовао је 5 техничких решења у оквиру научноистраживачких пројеката на којима је учествовао. На основу остварених резултата Марко Митић је изабран 2011.г. у звање *истраживач сарадник* (одлука бр. 21-2157/5 од 22.11.2011.г.). Од 1.маја 2013.г. запослен је у овом звању на Машинском факултету у Београду у оквиру актуелног пројекта технолошког развоја Министарства просвете, науке и технолошког развоја Владе Републике Србије (евид.бр. TP35004).

Од самог почетка докторских студија, почевши од летњег семестра школске 2009/2010.г. Марко Митић је активно укључен у наставни процес Катедре за производно машинство Машинског факултета Универзитета у Београду, и то на Основним академским студијама (предмет: *Компјутерска симулација и вештачка интелигенција*) и Мастер академским студијама (предмети: *Интелигентни технолошки системи*; *Методе одлучивања*; *Аксиоматске методе*). Кандидат на овим наставним предметима реализује све видове вежби (аудиторне вежбе, лабораторијске вежбе, преглед самосталних задатака, преглед пројеката). Марко Митић учествује и у активностима НИО-Машински факултет у Београду у погледу одржавања лабораторијске опреме, четири комплета мобилних робота *LEGO Mindstorms NXT*, као и *Khepera II – KheIIBase* мобилног робота са додатном опремом (компатибилна камера *CMUcam VISION*

TURRET–KheCMUCam; роботска рука *Khepera Gripper Turret* – хватач *KheGrip*). Истовремено, кандидат је одговоран за развој и одржавање интернет страница за наставне потребе свих предмета на којима је сарадник.

Енглески језик: говори, чита, пише

Рад на рачунару: напредно коришћење (MS Office, *MATLAB*[®], Python, AutoCad, Catia, HTML/CSS, Adobe Photoshop, LaTeX, познавање C/C++/Java програмских језика)

Истраживачке области: Роботика, Аутономни системи и машинско учење, Емпиријско управљање, Вештачка интелигенција, Мехатроника, Управљање на основу информација добијених од камере

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација кандидата Марка Митића, дипл.инж.маш., под називом „ЕМПИРИЈСКО УПРАВЉАЊЕ ИНТЕЛИГЕНТНОГ МОБИЛНОГ РОБОТА БАЗИРАНО НА МАШИНСКОМ УЧЕЊУ“ изложена је на 307 страница и садржи 164 једначине, 114 слика и дијаграмских приказа, 33 табеле и 201 коришћени референтни литературни извор. Докторску дисертацију чине следећих осам поглавља и списак литературе:

1. Увод
2. Индустријски мобилни робот у унутрашњем транспорту материјала интелигентног технолошког система
3. Емпиријско управљање - теоријске основе и примена
4. Управљање роботских система на основу информација добијених од камере
5. Нови хибридни емпиријски управљачки систем робота вертикалне зглобне конфигурације базиран на информацијама добијеним од камере
6. Управљање интелигентног мобилног робота на бази машинског учења демонстрацијом и информација добијених од камере
7. Репродукција жељене трајекторије и визуелно навођење интелигентног мобилног робота на бази биолошки инспирисаног алгорита и хомографије
8. Закључак
9. Литература

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У првом поглављу текста докторске дисертације дате су основне информације о потреби увођења интелигентних мобилних робота у технолошко окружење за обављање унутрашњег транспорта сировина, полуфабриката, материјала и готових делова. Дат је списак полазних хипотеза истраживања, као и главни научни доприноси предметне докторске дисертације. Наводи се да је увођењем техника емпиријске управљачке теорије и машинског учења у процес пројектовања управљачког система индустријског робота могуће у значајној мери елиминисати потенцијално нежељени утицај различитих типова поремећаја у технолошком окружењу.

Друго поглавље докторске дисертације садржи прелиминарне информације о индустријским мобилним роботима у унутрашњем транспорту материјала у оквиру технолошког система. Најпре је указано на недостатке конвенционалних видова транспорта, као и на предности имплементације мобилних робота са аспекта флексибилности и прилагођавања реалним, стохастичким условима рада. Анализом научне и стручне литературе, као и постојећих решења унутрашњег транспорта материјала у свету, закључено је да изразито динамички

карактер производног погона условљава имплементацију система унутрашњег транспорта на бази мобилних робота који имају могућност разумевања процеса и стања у окружењу, као и доношења одговарајућих самосталних одлука. Дефинисањем стања и модела промене стања мобилног робота, омогућен је основни услов за решавање проблема локализације (одређивања позиције и оријентације) робота у технолошком окружењу. На крају поглавља описано је технолошко окружење чији је диспозициони план искоришћен за формирање лабораторијског модела. Дате су и информације о основној конфигурацији мобилног робота *Kheperall*, који је коришћен за експерименталну верификацију највећег броја развијених емпиријских управљачких алгоритама.

У трећем поглављу представљени су основни појмови теорије емпиријског управљања. Појашњене су особине емпиријског система заједно са елементима емпиријског процеса у општем случају. Основни циљ пројектовања емпиријског управљачког система је реализација самоодрживог понашања интелигентних агената који свој будући рад заснивају на оцени успешности извршавања прописаног задатка у прошлости. У циљу комплетног описа концепта емпиријског управљања, представљене су и теоријске основе машинског учења ојачавањем и машинског учења демонстрацијом. Приказани су основни појмови ових класа машинског учења који су неопходни за развој свих алгоритама управљања представљених у оквиру ове дисертације. Верификација оригиналних алгоритама управљања у домену проблема избегавања препрека, локализације и навигације мобилног робота обухвата развој симулације у *MATLAB*[®] софтверском пакету, као и експеримент који је спроведен у оквиру лабораторијског модела технолошког окружења применом *LEGO Mindstorms NXT* мобилног робота.

Четврто поглавље односи се на развој управљачких алгоритама на бази информација добијених од камере. Основна идеја овог типа управљања заснива се на употреби параметара у равни слике за одређивање управљачких величина роботских система различитих конфигурација. Прво су анализирани перформансе неколико најчешће коришћених алгоритама препознавања карактеристичних објеката. Затим су дата детаљна објашњења четири основна алгорита управљања робота на основу грешке у параметрима слике, на основу естимације (оцене) положаја карактеристичног објекта у односу на координатни систем камере на бази издвојених карактеристика са слике, применом еиполарне геометрије и на основу хомографије. Симулација управљања на бази наведених алгоритама развијена је у *MATLAB*[®] окружењу у циљу оцене успешности визуелног навођења робота у технолошком окружењу. Хибридни алгоритам управљања који раздваја транспортни задатак на две независне групе (глобално и локално визуелно управљање) верификован је у лабораторијском моделу технолошког окружења коришћењем *Kheperall* мобилног робота (са хватачем *KheGrip*) и *Prestigio PWC 2 WEB* камере.

У петом поглављу разматрано је решење више проблема који се јављају приликом управљања робота на бази информација добијених од камере у реалном времену, као што су: проблем видног поља камере, постојање шума у аквизицији сигнала, нетачни параметри калибрационе матрице, погрешна естимација растојања камере од жељеног објекта и услови нагле промене осветљења у реалном времену. У овом контексту, представљен је нови хибридни емпиријски управљачки систем робота вертикалне зглобне конфигурације на бази машинског учења ојачавањем и управљања на основу грешке у параметрима слике. Раздвајањем фазе управљања на два независна дела (корекција оријентације у првој и корекција положаја у другој фази) омогућено је кретање робота по оптималној путањи. Симулација, развијена у *MATLAB*[®] окружењу, обухвата 3 независне студије у којима је потврђена валидност развијеног система управљања. Поређењем са алгоритмом управљања на основу грешке у параметрима слике доказане су предности употребе метода машинског учења у процесу пројектовања управљачких система. Верификација новог емпиријског алгорита у реалним условима подразумева визуелно управљање антропоморфног робота *NeuroArm Manipulator System* (са компатибилном камером *CMUCam3*) у лабораторијским условима.

Шесто поглавље докторске дисертације је посвећено решавању проблема визуелног управљања робота који настају при естимацији еипола, односно фундаменталне матрице еиполарне геометрије. Најпре је указано на ове проблеме кроз развијену *MATLAB*[®] симулацију визуелног навођења мобилног робота. Показано је да прорачун трансаторне и угаоне брзине на бази еипола највише зависи од промене амбијенталног осветљења, алгорита

препознавања карактеристичних објеката, као и појаве осциловања (дегенерације) вредности епипола у равни слике. Решење ових недостатака заснива се на оригиналном хибридном управљачком систему који је базиран на машинском учењу демонстрацијом и вештачкој неуронској мрежи (*feedforward*) у циљу корекције оријентације приликом кретања мобилног робота. На крају поглавља, користећи *Kheperall* робот (са хватачем *KheGrip*) и компатибилну камеру *CMUcam VISION TURRET-KheCMUCam*, показана је робустност развијеног система управљања при извршавању технолошког задатка приступања радном предмету.

Седмо поглавље разматра кретање мобилног робота до позиције непосредно испред машине алатке у технолошком окружењу. Поред навођења на бази информација од камере третиран је и проблем навигације робота од произвољне позиције и оријентације до најповољнијег положаја за почетак визуелног управљања. Елементи хомографске матрице искоришћени су за одређивање трансаторне брзине у фази визуелног управљања. Управљачке команде за репродукцију жељене трајекторије генерисане су применом машинског учења демонстрацијом и биолошки инспирисаног алгоритма оптимизације. Оптимална метахеуристичка техника утврђена је тестирањем различитих алгоритама теорије ројева на скупу од 10 унимодалних и мултимодалних нелинеарних функција. Ова метода оптимизације имплементирана је у оквиру машинског учења демонстрацијом које обухвата различите модуле учења. Модул демонстрација понашања робота подразумева скуп управљања при реализацији 15 различитих трајекторија идентичног жељеног облика. Затим, искоришћена је и метода оптимизације колонијом свитаца како би се одредила оптимална трајекторија робота у модулу машинског учења. Такође, ова метахеуристичка оптимизациона техника је имплементирана уместо вештачке неуронске мреже која је коришћена у претходном (шестом) поглављу, у циљу успешне корекције оријентације мобилног робота у реалним условима управљања. На овај начин, елиминисани су познати недостаци управљања на основу хомографије, као што су зависност од количине светлости у окружењу и погрешна естимација хомографске матрице. Експерименталном верификацијом на мобилном роботу *Kheperall* са хватачем *KheGrip* и компатибилном камером *CMUcam VISION TURRET-KheCMUCam* потврђена је робустност развијеног емпиријског управљачког система у домену унутрашњег транспорта материјала.

У закључку (осмо поглавље) су наглашене предности примене техника емпиријске теорије и машинског учења у поступку концепцијског пројектовања управљачког система мобилног робота. Такође, указано је и на могуће правце будућих истраживања у домену интелигентног управљања роботских система различитих конфигурација и структура.

На крају је наведена обимна литература која је коришћена током спроведених истраживања и рада на реализацији докторске дисертације.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Докторска дисертација кандидата Марка Митића, дипл.инж.маш., под називом „ЕМПИРИЈСКО УПРАВЉАЊЕ ИНТЕЛИГЕНТНОГ МОБИЛНОГ РОБОТА БАЗИРАНО НА МАШИНСКОМ УЧЕЊУ“ представља савремен и оригиналан приступ, као и евидентан научни допринос разматраном проблему пројектовања управљачких система на бази машинског учења и информација добијених од спољашњих сензора. У докторској дисертацији анализира се могућност примене интелигентних мобилних робота за потребе унутрашњег транспорта сировина, полуфабриката, материјала и готових делова, што представља изразито комплексан научно-инжењерски истраживачки циљ. Данас, мобилни роботи морају да буду у стању да самостално доносе одлуке о будућим акцијама, као и да повећавају степен успешности остваривања изабраног технолошког задатка путем комуникације са интелигентним агентима у окружењу. Спроведена истраживања у оквиру предметне докторске дисертације подразумевају развој *оригиналних управљачких система* на бази генерисаног сопственог искуства робота, стеченог кроз интеракцију са окружењем, уз примену напредних концепата машинског учења и техника вештачке интелигенције (*computational intelligence*). Предметна докторска дисертација

обухвата развој и експерименталну верификацију **5 оригиналних алгоритама** емпиријског управљања, што указује да кандидат поседује изразиту способност за даљи веома успешан научноистраживачки рад. Најпре су развијана четири (један оригиналан и три коришћена у иницијалној фази развоја) алгорита машинског учења ојачавањем за потребе избегавања препрека, навигације и локализације мобилног робота у технолошком окружењу (потпоглавље 3.6). Истраживања у оквиру докторске дисертација обухватају и област управљања на основу информација добијених од камере, што је резултирало оригиналним алгоритмом управљања мобилног робота који се састоји од две независне управљачке петље (потпоглавље 4.5). Поред овога, три оригинална алгорита управљања који су представљени у поглављу 5, поглављу 6 и поглављу 7 докторске дисертације подразумевају интелигентно управљање индустријских робота на бази информација добијених од камере и савремених *computational intelligence* техника машинског учења. Резултати остварени у оквиру свих спроведених истраживања потврђују актуелност и значај докторске дисертације за научно-стручну јавност, како у Србији тако и у свету.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У предметној докторској дисертацији коришћена је обимна литература из области емпиријског управљања, роботике, управљања на основу информација добијених од камере, као и *computational intelligence* техника машинског учења. У литератури преовлађују истраживачки резултати новијег датума, објављени у референтним монографијама, научно-стручним часописима високог ранга и конференцијама међународног значаја, што указује на савременост докторске дисертације. На тај начин, дат је релевантан приказ постојећег стања у домену коме припадају проблеми разматрани у докторској дисертацији. Наведене референце представљају извор информација, знања и полазних основа за генерисање прегледа стања у предметним областима истраживања, као и критичку анализу постојећих метода у домену управљања на основу емпиријских података прикупљених из технолошког окружења. Коришћене референце представљају избор савремене и актуелне литературе на енглеском и српском језику, а уједно указују и на могућности даљег проширења научног сазнања у областима истраживања приказаних у докторској дисертацији, и то кроз наглашено критички приступ.

3.3.Опис и адекватност примењених научних метода

У докторској дисертацији су примењене савремене научноистраживачке методе при теоријском и експерименталном истраживању у домену емпиријског управљања интелигентних роботских система. Развијени оригинални хибридни управљачки алгоритми интелигентног мобилног робота и робота вертикалне зглобне конфигурације базирани су, у основи, на познатим алгоритмима машинског учења и визуелног управљања као што су: *Q*-учење, *SARSA* алгоритам, неуронски алгоритам *Q*-учења, неуронски *SARSA* алгоритам, метода управљања на основу грешке у параметрима слике (енгл. *Image-based visual servoing*), метода управљања на основу издвојених карактеристика са слике које су коришћене за естимацију положаја карактеристичног објекта у односу на координатни систем камере (енгл. *Position-based visual servoing*), метода управљања на основу епиполарне геометрије (енгл. *Epipolar visual control*), метода управљања на основу хомографије (енгл. *Homography visual control*) и метахеуристички алгоритам оптимизације колонијом свитаца (енгл. *Firefly algorithm*). Предности наведених девет алгоритама и метода искоришћене су за генерисање нових приступа управљању интелигентних робота у циљу постизања аутономног понашања система у домену изабраног комплексног технолошког задатка. Адекватност примењених метода оправдана је потврдом високе тачности добијених резултата и њиховим поређењем са резултатима наведеним у референтној литератури.

3.4. Применљивост остварених резултата

Резултати докторске дисертације, поред евидентне научне вредности, имају и широку практичну примену, пре свега у домену роботизованог унутрашњег транспорта сировина, полуфабриката, материјала и готових делова, што је потврђено и кроз реализована техничка

решења. На основу оригиналних алгорита емперијског управљања могуће је извршити напредно увођење и имплементацију интелигентних мобилних робота за потребе обављања унутрашњег транспорта у технолошком окружењу. Сви новоразвијени алгоритми управљања мобилног робота (укупно 5 оригиналних алгорита представљених у потпоглављу 3.6, потпоглављу 4.5, поглављу 5, поглављу 6, као и поглављу 7 докторске дисертације) не изискују додатну транспортну инфраструктуру или вештачке карактеристичне објекте (вештачки одређене маркере) који би били постављени у радном окружењу. Такође, посебно значајну предност нових метода управљања представља решавање проблема видног поља камере, тј. проблема у области управљања на бази повратне информације добијене од камере који се односи на случај у коме карактеристични објекти нису у видном пољу камере. Истовремено, увођењем техника машинског учења у управљачки систем мобилног робота, елиминисан је потенцијално нежељени утицај различитих типова поремећаја (елиминисана је зависност прорачуна управљања од: промене амбијенталног осветљења, перформанси алгоритма детекције карактеристичних објеката, параметара калибрационе матрице - резолуције, величине пискела и фокалне дужине камере, утицаја шума у процесу аквизиције сигнала, естимације положаја 3D објекта у односу на координатни систем камере, прорачуна епипола и фундаменталне матрице, као и постојања равни хомографије у 3D сцени).

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат је током израде ове докторске дисертације показао да је у стању да самостално решава проблеме и да успешно влада савременим научним сазнањима и методама, што представља основу за даљи веома успешан научноистраживачки рад. То се посебно огледа кроз оригиналност у научном приступу комплексним проблемима управљања робота различитих структура, а што је верификовано и изузетним научним референцама и цитираношћу.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Остварени научни доприноси настали као резултат истраживања у оквиру предметне докторске дисертације огледају се кроз развој и експерименталну верификацију следећих 5 оригиналних алгорита управљања интелигентних робота:

- Метода емперијског управљања мобилног робота (потпоглавље 3.6). Нова метода базирана на машинском учењу ојачавањем тестирана је кроз развој симулације у *MATLAB®* софтверском пакету (симулација се базира на кодовима сопственог развоја). Верификација развијеног система емперијског управљања извршена је у лабораторијском моделу технолошког окружења применом *LEGO Mindstorms NXT* мобилног робота у домену задатака навигације, локализације и избегавања препрека.
- Хибридни алгоритам управљања мобилног робота се састоји од две независне управљачке петље (потпоглавље 4.5). Развојем две фазе управљања транспортни задатак је раздвојен на два дела: кретање од почетног положаја до положаја на великој удаљености од машине алатке (глобално управљање) и кретање од овог положаја до машине алатке/међускадишта (локално управљање). Оригинални управљачки систем на бази епиполарне геометрије имплементиран је на мобилном роботу *Kheperall* (са додатном опремом: хватачем *KheGrip*, и *WEB* камером *Prestigio PWC 2*) у лабораторијском моделу технолошког окружења.
- Хибридни управљачки систем робота вертикалне зглобне конфигурације *NeuroArm Manipulator System* засниван на машинском учењу ојачавањем и управљању на бази грешке у параметрима слике (поглавље 5). Оригинални интелигентни систем се састоји од две независне фазе управљања. У првој фази оријентација робота вертикалне зглобне конфигурације је коригована како би изабрани карактеристични

објекат припадао жељеној области у равни слике, док друга фаза обухвата приступање тродимензионалном објекту уз кориговање оријентације у зависности од положаја карактеристичних објеката на слици.

- Емпиријски управљачки систем мобилног робота на бази машинског учења демонстрацијом и епиполарне геометрије (поглавље 6). Аналогно решењу представљеном у поглављу 5, нови емпиријски алгоритам управљања обухвата две независне фазе: *offline* (односи се на обучавање укупно 18 различитих архитектура вештачких неуронских мрежа коришћењем 6 најзаступљенијих алгоритама учења) и *online* која се односи на задатак визуелног навођења мобилног робота у лабораторијском моделу технолошког окружења. Експеримент обухвата имплементацију развијеног емпиријског управљачког система на мобилном роботу *Kheperall* (са камером *KheCMUCam* и хватачем *KheGrip*) у домену визуелног управљања у оквиру технолошког задатка приступања радном предмету.
- Хибридни управљачки систем мобилног робота на бази алгоритма оптимизације колонијом свитаца и хомографије (поглавље 7). У овом делу докторске дисертације, уводе се два независна проблема управљања у домену унутрашњег транспорта материјала: (i) репродукција жељене трајекторије до положаја дефинисаног у равни слике, и (ii) визуелно управљање на бази хомографије и машинског учења демонстрацијом. *Метахеуристички алгоритам оптимизације колонијом свитаца* имплементиран је у оквиру машинског учења демонстрацијом у циљу решавања поменутих проблема.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

У оквиру истраживања спроведених у овој докторској дисертацији предложене су и развијене нове методе за решавање полазних проблема. Развијен је алгоритам емпиријског управљања на бази машинског учења ојачавањем за потребе избегавања препрека, навигације и локализације LEGO Mindstorms NXT мобилног робота у технолошком окружењу. Експериментални и симулациони резултати су недвосмислено потврдили да се новоразвијени алгоритам емпиријског управљања може применити за генерисање управљачких команди у *online* режиму. Оригинални хибридни алгоритам управљања мобилног робота који се састоји од две независне управљачке петље, имплементиран на мобилном роботу Kheperall са додатном опремом, омогућио је успешно обављање транспортног задатка, који се састоји од навигације мобилног робота између различитих машина алатки/међускадишта и преузимања/постављања радног предмета. У циљу елиминације недостатака управљања на бази грешке у параметрима слике (зависност управљачког закона од резолуције слике, величине пиксела и фокалне дужине), развијен је нови хибридни алгоритам на бази машинског учења ојачавањем. Експериментални резултати, остварени на антропоморфном роботу *NeuroArm Manipulator System* са компатибилном камером *CMUCam3*, потврдили су робустност развијеног емпиријског алгоритма управљања са аспекта елиминисања утицаја наведених недостатака. Аналогно овом решењу, оригинални емпиријски управљачки систем мобилног робота на бази машинског учења демонстрацијом, система вештачких неуронских мрежа и епиполарне геометрије се показао веома успешним са становишта елиминације утицаја поремећаја као што су: (i) промена осветљења у окружењу, (ii) постојање шума у процесу аквизиције сигнала, и (iii) избор технике естимације растојања до препознатих објеката. Резултати су показали да се вештачка неуронска мрежа, обучена алгоритмом *Бајесове регуларизације*, показала оптималном, и то са аспекта генерисања управљачких команди за промену положаја робота. Пети оригинални алгоритам управљања односи се на репродукцију и праћење трајекторије жељеног облика и визуелно навођење интелигентног мобилног робота. Резултати експеримента на мобилном роботу *Kheperall* (са камером *KheCMUCam* и хватачем *KheGrip*) потврђују да робот прати оптималну трајекторију у реалном времену, као и да је могуће успешно реализовати приступање и хватање радног предмета, а затим и његово одлагање на машини алатки у лабораторијском моделу технолошког окружења.

4.3. Верификација научних доприноса

Научни допринос докторске дисертације је верификован бројним радовима објављеним у референтним научним часописима и на престижним конференцијама у земљи и иностранству:

M21 Научни рад у врхунском међународном часопису (SCI-Web of Science®)

- [1] Miljković,Z., Mitić,M., Lazarević,M., Babić,B., **Neural Network Reinforcement Learning for Visual Control of Robot Manipulators**, *Expert Systems with Applications* (ISSN 0957-4174), Vol. 40 Issue: 5, pp. 1721-1736, Elsevier, April 2013. (Available online: 9 October 2012; DOI: 10.1016/j.eswa.2012.09.010); <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417412010640> (Science Citation Index-Web of Science® – IF = 1,854 (2012) → M21; извор KoBSON)

Овај рад, објављен у врхунском међународном часопису, цитиран је у другом врхунском међународном часопису (M21) са SCI листе:

Zhong, X., Zhong, X., Peng, X., Robust Kalman filtering cooperated elman neural network learning for vision-sensing-based robotic manipulation with global stability, *Sensors*, Vol. 13, Issue 10, pp. 13464-13486, 2013. (Available online: <http://www.mdpi.com/1424-8220/13/10/13464/pdf>).

M22 Научни рад у истакнутом међународном часопису (SCI-Web of Science®)

- [2] Miljković,Z., Vuković,N., Mitić,M., Babić,B., **New Hybrid Vision-Based Control Approach for Automated Guided Vehicles**, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (Print ISSN 0268-3768), Vol. 66 Issues: 1-4, pp. 231-249, Springer-Verlag London Ltd., April 2013. <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00170-012-4321-y> (Online ISSN 1433-3015 Available online: 6 July 2012 First™ Articles; DOI: 10.1007/s00170-012-4321-y), (Science Citation Index-Web of Science® – IF = 1,205 (2012) → M22; извор KoBSON)

Овај рад, објављен у истакнутом међународном часопису, цитиран је у зборнику међународне конференције (M33):

Szabo, T., Vajda, T., Robot detection based on visual information, 23rd International Conference on Computers and Education, Sibiu, Romania, October 2013.

M23 Научни рад у међународном часопису (SCI-Web of Science®)

- [3] Mitić,M., Miljković,Z., **Neural network learning from demonstration and epipolar geometry for visual control of a nonholonomic mobile robot**, *Journal Soft Computing* (ISSN 1432-7643), Article in press, Springer, <http://rd.springer.com/article/10.1007/s00500-013-1121-8> (Available online: 12 September 2013; DOI: 10.1007/s00500-013-1121-8), (Science Citation Index-Web of Science® – IF = 1,124 (2012) → M23; извор KoBSON)

M51 Научни рад у водећем часопису националног значаја

- [4] Mitić,M., Miljković,Z., Babić,B., **Empirical Control System Development for Intelligent Mobile Robot Based on the Elements of the Reinforcement Machine Learning and Axiomatic Design Theory**, *FME Transactions* (ISSN 1451-2092), New Series, Vol.39 No.1, pp. 1-8, (SCOPUS), University of Belgrade – Faculty of Mechanical Engineering, 2011.

M33 Радови саопштени на скуповима међународног значаја, штампани у целини

- [5] Mitić,M., Miljković,Z., Vuković,N., Babić,B., Diryag,A., **Prediction of Robot Execution Failures Using Neural Networks**, *Proceedings of the 35th International Conference on Production Engineering*, pp. 335-339, Kopaonik, Serbia, 2013.

- [6] Vuković,N., Miljković,Z., Mitić,M., Petrović,M., Husen,A., **Neural Extended Kalman Filter for State Estimation of Automated Guided Vehicle in Manufacturing Environment**, Proceedings of the 35th International Conference on Production Engineering, pp. 331-335, Kopaonik, Serbia, 2013.
- [7] Mitić,M., Miljković,Z., Vuković,N., Lazarević,I., **Visual Control of a Mobile Robot Using Homography and Learning from Demonstration Methodology**, Proceedings of the 4th Serbian Congress on Theoretical and Applied Mechanics, pp. 675-680, Vrnjačka Banja, Serbia, 4-7 June, 2013.
- [8] Vuković,N., Miljković,Z., Mitić,M., Petrović,M., **Learning Motion Trajectories of Differential Drive Mobile Robot Using Gaussian Mixtures and Hidden Markov Model**, Proceedings of the 4th Serbian Congress on Theoretical and Applied Mechanics, pp. 165-170, Vrnjačka Banja, Serbia, 4-7 June, 2013.
- [9] Mitić,M., Miljković,Z., Lazarević,M., Babić,B., Lazarević,I., **Image-Based Visual Servo Control of Robot Manipulator Under Parameter Uncertainties**, Proceedings of the 29th Danubia-Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics, pp. 174-177, Belgrade, 26-29 September, 2012.
- [10] Vuković,N., Miljković,Z., Mitić,M., Babić,B., Lazarević,I., **Autonomous Navigation of Automated Guided Vehicle Using Monocular Camera**, Proceedings of the 11th International Scientific Conference MMA 2012 – Advanced Production Technologies, pp. 301-304, Novi Sad, Serbia, 20-21 September, 2012.
- [11] Miljković,Z., Mitić,M., Babić,B., Diryag,A., **Q-Learning Algorithm for a Mobile Robot Obstacle Avoidance in an Unknown Environment Based on Artificial Neural Networks**, Proceedings of the 4th International Conference on Manufacturing Engineering (ICMEN 2011), pp. 431-440, Thessaloniki, Greece, 3-5 October, 2011.
- [12] Mitić,M., Miljković,Z., Babić,B., Majstorović,V., **Q-Learning Framework as a Solution for an Obstacle Avoidance Problem in Unknown Environment**, Introduction paper presented at the 6th International Working Conference "Total Quality Management – Advanced and Intelligent Approaches", Published in Conference Proceedings (ISBN 978-86-7083-727-0), pp. 463-468, 7-11 June 2011, and in International Journal *Total Quality Management & Excellence* (ISSN 2217-5768), Vol. 39 No. 2, pp. 21-25, Belgrade, Serbia, 2011.

M63 Радови саопштени на скуповима националног значаја, штампани у целини

- [13] Митић,М., Миљковић,З., Бабић,Б., **Емпиријско управљање интелигентног роботског система – преглед стања у области истраживања**, 38. ЈУПИТЕР Конференција, 34. симпозијум „НУ-РОБОТИ-ФТС“, Зборник радова - CD, стр. 3.149-3.158 , Београд, 15-16. мај 2012.
- [14] Бабић,Б., Миљковић,З., Бугарић,У., Бојовић,Б., Вуковић,Н., Митић,М., Петровић, М., **Примена интелигентних технолошких система за производњу делова од лима заснована на еколошким принципима - преглед резултата истраживања на пројекту ТР-35004**, 38. ЈУПИТЕР Конференција, Уводни рад, Зборник радова – CD, стр. УР.67-УР.75, Београд, 15-16. мај, 2012.
- [15] Митић,М., Миљковић,З., Вуковић,Н., Лазаревић,И., **Концепцијско решење управљања мобилног робота у домену унутрашњег транспорта материјала интелигентног технолошког система**, 37. ЈУПИТЕР Конференција, 39. симпозијум „УПРАВЉАЊЕ ПРОИЗВОДЊОМ У ИНДУСТРИЈИ ПРЕРАДЕ МЕТАЛА“, Зборник радова - CD, стр. 4.23-4.28, Београд, 10-11. мај 2011.

- [16] Митић,М., Миљковић,З., Вуковић,Н., Бабић,Б., Лазаревић,И., **Нови хибридни емпиријски управљачки систем интелигентног робота вертикалне зглобне конфигурације базиран на информацијама од камере** (нова метода: обухвата интеграцију интелигентног система базираног на емпиријски прикупљеним информацијама добијеним од камере и класичног управљачког система робота на бази грешке која је у корелацији са параметрима слике, а развијана је у пројекту TR-35004 МПН Владе Републике Србије).
- [17] Вуковић,Н., Миљковић,З., Митић,М., Бабић,Б., Петровић,М., **Хибридни управљачки алгоритам за управљање и естимацију положаја интелигентног мобилног робота базираног на калибрисаној камери** (нова метода: за управљање и естимацију положаја мобилног робота развијана у пројекту TR-35004 Министарства просвете и науке Владе Републике Србије).
- [18] Митић,М., Миљковић,З., Вуковић,Н., Бабић,Б., **Емпиријско управљање интелигентног мобилног робота на бази машинског учења демонстрацијом и хомографије добијене од некалибрисане камере** (нова метода: се односи на решавање проблема управљања интелигентног мобилног робота применом емпиријске управљачке теорије на бази машинског учења демонстрацијом и хомографије добијене од некалибрисане камере, а развијана је у пројекту TR-35004 МПНТР Владе Републике Србије).
- [19] Вуковић,Н., Миљковић,З., Митић,М., Петровић,М., **Нови алгоритам за симултано оцењивање положаја мобилног робота и положаја карактеристичних објеката базиран на неуронском линеаризованом Калмановом филтру и сензорској информацији добијеној од калибрисане камере** (нова метода: која решава проблем симултаног оцењивања положаја мобилног робота и карактеристичних објеката у технолошком окружењу током обављања транспортног задатка у оквиру система унутрашњег транспорта сировина, полуфабриката, материјала и готових делова, развијана у пројекту TR-35004 МПНТР Владе Републике Србије).
- [20] Митић,М., Миљковић,З., Вуковић,Н., Лазаревић,И., **Праћење жељене трајекторије и визуелно навођење мобилног робота у технолошком окружењу на бази биолошки инспирисаног метахеуристичког алгоритма** (нова метода развијана у пројекту TR-35004 МПНТР Владе Републике Србије).

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација под називом „ЕМПИРИЈСКО УПРАВЉАЊЕ ИНТЕЛИГЕНТНОГ МОБИЛНОГ РОБОТА БАЗИРАНО НА МАШИНСКОМ УЧЕЊУ“ кандидата Марка Митића, дипл.инж.маш., представља актуелан и утемељен научно-истраживачки рад високог ранга, са оствареним евидентним оригиналним научним доприносом, који уз анализу разматраних проблема и кроз свеобухватно сагледавање тематике пројектовања управљачких система на бази сопственог искуства робота стеченог кроз интеракцију са окружењем, применом техника машинског учења уз информације добијене од спољашњих сензора, омогућава успешну напредну примену интелигентних мобилних робота за унутрашњи транспорт у технолошком окружењу.

На основу остварених резултата који су приказани у докторској дисертацији, сходно чињеници да је анализирана проблематика мултидисциплинарна и веома актуелна у научној јавности, констатује се да је кандидат Марко Митић, дипл.инж.маш., завршио докторску дисертацију у складу са предвиђеним предметом и постављеним циљевима докторске дисертације, уз нагласак на то да су успешно доказане хипотезе да је: (i) могуће развити управљачки систем интелигентног роботског система који има способности машинског учења и прилагођавања реалним условима за карактеристичне проблеме навигације и избегавања препрека у реалном технолошком окружењу, (ii) имплементацијом савремених *computational*

intelligence техника машинског учења у процес развоја емпиријског управљачког система могуће да се обезбеди ефикасно учење мобилног робота током фазе истраживања технолошког окружења у циљу реализације аутономног понашања у домену комплексног задатка локализације (одређивања позиције и оријентације) робота у лабораторијском моделу технолошког система, и (iii) развојем хибридног емпиријског управљачког система интелигентног мобилног робота на бази информација добијених од камере, односно на основу грешке која је у корелацији са параметрима слике (енгл. *Image-based visual servoing*), могуће обезбедити интелигентну роботизовану манипулацију радним предметима (припремак, обрадак, израдак, готов део) у оквиру технолошких система за производњу делова од лима.

На основу прегледа и оцене докторске дисертације кандидата

Марка Митића, дипл.инж.маш.

са темом

**Емпиријско управљање интелигентног мобилног робота
базирано на машинском учењу,**

Комисија за оцену и одбрану закључује да је урађена докторска дисертација написана према свим стандардима и позитивној пракси у научно-истраживачком раду, као и то да испуњава све услове предвиђене Законом о високом образовању и да је у складу са Статутом и Правилником о докторским студијама Машинског факултета у Београду.

Сходно члану 37. Правилника о докторским студијама Машинског факултета у Београду Комисија предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета у Београду да овај Реферат прихвати, дисертацију стави на увид јавности и упуту реферат на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, а да се након тога кандидат позове на јавну одбрану.

С поштовањем,

Чланови Комисије:

У Београду, 28.01.2014. године

Др Зоран Миљковић, редовни професор, ментор
Универзитет у Београду - Машински факултет

Др Бојан Бабић, редовни професор
Универзитет у Београду - Машински факултет

Др Живана Јаковљевић, доцент
Универзитет у Београду - Машински факултет

Др Радиша Јовановић, доцент
Универзитет у Београду - Машински факултет

Др Жарко Ћојбашић, редовни професор
Универзитет у Нишу - Машински факултет

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ –
Број:219/3
Датум: 06.02.2014. године
Београд, Краљице Марије бр. 16

На основу члана 63. Статута Машинског факултета Универзитета у Београду број 1876/1 од 04.10.2013. године и члана 37. Правилника о докторским студијама, Наставно-научно веће на седници одржаној 06.02.2014. године, донело је

ОДЛУКУ

I Прихвата се извештај о позитивној оцени урађене докторске дисертације коју је поднео **МАРКО МИТИЋ**, дипл.инж.маш. и одобрава јавна одбрана дисертације по добијању сагласности од Универзитета, под насловом: **„ЕМПИРИЈСКО УПРАВЉАЊЕ ИНТЕЛИГЕНТНОГ МОБИЛНОГ РОБОТА БАЗИРАНО НА МАШИНСКОМ УЧЕЊУ“**

II Универзитет је дана 17.09.2012. године, својим актом број 06-20264/29-12 дао сагласност на предлог теме докторске дисертације кандидата.

III Радови кандидата у часопису међународног значаја:

- [1] Miljković,Z., Mitić,M., Lazarević,M., Babić,B., **Neural Network Reinforcement Learning for Visual Control of Robot Manipulators**, *Expert Systems with Applications* (ISSN 0957-4174), Vol. 40 Issue: 5, pp. 1721-1736, Elsevier, April 2013. (Available online: 9 October 2012; DOI: 10.1016/j.eswa.2012.09.010); <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417412010640> (Science Citation Index-Web of Science® – IF = 1,854 (2012) → M21; извор KoBSON)
- [2] Miljković,Z., Vuković,N., Mitić,M., Babić,B., **New Hybrid Vision-Based Control Approach for Automated Guided Vehicles**, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (Print ISSN 0268-3768), Vol. 66 Issues: 1-4, pp. 231-249, Springer-Verlag London Ltd., April 2013. <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00170-012-4321-y> (Online ISSN 1433-3015_Available online: 6 July 2012_First™ Articles; DOI: 10.1007/s00170-012-4321-y), (Science Citation Index-Web of Science® – IF = 1,205 (2012) → M22; извор KoBSON)
- [3] Mitić,M., Miljković,Z., **Neural network learning from demonstration and epipolar geometry for visual control of a nonholonomic mobile robot**, *Journal Soft Computing* (ISSN 1432-7643), Article in press, Springer, <http://rd.springer.com/article/10.1007/s00500-013-1121-8> (Available online: 12 September 2013; DOI: 10.1007/s00500-013-1121-8), (Science Citation Index-Web of Science® – IF = 1,124 (2012) → M23; извор KoBSON)

Одлуку доставити: кандидату, ментору, Катедри за производно машинство и архиви факултета.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Проф.др Милорад Милованчевић