

Факултет Машински

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

1860/6
(Број захтева)

Веће научних области техничких наука
(Назив већа научне области коме се захтев упућује)

24.12.2020.
(Датум)

ЗАХТЕВ

за давање сагласности на одлуку о прихватању теме докторске дисертације и о одређивању ментора

Молимо да, сходно члану 47. ст. 5. тач. 3. Статута Универзитета у Београду ("Гласник Универзитета", број 186/15-пречишћени текст и 189/16), дате сагласност на одлуку о прихватању теме докторске дисертације:

- «ВИЗУЕЛНО УПРАВЉАЊЕ МОБИЛНОГ РОБОТА БАЗИРАНО НА БИОЛОШКИ
ИНСПИРИСАНИМ ТЕХНИКАМА ВЕШТАЧКЕ ИНТЕЛИГЕНЦИЈЕ»

(пун назив предложене теме докторске дисертације)

НАУЧНА ОБЛАСТ Производно машинство

ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ:

- Име, име једног од родитеља и презиме кандидата:
Александар (Владан) Јокић
- Претходно образовање (назив и седиште факултета, студијски програм):
Машински факултет Београд,
машинско инжењерство
- Година завршетка претходног нивоа студија: 2017.
- Година уписа на докторске студије: 2017.
- Назив студијског програма докторских студија: Машинско инжењерство

ПОДАЦИ О МЕНТОРУ:

Име и презиме: **др Милица Петровић**
Звање: **доцент**

Списак радова објављених у научним часописима са Science Citation Index (SCI) листе који квалификују ментора за вођење докторске дисертације:

- [1] **Petrović, M.,** Miljković, Z., Jokić, A., **A novel methodology for optimal single mobile robot scheduling using whale optimization algorithm, *Applied Soft Computing* (ISSN 1568-4946), Vol. 81, 105520, August 2019, Elsevier, (Science Citation Index-Web of Science® – IF = 5.472 (2019) → M21a; извор KoBSON).**
- [2] Vuković, N., **Petrović, M.,** Miljković, Z., **A comprehensive experimental evaluation of orthogonal polynomial expanded random vector functional link neural networks for regression, *Applied Soft Computing* (ISSN 1568-4946), Vol. 70, pp. 1083-1096, September 2018, Elsevier, (Science Citation Index-Web of Science® – IF = 4.873 (2018) → M21; извор KoBSON).**
- [3] Mitić, M., Vuković, N., **Petrović, M.,** Miljković, Z., **Chaotic metaheuristic algorithms for learning and reproduction of robot motion trajectories, *Neural Computing and Applications* (ISSN 0941-0643), Vol. 30 Issue: 4, pp. 1065-1083, August 2018, Springer-Verlag London Ltd., United Kingdom, (Science Citation Index-Web of Science® – IF = 4.664 (2018) → M21; извор KoBSON).**
- [4] Miljković, Z., **Petrović, M.,** **Application of modified multi-objective particle swarm optimisation algorithm for flexible process planning problem, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* (Print ISSN: 0951-192X), Vol. 30 Issue: 2-3, pp. 271-291, Taylor & Francis Group, United Kingdom, 2017, (Science Citation Index-Web of Science® – IF = 1.995 (2017) → M22; извор KoBSON).**
- [5] **Petrović, M.,** Vuković, N., Mitić, M., Miljković, Z., **Integration of process planning and scheduling using chaotic particle swarm optimization algorithm, *Journal Expert Systems with Applications* (ISSN 0957-4174), Vol. 64, pp. 569-588, Elsevier, December 2016, (Science Citation Index-Web of Science® – IF = 3.928 (2016) → M21a; извор KoBSON).**
- [6] **Petrović, M.,** Mitić, M., Vuković, N., Miljković, Z., **Chaotic particle swarm optimization algorithm for flexible process planning, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (Print ISSN 0268-3768), Vol. 85 Issue: 9, pp. 2535-2555, Springer-Verlag London Ltd., August 2016. (Online ISSN 1433-3015), (Science Citation Index-Web of Science® – IF = 2.209 (2016) → M22; извор KoBSON).**
- [7] Mitić, M., Vuković, N., **Petrović, M.,** Miljković, Z., **Chaotic fruit fly optimization algorithm, *Knowledge-Based Systems* (ISSN 0950-7051), Vol. 89, pp. 446-458, Elsevier, November 2015, (Science Citation Index-Web of Science® – IF = 3.325 (2015) → M21; извор KoBSON).**
- [8] **Petrović, M.,** Miljković, Z., Babić, B., Vuković, N., Čović, N., **Towards a Conceptual Design of Intelligent Material Transport Using Artificial Intelligence, *Strojarstvo* (ISSN 0562-1887), UDK: 62(05)=862=20=30, Vol. 54 Issue: 3, pp. 205-219, Published by Croatian Union of Mechanical Engineers and Naval Architects, June 2012, (Science Citation Index-Web of Science® – IF = 0.222 (2010) → M23; извор KoBSON).**

Наставно – научно веће

Обавештавамо вас да је

(назив надлежног тела факултета)

на седници одржаној 24.12.2020. године размотрило предложену тему и закључило да је тема подобна за израду докторске дисертације јер садржи оригиналну идеју и да је од значаја за развој науке, примену њених резултата, односно развој научне мисли уопште.

ДЕКАН ФАКУЛТЕТА

Прилог 1. Одлука Наставно-научног већа о прихватању теме и одређивању ментора

2. Извештај Комисије о оцени научне заснованости теме докторске дисертације

Напомена: Факултет доставља Универзитету захтев са прилозима у електронској форми и у једном писаном примерку за архиву Универзитета

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ -
Број: 1860/5
Датум: 24.12.2020. године
Београд, Краљице Марије 16

На основу захтева студента **Александра Јокића**, магист. инж. маш., бр. 1731/1 од 16.11.2020. године да му се одобри израда докторске дисертације, реферата Комисије у саставу: др Зоран Миљковић, ред. проф., др Бојан Бабић, ред. проф., др Живана Јаковљевић, ред. проф., др Никола Славковић, ванр. проф., и др Жарко Ђојбашић, ред. проф. Машински факултет у Нишу, а на основу члана 40. Закона о високом образовању („Службени гласник РС“, бр. 88/2017, 73/2018, 27/2018 - др. закон, 67/2019 и 6/20 - др. закон), члана 64. Статута Машинског факултета (број 1450/4 од 14.06.2018. године) и члана 30. Правилника о докторским студијама Машинског факултета, Наставно-научно веће Машинског факултета на седници од 24.12.2020. године, донело је следећу

ОДЛУКУ

- Прихвата се научна заснованост теме докторске дисертације и констатује да студент **Александар Јокић**, магист. инж. маш. испуњава услове за израду докторске дисертације **«ВИЗУЕЛНО УПРАВЉАЊЕ МОБИЛНОГ РОБОТА БАЗИРАНО НА БИОЛОШКИ ИНСПИРИСАНИМ ТЕХНИКАМА ВЕШТАЧКЕ ИНТЕЛИГЕНЦИЈЕ»**

Одлуком ННВ број 1860/3, од 10.12.2020. године за ментора докторске дисертације Александра Јокића, магист. инж. маш. именована је др Милица Петровић, доцент.

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

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф. др Радивоје Митровић

Предмет: Реферат Комисије о подобности теме и кандидата **Александра Јокића, маг.инж.маш.** за израду докторске дисертације по одлуци Наставно-научног већа број 1860/2 од 10.12.2020. године.

На основу поднете пријаве за израду докторске дисертације кандидата Александра Јокића, маг.инж.маш., број 1731/1 од 16.11.2020. године, дате сагласности Наставничког колегијума Катедре за производно машинство број 1860/1 од 01.12.2020. године и Одлуке Наставно-научног већа Машинског факултета Универзитета у Београду број 1860/2 од 10.12.2020. године именовани смо за чланове Комисије за подношење реферата о подобности теме и кандидата **Александра Јокића, маг.инж.маш.** за израду докторске дисертације.

Увидом у документацију, коју је докторанд Александар Јокић, маг.инж.маш., приложио уз свој захтев за израду докторске дисертације, после разматрања, Комисија подноси следећи

РЕФЕРАТ
о теми докторске дисертације
под насловом

**Визуелно управљање мобилног робота базирано на
биолошки инспирисаним техникама вештачке интелигенције**

1. ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

1.1 Општи биографски подаци

Александар (Владан) Јокић, маг.инж.маш., рођен је 16. октобра 1993. године у Београду, Република Србија. Основну школу „Ђуро Стругар“ и средњу школу „Политехника – школа за нове технологије“ завршио је у Београду.

На Машински факултет Универзитета у Београду уписао се школске 2012/2013. године. Основне академске студије завршио је 2015. године, одбранивши завршни рад (BSc) са оценом 10 (десет) из предмета CAD/CAM системи и просечном оценом током Основних академских студија 8.38 (осам и 38/100). Школске 2015/2016. године уписао је Мастер академске студије на Катедри за производно машинство, а исте завршио 22. септембра 2017. године са оценом 10 (десет) и просечном оценом током Мастер академских студија 9.30 (девет и 30/100), одбранивши мастер рад (MSc) на тему „Визуелно управљање интелигентног мобилног робота у функцији терминирања унутрашњег транспорта“ из предмета Интелигентни технолошки системи, под менторством проф. др Зорана Миљковића.

Након дипломирања, у школској 2017/2018. години, уписао је Докторске академске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду (број индекса Д31/17). Током првог семестра Докторских академских студија утврђени су његови правци научноистраживачког рада на Катедри за производно машинство, да би одлуком број 183/1 од 24.01.2018. године био озваничен и Програм усавршавања, који се реализује под руководством потенцијалног ментора доц. др Милице Петровић. Кандидат је положио све испите на Докторским академским студијама Машинског факултета у Београду и тренутно је студент V семестра.

У звање истраживач-приправник изабран је 22. фебруара 2018. године, а од 1. маја 2018. године остварује право на стипендију за Докторске академске студије и тиме стиче статус Стипендисте Министарства просвете, науке и технолошког развоја, број уговора 451-03-1709/1709/2018-14/ев. број 2316. Од 6. маја 2019. године, запослен је на Машинском факултету у Београду, као истраживач-приправник, и то на пројекту технолошког развоја под називом „Иновативни приступ у примени интелигентних технолошких система за производњу делова од лима заснован на еколошким принципима“, који је финансирало Министарство просвете, науке и технолошког развоја Владе Републике Србије (ев. бр. ТР-35004, руководилац пројекта проф. др Бојан Бабић), закључно са 31. децембром 2019. године. Кандидат је, од 1. јануара 2020. године, запослен и даље на Машинском факултету у Београду, такође у својству истраживача-приправника, и то на Катедри за производно машинство, у оквиру пројекта под називом „Интегрисана истраживања у области макро, микро и нано машинског инжењерства“, односно потпројекта „Дубоко машинско учење интелигентних технолошких система у производном машинству“, а који је финансиран од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја Владе Републике Србије, према уговору о реализацији и финансирању научноистраживачког рада НИО у 2020. години (ев. бр. 451-03-68/2020-14/200105, руководилац пројекта проф. др Радивоје Митровић). Након тога, кандидат је од 1. септембра 2020. године ангажован и на пројекту под називом „Deep Machine Learning and Swarm Intelligence-based Optimization Algorithms for Control and Scheduling of Cyber-Physical Systems in Industry 4.0“ (акроним - MISSION4.0, ев. бр. 6523109, руководилац пројекта проф. др Зоран Миљковић), који финансира Фонд за науку Републике Србије у оквиру позива „Програм за развој пројеката из области вештачке интелигенције“.

За постигнуте резултате, током похађања Мастер академских и Докторских академских студија, добио је следеће похвале и захвалнице:

2016-2017. Похвала поводом Дана Машинског факултета у Београду за одличан успех постигнут на првој и другој години Мастер академских студија (школска 2015/16. и 2016/17. година).

2020. Захвалница Централног института за конзервацију, поводом учествовања и публикавања радова на конференцији под називом „Multidisciplinary approach to contemporary research“.

Од самог почетка Докторских академских студија, почевши од јесењег семестра школске 2017/2018. године, докторанд Александар Јокић, активно је укључен у наставни процес Катедре за производно машинство Машинског факултета Универзитета у Београду. Кандидат реализује све видове вежби (аудиторне вежбе, лабораторијске вежбе, преглед самосталних задатака, преглед пројеката) на следећим наставним предметима Катедре:

2017-... Компјутерска симулација и вештачка интелигенција (ОАС),
Завршни предмет – Компјутерска симулација и вештачка интелигенција (ОАС),
Методе одлучивања (МАС) и
Интелигентни технолошки системи (МАС).

У школској 2019/2020. години кандидат учествује, као сарадник у настави на енглеском језику, у наставном процесу следећих предмета Катедре за производно машинство:

Decision-making methods (МАС), и
Artificial Intelligence & Machine Learning (ДАС).

Такође, учествује у извођењу наставе у својству сарадника на модулу Индустрија 4.0, на следећем предмету:

2020-... Роботика и вештачка интелигенција (MAC).

Познавање страних језика

- Енглески језик – говори, чита и пише.

Познавање рада на рачунару

- Напредно коришћење следећих програмских језика и софтверских пакета: Microsoft Office (Word, Excel, PowerPoint, Visio), AutoCAD, SolidWorks, MATLAB, програмски језик C, CoppeliaSim/Vrep, AnyLogic, CorelDRAW.

Истраживачке области

- Производно машинство, Интелигентни технолошки системи, Роботика, Визуелно управљање, Дубоко машинско учење, Биолошки инспирисане технике вештачке интелигенције, Оптимизација, Мехатроника.

Остало

- Возачка дозвола за Б категорију возила,
- Члан удружења MENSA Србија.

1.2 Активности на Докторским академским студијама

Кандидат Александар Јокић, магистар инжењерских наука, уписао је Докторске академске студије на Машинском факултету у Београду школске 2017/2018. године. У циљу реализације Програма усавршавања, положио је следеће обавезне и изборне предмете:

Први семестар Докторских академских студија

Назив предмета	Предметни наставник	ЕСПБ	Оцена
<i>Виши курс математике (о*)</i>	Проф. др Слободан Радојевић	5	10 (десет)
<i>Нумеричке методе (о*)</i>	Проф. др Миодраг Спалевић	5	10 (десет)
<i>ОМНИР (организација и методе научно - истраживачког рада) и комуникација (о*)</i>	Проф. др Милош Недељковић	5	10 (десет)
<i>Аквизиција и обрада експерименталних података (и*)</i>	Проф. др Живана Јаковљевић	5	10 (десет)
<i>Истраживање и публикавање - I</i>	Доц. др Милица Петровић	10	10 (десет)

Други семестар Докторских академских студија

Назив предмета	Предметни наставник	ЕСПБ	Оцена
<i>Одабрана поглавља из механике (о*)</i>	Проф. др Зоран Митровић	5	9 (девет)
<i>Аутономни системи и машинско учење (и*)</i>	Проф. др Зоран Миљковић	5	10 (десет)
<i>Биолошки инспирисани алгоритми оптимизације (и*)</i>	Доц. др Милица Петровић	5	10 (десет)
<i>Истраживање и публикавање - II</i>	Доц. др Милица Петровић	15	10 (десет)

Трећи семестар Докторских академских студија

Назив предмета	Предметни наставник	ЕСПБ	Оцена
<i>Системи вештачких неуронских мрежа (и*)</i>	Проф. др Зоран Миљковић	5	10 (десет)
<i>Когнитивна роботика (и*)</i>	Проф. др Зоран Миљковић	5	10 (десет)
<i>Истраживање и публикавање - III</i>	Доц. др Милица Петровић	20	10 (десет)

Четврти семестар Докторских академских студија

Назив предмета	Предметни наставник	ЕСПБ	Оцена
<i>Истраживање и публикавање - IV</i>	Проф. др Зоран Миљковић	8	10 (десет)
<i>Пројекат идеје докторске дисертације</i>	Доц. др Милица Петровић Проф. др Зоран Миљковић Проф. др Живана Јаковљевић	22	10 (десет)

Напомена: о* - обавезни предмет; и* - изборни предмет.

Александар Јокић је на Докторским академским студијама Машинског факултета Универзитета у Београду положио 4 (четири) обавезна и 5 (пет) изборних предмета (сваки вреди по 5 ЕСПБ бодова), чиме је остварио укупно 45 ЕСПБ бодова. Резултати научноистраживачког рада Александра Јокића на Машинском факултету у Београду, реализовани кроз интензиван експериментални рад у Лабораторији за индустријску роботiku и вештачку интелигенцију (Истраживање и публикавање I-IV), а верификовани објављивањем радова, као и учествовање у извођењу наставе на предметима Катедре за производно машинство, указују на то да је кандидат веома успешно остварио још 53 ЕСПБ бодова. Кандидат је успешно написао и одбранио Пројекат идеје докторске дисертације, што је Комисија у саставу доц. др Милица Петровић, проф. др Зоран Миљковић, проф. др Живана Јаковљевић потврдила оценом 10 (десет), а тиме је кандидат стекао још 22 ЕСПБ бодова. Дакле, у складу са чланом 25. Правилника о Докторским академским студијама

Машинског факултета у Београду, кандидат је остварио укупно 120 ЕСПБ бодова, чиме је испунио основни услов да пријави докторску дисертацију. Кандидат већ има објављен научни рад у **међународном часопису изузетних вредности**, са *SCI* листе (**M21a**), као и објављен научни рад у **врхунском часопису националног значаја (M51)**.

1.3 Списак објављених научних радова и других релевантних резултата и активности које опредељују афинитет кандидата за рад на предложеној теми

1.3.1. Радови објављени у научним часописима међународног значаја

- [1] Petrović, M., Miljković, Z., **Jokić, A.**, *A novel methodology for optimal single mobile robot scheduling using whale optimization algorithm*, Applied Soft Computing, 81 (2019), 105520, DOI: 10.1016/j.asoc.2019.105520 (**Science Citation Index-Web of Science® – IF = 5.472 (2019) → M21a**; извор KoBSON)

1.3.2. Научни радови објављени у часописима националног значаја

- [2] **Јокић, А.**, Петровић, М., Миљковић, З., *Методе визуелног управљања роботских система – преглед стања у области истраживања*, Часопис ТЕХНИКА, 67 (6) (2018), стр. 801-816, ISSN 0040-2176, eISSN 256-3086 → **M51**

1.3.3. Радови саопштени на скуповима међународног значаја, штампани у целини

- [3] Đokić, L., **Jokić, A.**, Petrović, M., Miljković, Z., *Biologically Inspired Optimization Methods for Image Registration in Visual Servoing of a Mobile Robot*, Proceedings of the 7th International Conference on Electrical, Electronics and Computing Engineering (IcETRAN 2020), ISBN 978-86-7466-852-8, pp. 715-720, Belgrade, Serbia, 28-29 September, 2020. → **M33**
- [4] Petrović, M., Mystkowski, A., **Jokić, A.**, Đokić, L., Miljković, Z., *Deep Learning-based Algorithm for Mobile Robot Control in Textureless Environment*, 2020 International Conference Mechatronic Systems and Materials (MSM2020), DOI:[10.1109/MSM49833.2020.9201666](https://doi.org/10.1109/MSM49833.2020.9201666) pp. 1-4, Bialystok, Poland, 2020. → **M33**
- [5] Đokić, L., **Jokić, A.**, Petrović, M., Miljković, Z., *Stereo vision-based algorithm for control of nonholonomic mobile robot*, Proceedings of the Third International Student Scientific Conference "Multidisciplinary approach to contemporary research", Central Institute for Conservation, ISBN 978-86-6179-071-3, pp. 69-82, Belgrade, Serbia, 2019. → **M33**
- [6] **Jokić, A.**, Petrović, M., Miljković, Z., *An Improved Particle Swarm Optimization Algorithm for Scheduling of Single Mobile Robot*, Proceedings of the Second International Student Scientific Conference "Multidisciplinary approach to contemporary research", Central Institute for Conservation, ISBN 978-86-6179-062-1, pp. 46-55, Belgrade, Serbia, 2018. → **M33**
- [7] Petrović, M., **Jokić, A.**, Miljković, Z. *Single mobile robot scheduling: a mathematical modeling of the problem with real-world implementation*, Proceedings of the 13th International Scientific Conference MMA 2018 - Flexible Technologies, ISBN 978-86-6022-094-5, pp. 175-178, Novi Sad, Serbia, 2018. → **M31**
- [8] **Jokić, A.**, Petrović, M., Miljković, Z., *Implementation of Image-based visual servoing for nonholonomic mobile robot control*, Proceedings of the First International Student Scientific Conference "Multidisciplinary approach to contemporary research", Central Institute for Conservation, ISBN 978-86-6179-056-0, pp. 223-235, Belgrade, Serbia, 2017. → **M33**

1.3.4. Радови саопштени на скуповима националног значаја, штампани у целини

- [9] **Јокић, А.**, Петровић, М., Миљковић, З., Бабић, Б. *Метахеуристички алгоритми оптимизације у терминирању роботизованог унутрашњег транспорта материјала*, 41. ЈУПИТЕР Конференција, 37. симпозијум „НУ-РОБОТИ-ФТС“, Зборник радова – CD, стр. 3.14-3.22, Београд, јун 2018. → **M63**

1.3.5. Техничка и развојна решења – алгоритми, методе и софтвери

- 1) **Јокић, А.**, Петровић, М., Миљковић, З., Бабић, Б., *Визуелно управљање мобилног робота у технолошком окружењу на бази информација добијених од камере* (нова метода се односи на решавање проблема визуелног управљања роботских система на бази грешака у параметрима слике). Ова метода је развијена у оквиру пројекта TP-35004 и верификована од стране Матичног научног одбора за машинство и индустријски софтвер МПНиТР Владе Републике Србије, 2018. → **M85**

1.3.6. Учесће у научно-истраживачким, стручним и образовно-развојним пројектима

- 1) Бабић, Б., Миљковић, З., Петровић М., **Јокић А.**, и остали, *Иновативни приступ у примени интелигентних технолошких система за производњу делова од лима заснован на еколошким принципима*, Пројекат технолошког развоја који финансира Министарство просвете, науке и технолошког развоја Владе Републике Србије: TP-35004, Београд, 2011–2019.
- 2) Бабић, Б., Миљковић, З., Петровић М., **Јокић А.**, и остали, *Интегрисана истраживања у области макро, микро и нано машинског инжењерства – Дубоко машинско учење интелигентних технолошких система у производном машинству*, који је финансиран од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја Владе Републике Србије према уговору о реализацији и финансирању научноистраживачког рада НИО у 2020. години (ев. бр. 451-03-68/2020-14/200105).
- 3) Миљковић, З., Бабић, Б., Петровић М., **Јокић А.**, и остали, *Deep Machine Learning and Swarm Intelligence-based Optimization Algorithms for Control and Scheduling of Cyber-Physical Systems in Industry 4.0* (акроним - MISSION4.0), Пројекат финансиран од стране Фонда за науку Републике Србије у оквиру позива „Програм за развој пројеката из области вештачке интелигенције“, ев. бр. 6523109, Београд, 2020–2022.

1.4. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Кандидат Александар Јокић, маст.инж.маш., својим досадашњим истраживачким активностима показао је посебну заинтересованост, квалитет и изражену способност за научноистраживачки рад.

Публиковани научни радови у међународном часопису изузетних вредности, врхунском часопису националног значаја, као и у зборницима радова скупова међународног и националног значаја, као и верификовано техничко решење, указују на изразит смисао кандидата да се бави комплексним мултидисциплинарним теоријским и експерименталним научним истраживањима.

Биографски подаци, објављени научни радови, експериментална истраживања кроз ангажовање на пројектима технолошког развоја (ев. бр. TP-35004 и ев. бр. 451-03-68/2020-14/200105) и пројекту Фонда за науку (ев. бр. 6523109), као и други набројани резултати Александра Јокића, маст.инж.маш., суштински су повезани са научном облашћу којој припада предложена тема, што кандидата, према мишљењу Комисије, квалификује за самосталан, успешан и ефикасан теоријски и експериментални научноистраживачки рад на предложеној докторској дисертацији.

2. ПРЕДМЕТ, НАУЧНА ОБЛАСТ И ЦИЉ ИСТРАЖИВАЊА

2.1 Предмет истраживања

Предмет планираних истраживања односи се на развој и имплементацију стерео визуелног управљачког система холономног мобилног робота подржаног напредним биолошки инспирисаним техникама вештачке интелигенције, а све у циљу повећања ефикасности унутрашњег транспорта материјала интелигентног технолошког система кроз остваривање когнитивних способности приликом извршавања постављеног задатка.

У ужем смислу, планирана истраживања су усмерена на развој стерео визуелног система управљања холономног мобилног робота базираног на препознавању карактеристичних објеката у недовољно познатом технолошком окружењу, као и развој његових когнитивних способности у циљу доношења самосталних одлука о даљим акцијама и остваривања аутономног понашања применом алгоритама дубоког машинског учења (енгл. *Deep Learning - DL*), на бази конволуционих неуронских мрежа (енгл. *Convolutional Neural Networks - CNN*), и метахеуристичких алгоритама оптимизације.

Један од кључних захтева који још није остварен у оквиру интелигентних технолошких система Индустрије 4.0 је аутономан и оптимално терминиран унутрашњи транспорт материјала базиран на мобилним роботима као транспортним средствима. Системи роботизованог унутрашњег транспорта подржани напредним техникама вештачке интелигенције имају потенцијал да успешно остваре предложени захтев. У односу на традиционалне видове транспорта на бази виљушкара, тракастих транспортера или система са аутоматски вођеним колицима, мобилни роботски системи се одликују већом флексибилношћу, брзом могућношћу за реконфигурацију транспортних токова материјала и изразитом адаптабилношћу на настале појаве у динамичком и недовољно познатом технолошком окружењу. Како би се обезбедило робусно управљање, тачно позиционирање и адекватно манипулисање материјалом и/или деловима, мобилни роботи морају бити опремљени одговарајућим сензорским подсистемом, као и системом за аквизицију и интерпретацију података добијених са тог подсистема. У оквиру техничких система, камера се сматра „сензором будућности“ јер обезбеђује велике количине података чијом се обрадом и екстракцијом релевантних информација може реализовати управљање у циљу остваривања аутономног понашања роботских система. Како би се мобилни роботи са стерео визуелним системом машинског гледања (пројектованим по угледу на визуелни систем човека), као транспортна средства, ефикасно применили у технолошким системима, потребно је развити нове алгоритме који имају могућност да на основу комплексних визуелних података одреде стање роботског система, као и стање његовог окружења. За извршавање задатака манипулације материјала, тачност оствареног положаја мобилног робота (позиције и оријентације) мора бити на високом нивоу. Током последње две деценије, група алгоритама директног визуелног управљања (енгл. *Direct visual servoing - DVS*) постаје доминантна са аспекта тачности оствареног положаја роботских система у односу на традиционалне методе управљања базиране на грешкама у параметрима слика. Како су многи алгоритми директног визуелног управљања развијени искључиво за индустријске роботе серијске структуре, они се не могу применити за управљање нехолономних мобилних роботских система. Овакви роботски системи захтевају комплексно математичко-алгоритамско моделирање стратегије управљања како би се превазишла нехолономна ограничења и остварио жељени положај.

С друге стране, дубоко машинско учење (енгл. *Deep Learning - DL*) обезбеђује могућност мобилним роботским системима да остваре когнитивне способности кроз процесе као што су машинско учење, препознавање, поређење и праћење производно-технолошких ентитета који се налазе у систему у коме робот егзистира, попут других мобилних робота, машина алатки, алата, помоћних прибора и делова који се обрађују у технолошком систему. DL представља једну од метода машинског учења која се базира на вештачким неуронским мрежама. Специфичност ове методе је у многобројним слојевима који могу поседовати хиљаде неурона формираних и повезаних у паралелну структуру која обезбеђује могућност

генерализације најкомплекснијих инжењерских проблема. Главна предност DL-a је у могућности избегавања процеса „ручног“ дефинисања карактеристика којима би се представио скуп података на основу кога се врши машинско учење. Уместо тога, DL има могућност да из велике количине података (енгл. *Big Data*), на основу процеса машинског учења, одреди карактеристике којима се дефинишу и диференцирају различите групе ентитета у самом скупу података. Конволуционе неуронске мреже (енгл. *Convolutional Neural Networks – CNN*) представљају основ DL-a. CNN модели обезбеђују највећи степен тачности при решавању комплексних задатака у оквиру машинског гледања, који подразумевају детекцију објеката, семантичку сегментацију, као и оцену удаљености технолошких ентитета. Идеја ове докторске дисертације је да се применом интелигентног визуелног управљања обезбеди могућност аутономног понашања мобилног робота унутар реалног окружења, на основу његових остварених когнитивних способности. Развој, имплементација и оптимизација CNN модела биће извршена са аспекта односа тачности и могућности примене у реалном времену. Метахеуристички алгоритми оптимизације представљају једну од метода која може да обезбеди оптимално понашање мобилних робота у неструктурираним и недетерминистичким технолошким окружењима. У том смислу, поменути алгоритми се могу применити за оптимално подешавање архитектуре и параметара CNN модела или за процес регистрације слика који је неопходан за реализацију директног визуелног управљања.

Планирана истраживања, у оквиру предложене докторске дисертације, по садржају обухватају неколико актуелних истраживачких целина које се односе на: (i) пројектовање система перцепције који обухвата аквизицију и обраду података са стерео визуелног система применом CNN у циљу учења и генерисања корисних информација за управљачки систем, (ii) развој оригиналних модела дубоког машинског учења базираних на CNN у циљу њихове примене у реалном времену уз остваривање адекватне тачности препознавања технолошких ентитета, (iii) развој алгоритама за стерео визуелно управљање базираних на информацијама добијених из система перцепције, (iv) развој когнитивних способности мобилних робота на бази биолошки инспирисаних техника вештачке интелигенције кроз имплементацију система за доношење одлука.

2.2 Преглед стања у области истраживања

У последње три деценије, извршена су иницијална истраживања и публиковано је више запажених научно-стручних радова, књига, докторских дисертација, уз признавање патената, а реализован је и значајан број научноистраживачких пројеката референтних светских лабораторија, који са различитих становишта третирају проблем развоја управљачких система мобилних робота базираних на техникама вештачке интелигенције, као и на визуелним системима, тако да као такви могу бити искоришћени у оквиру данашњег развоја интелигентног унутрашњег транспорта материјала. У наставку, наведена су нека од релевантних научних достигнућа, која се баве поменутом тематиком, што представља основ за покретање и озваничавање истраживања предвиђених овом докторском дисертацијом:

- [1] R. Hartley and A. Zisserman, *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Second Edi. Cambridge university press, 2000.
- [2] R. Pfeifer and S. Christian, *Understanding intelligence*. MIT Press, 2001.
- [3] P. Corke, *Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms In MATLAB®*. Springer, 2017.
- [4] F. Chaumette and S. Hutchinson, "Visual servo control. I. Basic approaches," *IEEE Robot. Autom. Mag.*, vol. 13, no. 4, pp. 82–90, 2006.
- [5] Z. Miljković, N. Vuković, M. Mitić, and B. Babić, "New hybrid vision-based control approach for automated guided vehicles," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 66, no. 1–4, pp. 231–249, 2013.
- [6] Z. Miljković, M. Mitić, M. Lazarević, and B. Babić, "Neural network reinforcement learning for visual control of robot manipulators," *Expert Syst. Appl.*, vol. 40, no. 5, pp. 1721-1736, 2013.

- [7] C. Collewet and E. Marchand, "Photometric Visual Servoing," *IEEE Trans. Robot.*, vol. 27, no. 4, pp. 828–834, Aug. 2011.
- [8] C. Teulière and E. Marchand, "A dense and direct approach to visual servoing using depth maps," *IEEE Trans. Robot.*, vol. 30, no. 5, pp. 1242–1249, 2014.
- [9] M. Bakthavatchalam, O. Tahri, and F. Chaumette, "A Direct Dense Visual Servoing Approach using Photometric Moments," *IEEE Trans. Robot.*, vol. 34, no. 5, pp. 1226–1239, 2018.
- [10] E. Marchand, "Direct Visual Servoing in the Frequency Domain," *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 5, no. 2, pp. 620–627, 2020.
- [11] N. Sünderhauf et al., "The limits and potentials of deep learning for robotics," *Int. J. Rob. Res.*, vol. 37, no. 4–5, pp. 405–420, 2018.
- [12] F. Sadeghi and S. Levine, "CAD2RL: Real single-image flight without a single real image," *arXiv:1611.04201*, 2016.
- [13] F. Sadeghi, A. Toshev, E. Jang, and S. Levine, "Sim2Real Viewpoint Invariant Visual Servoing by Recurrent Control," in *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2018, pp. 4691–4699.
- [14] F. Zhang, J. Leitner, Z. Ge, M. Milford, and P. Corke, "Adversarial Discriminative Sim-to-real Transfer of Visuo-motor Policies," *Int. J. Rob. Res.*, vol. 38, no. 10–11, pp. 1229–1245,
- [15] Q. Bateux, E. Marchand, J. Leitner, and F. Chaumette, "Training Deep Neural Networks for Visual Servoing," in *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2018, pp. 1–8.2019.
- [16] K. Simonyan and A. Zisserman, "Very deep convolutional networks for large-scale image recognition," in *3rd International Conference on Learning Representations (ICLR)*, 2015, pp. 1–14.
- [17] J. Long, E. Shelhamer, and T. Darrell, "Fully convolutional networks for semantic segmentation," in *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Jun. 2015, pp. 3431–3440.

Научноистраживачки резултати представљени у референцама [1-4] се односе на област стерео визуелног управљања интелигентних роботских система на бази биолошки инспирисаних техника вештачке интелигенције. У радовима [5-6] се анализирају приступи при визуелном управљању засновани на грешкама у параметрима слике (енгл. *Image Based Visual Servoing*), као и њихова интеграција са различитим техникама вештачке интелигенције (попут техника машинског учења ојачавањем, енгл. *Reinforcement learning*), које се примењују у циљу повећања тачности оствареног положаја роботског система. Директно визуелно управљање (енгл. *Direct visual servoing - DVS*) [7-10], представља један од нових приступа визуелног управљања, чија се предност огледа у високој тачности оствареног положаја (ред величине грешке је мањи од милиметра [7]) и чињеници да није потребно извршити комплексан процес детекције и упаривања карактеристичних објеката, већ се стерео визуелно управљање врши само на основу информација добијених са слике. Недостаци метода DVS-а се превасходно односе на ограничени домен конвергенције грешке у случају када се почетни положај робота значајно разликује од жељеног, као и на могућност управљања искључиво холономних роботских система. Један од кључних праваца истраживања у домену развоја DVS-а се односи и на приступе у начину моделирања слике. У референтној литератури се предлажу различити приступи засновани на интензитету осветљености пиксела [7], мапи удаљености објеката на слици [8], фотометријским моментима [9], као и дискретној косинусној трансформацији слике [10].

Потенцијал примене алгоритама DL-а у развоју интелигентних роботских система је анализиран у [11], где се когнитивне способности ових система остварују кроз процес учења, резонувања, поређења и препознавања различитих ентитета који се налазе у окружењу у коме робот егзистира. Методе визуелног управљања роботских система на бази DL-а и техника вештачке интелигенције су анализиране у референцама [12-15], где се посебно

наглашава примена симулације ради безбеднијег, ефикаснијег и бржег процеса обучавања мобилних и стационарних роботских система.

За разлику од анализираних литературе, у оквиру предметне докторске дисертације се предлаже развој оригиналне методологије стерео DVS-а, где се за управљање мобилног робота користе семантички сегментисане слике сцене окружења у коме се робот налази. Захваљујућим многобројним слојевима који могу поседовати хиљаде неурона формираних у паралелну структуру која обезбеђује могућност генерализације најкомплекснијих инжењерских проблема, конволуционе вештачке неуронске мреже [16,17], интегрисане у систем перцепције мобилног робота, могу се применити за задатак семантичке сегментације сцене мобилног робота. У поређењу са приступима разматраним у релевантној литератури, предности предложене методологије се огледају у могућности имплементације управљачког алгорита на нехолономне роботске системе, као и могућности формирања интегрисаног модела система за стерео визуелно управљање и система за резоновање на бази визуелних семантичких информација.

2.3 Научни циљ докторске дисертације

Општи научни циљ докторске дисертације подразумева развој методологије за визуелно управљање, која се базира на интеграцији техника DL и метахеуристичких алгоритама оптимизације, са циљем остваривања когнитивних способности мобилних робота у технолошком окружењу. Експериментална верификација предложене методологије ће бити извршена у лабораторијском моделу технолошког окружења коришћењем нехолономног мобилног робота RAICO (Robot with Artificial Intelligence based COgnition), развијеног у оквиру Лабораторије за индустријску роботiku и вештачку интелигенцију Машинског факултета у Београду. Научни циљ истраживања у оквиру докторске дисертације се односи на следеће целине:

- Развој новог алгорита управљања нехолономног мобилног робота базираног на фузији стерео визуелних информација са две индустријске камере и CNN модела примењених за семантичку сегментацију слике;
- Развој и имплементација система перцепције мобилног робота заснованог на примени техника DL у циљу решавања напредних задатака, као што су учење, детекција и локализација технолошких ентитета унутар сцене, са посебним освртом на алгоритме који се могу применити у реалном времену;
- Тестирање и верификација оригиналне методологије визуелног управљања на реалном роботском систему RAICO са стерео машинским гледањем.

3. ОСНОВНЕ ХИПОТЕЗЕ

Фокус истраживања, у оквиру ове докторске дисертације, односи се на имплементацију техника DL и алгоритама метахеуристичке оптимизације у циљу остваривања аутономности мобилних робота при извршавању задатака транспорта и манипулације у интелигентним технолошким системима. Аутономност ће се остварити кроз развој и имплементацију нових алгоритама за интелигентно стерео визуелно управљање, система перцепције који је у стању да препозна и семантички сегментира објекте у сцени мобилног робота, као и система за интелигентно доношење одлука, а све захваљујући имплементираним техникама дубоког машинског учења који примарно подразумевају учешће CNN. Имплементација новоразвијених алгоритама би требало да обезбеди ефикаснији и сигурнији транспорт материјала, са изразитом флексибилношћу и могућношћу за брзу реконфигурацију транспортних токова. На основу знања и вештина акумулираних досадашњим истраживањима и детаљном анализом релевантних литературних извора, а у циљу теоријске и експерименталне верификације предложеног алгорита визуелног управљања мобилног робота базираног на техникама вештачке интелигенције, будућа истраживања, као и рад на овој докторској дисертацији, базираће се следећим полазним хипотезама:

- Прва хипотеза: Систем перцепције који се заснива на дубоком машинском учењу и стерео визуелном машинском гледању, обезбеђује могућност мобилном роботском систему да са високом тачношћу детектује и препознаје производно-технолошке ентитете.
- Друга хипотеза: Стерео визуелно управљање базирано на семантичкој сегментацији могуће је применити за остваривање жељеног положаја (позиције и оријентације) нехолономног мобилног робота са аспекта постизања захтеване тачности задатака транспорта и манипулације.

4. НАУЧНЕ МЕТОДЕ ИСТРАЖИВАЊА

Имајући у виду свеобухватност, комплексност и мултидисциплинарни карактер тематске области, у овој докторској дисертацији се предлажу следеће научне методе истраживања:

- Методе за обучавање и моделирање различитих архитектура CNN;
- Методе интелигентног управљања на основу информација добијених са камере, превасходно фокусиране на директно визуелно управљање;
- Методе биолошки инспирисане оптимизације примењене на процес регистрације слике;
- Методе за развој симулационих модела мобилних робота у оквиру софтверског пакета CorreliaSim и MATLAB, које укључују адекватно моделирање погонског, сензорског и механичког подсистема, у циљу верификације развијених алгоритама;
- Методе софтверско-хардверске интеграције и имплементације развијених алгоритама на интелигентни мобилни роботски систем RAICO са стерео машинским гледањем;
- Методе за експерименталну верификацију и валидацију предложених хипотеза и статистичку анализу добијених научних резултата.

5. ОЧЕКИВАНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

Очекивани резултати предложених научних истраживања, у оквиру предметне докторске дисертације, подразумевају:

- Нови алгоритам за интелигентно стерео визуелно управљање, који на основу семантичке сегментације слика добијених применом система перцепције и дубоког машинског учења базираног на оригиналним CNN моделима, омогућује нехолономном мобилном роботском систему RAICO, са стерео машинским гледањем, да изврши захтевани задатак транспорта и манипулације.

6. ПЛАН ИСТРАЖИВАЊА И СТРУКТУРА РАДА

План истраживања, у оквиру предметне докторске дисертације, реализује се кроз следеће фазе:

1. Критичка анализа литературних извора и претходних истраживања, релевантних за интелигентно управљање мобилног робота, остварено на основу аквизиције и обраде сензорских информација добијених од камере;
2. Анализа метода, циљева и алгоритама од значаја за развој интелигентног визуелног управљачког систем мобилног робота, са посебним освртом на директно визуелно управљање примењено на мобилне роботске системе који врше унутрашњи транспорт материјала;
3. Анализа напредних модела дубоког машинског учења и метода метахеуристичке оптимизације применљивих у реалном времену, и то при интелигентном стерео визуелном управљању мобилног робота;
4. Развој визуелног система интелигентног управљања који на основу математичког моделирања фузије сензорских информација и биолошки инспирисаних техника вештачке интелигенције има могућност закључивања, доношења одлука у реалном времену и учења кроз генерализацију понашања;
5. Развој когнитивних способности мобилних робота у функцији остваривања аутономног понашања приликом извршавања постављеног задатка: примена система препознавања базираног на информацијама добијеним од интегрисаних камера у циљу решавања сложених проблема поређења, идентификације и класификације објеката (машина алатки и делова) који се налазе у технолошком окружењу;
6. Симулација развијеног система стерео визуелног управљања применом CoppeliaSim софтверског пакета;
7. Тестирање и практична експериментална верификација новоразвијених алгоритама управљања имплементираних на роботском систему RAICO са стерео машинским гледањем;
8. Анализа и дискусија остварених експерименталних резултата.

Оквирна структура предложене докторске дисертације обухвата следеће целине:

1. Увод. Интелигентни мобилни роботи као транспортна средства у технолошком систему - значај и примена. Визуелно управљање мобилних робота. Биолошки инспирисане технике вештачке интелигенције.
2. Преглед и критичка анализа стања у области досадашњих теоријских и експерименталних истраживања везаних за стерео визуелно управљање нехолономних мобилних робота, са посебним освртом на методе код којих се примењују технике вештачке интелигенције.
3. Пројектовање интелигентног мобилног роботског система RAICO.
4. Методе и технике стерео визуелног управљања.
 - 4.1. Процесирање слике.
 - 4.2. Визуелно управљање.
 - 4.3. Директно визуелно управљање.
5. Биолошки инспирисане технике вештачке интелигенције у визуелном управљању.
6. Развој интелигентног управљачког система мобилног робота који подразумева систем перцепције, систем за стерео визуелно управљање, као и систем за одлучивање, који се базира на биолошки инспирисаним техникама вештачке интелигенције.
7. Тестирање и експериментална верификација предложеног система. Дискусија.
8. Закључци.
9. Литература.
10. Прилози.

7. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу Одлуке Наставно-научног већа број 1860/3 од 10.12.2020. године, за **ментора** кандидата Александра Јокића, магист.инж.маш., током рада на предметној докторској дисертацији именована је **др Милица Петровић**, доцент Машинског факултета у Београду, са чиме је Комисија у потпуности сагласна.

На основу анализе пријаве теме докторске дисертације кандидата Александра Јокића, магист.инж.маш., архивираних под евиденционим бројем 1731/1 од 16.11.2020. године, а сходно сагласности Наставничког колегијума Катедре за производно машинство број 1860/1 од 01.12.2020. године, као и Одлуци Наставно-научног већа број 1860/2 од 10.12.2020. године, Комисија за подношење реферата о теми докторске дисертације закључује да је предложена тема научно утемељена и адекватна за израду докторске дисертације високог ранга, као и да кандидат испуњава законске и друге услове за рад на предметној докторској дисертацији, тако да предлаже Већу докторских студија Машинског факултета Универзитета у Београду да се

Александру Јокићу, магист.инж.маш.

одобри израду докторске дисертације са темом

Визуелно управљање мобилног робота базирано на биолошки инспирисаним техникама вештачке интелигенције

научна област: **машинско инжењерство (производно машинство).**

С поштовањем,

Београд, 15.12.2020. год.

Чланови Комисије:

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

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

.....
Др Живана Јаковљевић, редовни професор
Универзитет у Београду - Машински факултет

.....
Др Никола Славковић, ванредни професор
Универзитет у Београду - Машински факултет

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

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ –
Број: 1860/3
Датум: 10.12.2020.
Београд, Краљице Марије бр.16

На основу члана 64. Статута Машинског факултета Универзитета у Београду број 1450/4 од 14.06.2018. године и члана 20. а сагласно члану 29. Правилника о докторским студијама на Универзитету у Београду од 24.05.2016.г., Наставно-научно веће Машинског факултета на седници одржаној дана 10.12.2020. године, донело је следећу

ОДЛУКУ

Именује се **др Милица Петровић, доцент** за ментора докторске дисертације **„ВИЗУЕЛНО УПРАВЉАЊЕ МОБИЛНОГ РОБОТА БАЗИРАНО НА БИОЛОШКИ ИНСПИРИСАНИМ ТЕХНИКАМА ВЕШТАЧКЕ ИНТЕЛИГЕНЦИЈЕ“** кандидата **Александра Јокића, маг.инж.маш.,** студента докторских студија.

Одлуку доставити: ментору, докторанту и архиви.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф. др Радивоје Митровић