

Факултет Машински

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

933/6

(Број захтева)

Веће научних области техничких наука

(Назив већа научне области коме се захтев
упућује)

29.08.2024.

(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:

Аутономно кретање робота специфичне намене базирано на дубоком учењу ојачавањем
(пун назив предложене теме докторске дисертације)

НАУЧНА ОБЛАСТ: Машинско инжењерство (ужа научна област: когнитивна роботика)

ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ:

- Име, име једног од родитеља и презиме кандидата:
ЂОРЂЕ (РАДОВАН) ЈЕВТИЋ
- Претходно образовање (назив и седиште факултета, студијски програм):
Универзитет у Београду - Машински факултет, Краљице Марије 16, 11120 Београд 35
- Година завршетка претходног нивоа студија: 2018.
- Година уписа на докторске студије: 2018.
- Назив студијског програма докторских студија: Машинско инжењерство

ПОДАЦИ О МЕНТОРУ:

Име и презиме ментора: Зоран Миљковић

Звање: редовни професор

Списак радова који квалификују ментора за вођење докторске дисертације:

1. Petrović, M., Jokić, A., **Miljković, Z.**, Kulesza, Z., **Multi-Objective Scheduling of Single Mobile Robot Based on Grey Wolf Optimization Algorithm**, Applied Soft Computing (ISSN 1568-4946), Vol. 131, Article No. 109784, December 2022 (Available online: 7th November 2022; DOI: 10.1016/j.asoc.2022.109784), Elsevier, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.109784> (Science Citation Index-Web of Science® – IF = 8,7 (2022) → M21; извор KoBSON).
2. Jokić, A., Petrović, M., **Miljković, Z.**, **Semantic Segmentation Based Stereo Visual Servoing of Nonholonomic Mobile Robot in Intelligent Manufacturing Environment**, Journal Expert Systems with Applications (ISSN 0957-4174), Volume 190, 116203, 15 March 2022 (Available online: 15 November 2021; DOI: 10.1016/j.eswa.2021.116203), Elsevier, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957417421015189> (Science Citation Index-Web of Science® – IF = 8,5 (2022) → M21a; извор KoBSON).
3. Petrović, M., Ciekowski, M., Romaniuk, S., Wolniakowski, A., **Miljković, Z.**, **A Novel Hybrid NN-ABPE-Based Calibration Method for Improving Accuracy of Lateration Positioning System**, Journal Sensors (eISSN 1424-8220), Volume 21 Issue 24, Paper: 8204, (Available online: 8 December 2021; DOI: 10.3390/s21248204), Published by MDPI, 4052 Basel, Switzerland <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/24/8204> (Science Citation Index-Web of Science® – IF = 3,847 (2021) → M21; извор KoBSON).
4. 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).
5. Marković, V., Jakovljević, Ž., **Miljković, Z.**, **Feature Sensitive Three-Dimensional Point Cloud Simplification using Support Vector Regression**, Technical Gazette (Tehnički vjesnik, ISSN 1330-3651_Print), (ISSN 1848-6339_Online), UDK: 62(05)=163.42=111, Vol. 26 No. 4, pp. 985-994, Published by Mechanical Engineering Faculty in Slavonski Brod (<https://hrcak.srce.hr/223288>), 25 July 2019; <https://doi.org/10.17559/TV-20180328175336> (Science Citation Index-Web of Science® – IF = 0,670 (2019) → M23; извор KoBSON).
6. 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).
7. 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).
8. **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).
9. 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).
10. 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).
11. **Miljković, Z.**, Vuković, N., Mitić, M., **Neural extended Kalman filter for monocular SLAM in indoor environment**, Proc ImechE Part C: Journal of Mechanical Engineering Science (ISSN 0954-4062), Vol. 230 Issue: 5, pp. 856-866, Sage, United Kingdom, March 2016. (Online_first published on May 12, 2015 as DOI:10.1177/0954406215586589), <http://pic.sagepub.com/content/early/2015/05/12/0954406215586589.abstract> (Science Citation Index-Web of Science® – IF = 1,015 (2016) → M23; извор KoBSON).

12. 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**).
13. Vuković, N., Mitić, M., **Miljković, Z.**, **Trajectory learning and reproduction for differential drive mobile robots based on GMM/HMM and Dynamic Time Warping using Learning from Demonstration framework**, Engineering Applications of Artificial Intelligence (ISSN 0952-1976), Vol.45, pp. 388-404, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0952197615001499> Elsevier, 1 October 2015 (DOI: 10.1016/j.engappai.2015.07.002), (**Science Citation Index-Web of Science® – IF = 2,368 (2015) → M21**; извор **KoBSON**).
14. Mitić, M., **Miljković, Z.**, **Bio-inspired Approach to Learning Robot Motion Trajectories and Visual Control Commands**, Journal Expert Systems with Applications (ISSN 0957-4174), Vol. 42 Issue: 5, pp. 2624 - 2637, Elsevier, 1 April 2015; (Available online: 13 November 2014 as DOI: 10.1016/j.eswa.2014.10.053 <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417414006940>), (**Science Citation Index-Web of Science® – IF = 2,981 (2015) → M21**; извор **KoBSON**).
15. Ali Diryag, Vuković, N., **Miljković, Z.**, **Robust sequential learning of feedforward neural networks in the presence of heavy-tailed noise**, Journal Neural Networks (ISSN 0893-6080), Vol. 63, pp. 31-47, Elsevier, 1 March 2015, (Available online: 15 November 2014; <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0893608014002433> DOI: 10.1016/j.neunet.2014.11.001), (**Science Citation Index-Web of Science® – IF = 3,216 (2015) → M21**; извор **KoBSON**).
16. Ali Diryag, Mitić, M., **Miljković, Z.**, **Neural Networks for Prediction of Robot Failures**, Proc ImechE Part C: Journal of Mechanical Engineering Science (ISSN 0954-4062), Vol. 228 Issue: 8, pp. 1444-1458, Sage, United Kingdom, June 2014. (Available online first published on October 10, 2013 as DOI: 10.1177/0954406213507704), <http://pic.sagepub.com/content/228/8/1444> (**Science Citation Index-Web of Science® – IF = 0,560 (2014) → M23**; извор **KoBSON**).

Обавештавамо вас да је Наставно – научно веће на седници одржаној 29.08.2024. 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 једном писаном примерку за архиву Универзитета

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ -
Број: 933/5
Датум: 29.08.2024. године
Београд, Краљице Марије 16

На основу члана 40. Закона о високом образовању („Службени гласник РС“, број 88/2017, 73/2018, 27/2018 – др. закон 67/2019, 6/2020 – др. закони, 11/2021 – аутентично тумачење, 67/2021, 67/2021 – др. закон и 76/2023), члана 64. Статута Машинског факултета – пречишћени текст (број 1136/4 од 28.06.2021. године), Одлуке о изменама и допунама Статута број 239/6 од 17.02.2023. године и члана 38. Правилника о докторским студијама на Универзитету у Београду - Машинском факултету, Наставно-научно веће Машинског факултета на седници од 29.08.2024. године донело је:

О Д Л У К У
о прихватању Извештаја Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације

Прихвата се Извештај Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације кандидата **ЂОРЂА ЈЕВТИЋА**, маг. инж. маш. под насловом „Аутономно кретање робота специфичне намене базирано на дубоком учењу ојачавањем“.

Извештај је поднела Комисија у саставу: др Милица Петровић, ванр. проф., др Живана Јаковљевић, ред. проф., др Никола Славковић, ванр. проф., др Јелена Сворцан, ванр. проф. и др Александар Родић, научни саветник Института Михајло Пупин у Београду.

За ментора докторске дисертације именује се др Зоран Миљковић, редовни професор Универзитета у Београду - Машинског факултета.

Одлуку доставити: Универзитету у Београду, кандидату, ментору и архиви Факултета.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф. др Владимир Поповић

Предмет: Извештај Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације кандидата **Ђорђа Јевтића, магист.инж.маш.** према Одлуци Наставно-научног већа број 933/3 од 11.7.2024. године.

На основу поднете пријаве за израду докторске дисертације кандидата Ђорђа Јевтића, магист.инж.маш., број 933/1 од 6.6.2024. године, дате сагласности Колегијума наставника Катедре за производно машинство број 933/2 од 18.6.2024. године и Одлуке Наставно-научног већа Универзитета у Београду – Машинског факултета број 933/3 од 11.7.2024. године именовани смо за чланове Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације кандидата **Ђорђа Јевтића, магист.инж.маш.**

Увидом у документацију, коју је докторанд Ђорђе Јевтић, магист.инж.маш., приложио уз поднету пријаву, и то у складу са чланом 33. Правилника о докторским студијама Универзитета у Београду – Машинског факултета, за израду предметне докторске дисертације, после разматрања, а на основу члана 37. Правилника о докторским студијама, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ
о научној заснованости
теме докторске дисертације
под насловом

**Аутономно кретање робота специфичне намене
базирано на дубоком учењу ојачавањем**

1. ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

1.1 Општи биографски подаци

Ђорђе (Радован) Јевтић, магист.инж.маш., рођен је 27. септембра 1992. године у Београду, Република Србија. Основну школу „Владислав Петковић - Дис“ и средњу школу „Шеста београдска гимназија“ завршио је у Београду.

На Универзитет у Београду – Машински факултет уписао се школске 2011/2012. године. Основне академске студије завршио је 2014. године, одбранивши завршни рад (BSc) са оценом 10 (десет) из предмета *Пројектовање моторних возила* и просечном оценом током Основних академских студија 9,59 (девет и 59/100). Школске 2014/2015. године уписао је Мастер академске студије на Катедри за транспортно инжењерство, конструкције и логистику, а исте завршио 27. септембра 2018. године са оценом 10 (десет) и просечном оценом током Мастер академских студија 9,00 (девет и 0/100), одбранивши мастер рад (MSc) на тему „Пројектовање носеће конструкције малог градског електричног возила“ из предмета *Металне конструкције у машиноградњи*, под менторством проф. др Владе Гашића.

У школској 2018/2019. години, уписао је Докторске академске студије на Универзитету у Београду – Машинском факултету (број индекса Д38/18). Током другог семестра Докторских академских студија утврђени су правци његовог научноистраживачког рада на Катедри за производно машинство, да би одлуком број 792/1 од 22.4.2019. године био озваничен и Програм усавршавања, који се реализује под руководством потенцијалног ментора, проф. др Зорана Миљковића. Кандидат је положио све испите на Докторским академским студијама Машинског факултета у Београду и тренутно је студент VI семестра.

У звање истраживач-приправник изабран је 11. априла 2019. године, а од 16. октобра 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 финансирао 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, био 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 финансирао Министарство просвете, науке и технолошког развоја Владе Републике Србије, према уговору о реализацији и финансирању научноистраживачког рада НИО у 2020. и 2021. години (ев. бр. 451-03-68/2020-14/200105 и 451-03-9/2021-14/200105, руководилац пројекта проф. др Радивоје Митровић). Кандидат је од 1. септембра 2020. године до 31. децембра 2022. године био 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 је финансирао Фонд за науку Републике Србије у оквиру позива „Програм за развој пројеката из области вештачке интелигенције“. Звање истраживача-приправника поново стиче 10. фебруара 2022. године. Од 1. јануара 2022. године, кандидат је био запослен у својству истраживача-приправника 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“*, који је финансирао Министарство просвете, науке и технолошког развоја, односно касније Министарство науке, технолошког развоја и иновација Владе Републике Србије према уговорима о реализацији и финансирању научноистраживачког рада НИО у 2022. и 2023. години (ев. бр. 451-03-68/2022-14/200105 и 451-03-47/2023-01/200105, руководилац пројекта проф. др Владимир Поповић). Кандидат је, од 1. јануара 2024. године, запослен на Универзитету у Београду – Машинском факултету и даље у својству истраживача-приправника на Катедри за производно машинство, у оквиру пројекта под интерним називом *„Дубоко учење и сајбер безбедност кибернетско-физичких система Индустрије 4.0“*, који финансира Министарство науке, технолошког развоја и иновација Владе Републике Србије, према уговору о реализацији и финансирању научноистраживачког рада НИО у 2024. години (ев. бр. 451-03-65/2024-03/200105 од 5.2.2024. године, руководилац пројекта проф. др Владимир Поповић).

За постигнуте резултате, током похађања Основних академских студија, добио је следеће похвале и признања:

- 2012-2014. Похвале поводом Дана Машинског факултета у Београду за одличан успех постигнут на првој, другој и трећој години Основних академских студија (школска 2011/12., 2012/13., и 2013/14. година).
- 2012-2015. Републичка стипендија/кредит Министарства просвете, науке и технолошког развоја за најбоље студенте.

2013-2014. Стипендија „Доситеја“ коју Фонд за младе таленте додељује најбољим студентима завршних година академских студија.

Од јесењег семестра школске 2020/2021. године, докторанд Ђорђе Јевтић, укључен је у наставни процес Катедре за производно машинство Универзитета у Београду – Машинског факултета на следећим наставним предметима Катедре:

- Методе одлучивања (MAC),
- Интелигентни технолошки системи (MAC).

Познавање страних језика

- Енглески језик – говори, чита и пише.
- Немачки језик – основно познавање.

Познавање рада на рачунару

- Напредно коришћење програма: Microsoft Office (Word, Excel, PowerPoint, Project), AutoCAD, SolidWorks, SolidWorks Visualize, CATIA, Python, Visual Studio, PyCharm, Arduino IDE, MATLAB & Simulink, Adobe (Photoshop, Illustrator, XD, Premiere Rush, Dimension, Premiere Pro), MIT App Inventor, QGroundControl, Mission Planner.

Истраживачке области

- Производно машинство, Интелигентни технолошки системи, Когнитивна роботика, Визуелно управљање, Дубоко учење, Биолошки инспирисане технике вештачке интелигенције, Вишекритеријумска биолошки инспирисана оптимизација, Мехатроника.

Остало

- Возачка дозвола за Б категорију возила.

1.2 Активности на Докторским академским студијама

Кандидат Ђорђе Јевтић, магистар машинства, уписао је Докторске академске студије на Универзитету у Београду – Машинском факултету школске 2018/2019. 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	9 (девет)
<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 (u*)</i>	Проф. др Живана Јаковљевић	5	10 (десет)
<i>Истраживање и публикување - I</i>	Ванр. проф. др Јелена Сворцан	10	10 (десет)

Други семестар Докторских академских студија

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

Трећи семестар Докторских академских студија

Назив предмета	Предметни наставник	ЕСПБ	Оцена
<i>Дигитална обрада нестационарних сигнала (u*)</i>	Проф. др Живана Јаковљевић	5	10 (десет)
<i>Когнитивна роботика (u*)</i>	Проф. др Зоран Миљковић	5	10 (десет)
<i>Истраживање и публикување - III</i>	Проф. др Зоран Миљковић	20	10 (десет)

Четврти семестар Докторских академских студија

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

Напомена: o* - обавезни предмет; u* - изборни предмет.

Ђорђе Јевтић је на Докторским академским студијама Универзитета у Београду – Машинског факултета положио 3 (три) обавезна и 6 (шест) изборних предмета (сваки вреди по 5 ЕСПБ бодова), чиме је остварио укупно 45 ЕСПБ бодова. Резултати научноистраживачког рада Ђорђа Јевтића на Машинском факултету у Београду, реализовани кроз рад у *Лабораторији за индустријску роботiku и вештачку интелигенцију* (Истраживање и публикување I-IV), а

верификовани објављивањем радова, као и учествовање у извођењу наставе на поједним предметима Катедре за производно машинство, указују на то да је кандидат веома успешно остварио још 53 ЕСПБ бода. Кандидат је успешно реализовао и одбранио **Пројекат идеје докторске дисертације**, што је Комисија у саставу проф. др Зоран Миљковић, проф. др Живана Јаковљевић, ванр. проф. др Милица Петровић потврдила оценом 10 (десет), а тиме је кандидат стекао још 22 ЕСПБ бода. Дакле, у складу са чланом 21. Правилника о Докторским академским студијама Универзитета у Београду – Машинског факултета, кандидат је остварио укупно 120 ЕСПБ бодова, чиме је испунио основни услов да упише трећу годину студија и пријави тему докторске дисертације.

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

1.3.1. Поглавље (M13) у истакнутој монографији међународног значаја категорије M11 или рад (M13) у тематском зборнику међународног значаја водећег издавача

- [1] **Jevtić, Đ., Svorcan, J., Radulović, R., Flight Mechanics, Aerodynamics and Modelling of Quadrotor**, In New Technologies, Development and Application IV (NT 2021), Springer, Cham, ISBN: 978-3-030-75274-3, pp. 681-689, 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-75275-0_75. → **M13**.
- [2] **Miljković, Z., Jevtić, Đ., Object Detection and Reinforcement Learning Approach for Intelligent Control of UAV**, In New Technologies, Development and Application V (NT 2022), Springer, Cham, ISBN: 978-3-031-05229-3, pp. 659-669, 2022. DOI: 10.1007/978-3-031-05230-9_79. → **M13**.

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

- [3] **Miljković, Z., Jevtić, Đ., Svorcan, J., Reinforcement learning approach for autonomous UAV navigation in 3D space**, In 14th International Scientific Conference MMA 2021 - Flexible Technologies, pp. 119-122 (ISBN 978-86-6022-364-9), Novi Sad, Serbia, 23-25 September 2021. → **M33**.
- [4] **Jevtić, Đ., Miljković, Z., Petrović, M., Jokić, A., Reinforcement Learning-based Collision Avoidance for UAV**, 2023 10th International Conference on Electrical, Electronics and Computing Engineering (IcETRAN), IEEE, (ISBN 979-8-3503-0712-2, eISBN 979-8-3503-0711-5), East Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 5-8 June 2023, pp. 1-6, DOI: 10.1109/IcETRAN59631.2023.10192168. → **M33**.

1.3.3. Радови саопштени на скуповима националног значаја, штампани у целини/изводу

- [5] **Миљковић, З., Јевтић, Ђ., Сворцан, Ј., Аутономност кретања мобилног робота - летелице за рад на висинама – специфичности конфигурације прототипа, моделирање, функционална апроксимација и машинско учење ојачавањем**, 7. Конгрес Студената Технике – „Технологије модерног инжењерства“, Златибор, Србија, 09-13. април 2021. → **M62**.
- [6] **Миљковић, З., Бабић, Б., Петровић, М., Јокић, А., Миљковић (Брењо), К., Јевтић, Ђ., Ђокић, Л., Интелигентно стерео-визуелно управљање мобилних робота и оптимално терминирање технолошких процеса - преглед резултата истраживања у оквиру пројекта MISSION4.0**, 43. ЈУПИТЕР Конференција, 39. симпозијум „НУ-РОБОТИ-ФТС“, Зборник радова - USB, стр. 3.13-3.25, Београд, 4. октобар 2022. → **M63**.

1.3.4. Учешће у научноистраживачким, стручним и образовно-развојним пројектима

- 1) Бабић, Б., Миљковић, З., Јаковљевић, Ж., Петровић М.М., **Јевтић Ђ.**, и остали, *„Иновативни приступ у примени интелигентних технолошких система за производњу делова од лима заснован на еколошким принципима“*, Пројекат технолошког развоја који је финансирало Министарство просвете, науке и технолошког развоја Владе Републике Србије: ТР-35004, Београд, 2011–2019.
- 2) Бабић, Б., Миљковић, З., Јаковљевић, Ж., Петровић М.М., **Јевтић Ђ.**, и остали, *„Интегрисана истраживања у области макро, микро и нано машинског инжењерства – Дубоко машинско учење интелигентних технолошких система у производном машинству“*, који је финансирало Министарство просвете, науке и технолошког развоја Владе Републике Србије закључно са 2022. годином, а од фебруара 2023. године, финансирао га је Министарство науке, технолошког развоја и иновација Владе Републике Србије (уговори бр. 451-03-68/2020-14/200105, 451-03-9/2021-14/200105, 451-03-68/2022-14/200105 и 451-03-47/2023-01/200105 од 3.2.2023. године), Београд, 2020-2023.
- 3) Миљковић, З., Бабић, Б., Јаковљевић, Ж., Петровић М.М., **Јевтић Ђ.**, 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 је био 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.
- 4) Миљковић, З., Јаковљевић, Ж., Петровић, М.М., Недељковић, Д., Јокић, А., Брењо, К., **Јевтић, Ђ.**, *„Дубоко учење и сајбер безбедност кибернетско-физичких система Индустрије 4.0“* (интерни назив), који финансира Министарство науке, технолошког развоја и иновација Владе Републике Србије, према уговору о реализацији и финансирању научноистраживачког рада НИО у 2024. години (ев. бр. 451-03-65/2024-03/200105 од 5.2.2024. године, руководилац пројекта проф. др Владимир Поповић).

1.4 Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Кандидат Ђорђе Јевтић, магистар инжењерских наука, својим досадашњим истраживачким активностима показао је посебну заинтересованост, квалитет и изражену способност за научноистраживачки рад.

Публиковани научни радови у тематским зборницима водећег и признатог светског издавача (Springer), као и у зборницима радова скупова међународног и националног значаја, указују на изразит смисао кандидата да се бави комплексним и мултидисциплинарним, како теоријским, тако и експерименталним научним истраживањима.

Биографски подаци, објављени научни радови, експериментална истраживања кроз ангажовање на научним пројектима технолошког развоја (ев. бр. ТР-35004, ев. бр. 451-03-68/2020-14/200105, ев. бр. 451-03-9/2021-14/200105, ев. бр. 451-03-68/2022-14/200105, ев. бр. 451-03-47/2023-01/200105 и ев. бр. 451-03-65/2024-03/200105) и на престижном научноистраживачком пројекту Фонда за науку (ев. бр. 6523109), као и други остварени резултати Ђорђа Јевтића, магистар инжењерских наука, суштински су повезани са научном облашћу којој припада предложена тема докторске дисертације, што кандидата, према мишљењу Комисије, квалификује за самосталан, успешан и ефикасан теоријски, као и комплексан експериментални научноистраживачки рад на предметној докторској дисертацији.

2. ПРЕДМЕТ, НАУЧНА ОБЛАСТ И ЦИЉ ИСТРАЖИВАЊА

2.1 Предмет истраживања

Предмет планираних истраживања односи се на развој и имплементацију функционалног прототипа интелигентно управљаног робота за роботске задатке специфичне намене, превасходно чишћења габаритних стаклених површина високих зграда, преко посебно успостављеног модела интелигентног управљања базираног на примени дубоког учења ојачавањем, у циљу остваривања аутономног кретања мобилног робота - летелице.

У ужем смислу, планирана истраживања су усмерена на научноистраживачки циљ развоја когнитивних мобилних робота минимизираних масе, са аутономним понашањем при извршавању роботског задатка специфичне намене, користивши интелигентно управљање засновано на хетерогеној сензорској подршци, посебно камери, као и дубоком учењу ојачавањем. Дакле, циљ је да они буду у стању да остваре реконфигурабилност морфолошке структуре у зависности од услова окружења, посебно посматрано кроз ограничења приликом аутономног кретања. За остваривање овог ултимативног циља који обухвата развој модела интелигентног управљања мобилног робота - летелице (МБЛ) базираног на оцени његовог тренутног стања, посебно када се ради о непредвидивим и динамичким условима радног окружења (на пример: различит коефицијент трења котрљања точкова, динамички утицај ваздушних струјања, потенцијални отказ неког од актуатора итд.), ова докторска дисертација фокусираће се на његове когнитивне способности. Развој когнитивних способности МБЛ у циљу аутономног доношења правовремених одлука о даљим акцијама, као и остваривање интелигентног понашања применом алгорита дубоког учења ојачавањем (енгл. *Deep Reinforcement Learning* - DRL), научноистраживачки је циљ највишег ранга. Реч је о оригиналној идеји значајној за развој науке, посебно за нову примену мултидисциплинарне области - когнитивне роботике.

Последњих деценија, приметан је перманентан пораст броја високих зграда (тзв. небодера) у свету, а и код нас. Најновији трендови у архитектури ових грађевина базирају се углавном на имплементацији „егзотичних“ материјала и комплексних површина, а све у циљу задовољења најстрожих захтева клијената, као и потребе за модернизацијом градова. Претходна тврдња подразумева и честу употребу стакла као уградног материјала њихових екстеријера. Тренутно се у свету стаклени екстеријери, у највећој мери, одржавају традиционалним методама, односно ангажовањем добро обучених радника за рад на висинама [12]. Стога се, данас, употреба робота намењених чишћењу екстеријера високих зграда сматра рационалним избором. Свакако, додатни и битни разлози за интеграцију робота у систем за одржавање стаклених екстеријера су: хуманизација рада, могућност перманентног обављања задатка, повећање ефикасности самог процеса чишћења, могућност учесталог одржавања стаклених површина, уштеда значајних материјалних средстава како при пројектовању зграде, тако и током одржавања у експлоатацији. Роботи који имају могућност кретања уз вертикалну подлогу (енгл. *wall-climbing robots*), а којима припадају и роботи намењени посебним задацима као што је чишћење габаритних стаклених површина екстеријера високих зграда (енгл. *glass and façade-cleaning robots*), представљају предмет научних истраживања током претходних година [12,13]. Такође, мале беспилотне летелице представљају актуелни тип летелица чија је морфолошка структура у функцији оригиналног развоја предметног роботског система специфичне намене, а који ће имати и напредне карактеристике мобилног робота са циљем остваривања жељеног положаја радног органа при обављању задатка чишћења стаклене површине, уз адекватне маневарске способности [8].

Дубоко учење ојачавањем (DRL) обезбеђује могућност мобилним роботским системима да остваре завидне управљачке перформансе у изразито динамичким окружењима и случајевима када је модел објекта управљања непознат и/или непотпун и/или неодређен. Специфичност ове актуелне технике вештачке интелигенције огледа се у учењу оптималног понашања интелигентног агента кроз интеракцију са окружењем у коме егзистира. Главна предност DRL-а је могућност генерисања адекватних акција у случају непостојања

експлицитног модела, који поред карактеристика околине са којом је агент у интеракцији, укључује и математички модел објекта управљања [19]. Друга важна предност огледа се у томе што методе базиране на DRL-у дају значајно боље излазе у односу на традиционалне приступе управљању, како са аспекта минималне захтеване фреквенције процесирања информација (100 Hz у поређењу са 250 Hz), тако и у погледу брзине остваривања жељених управљачких задатака [1], што је од посебног значаја код робота специфичне намене, када свако додатно кашњење у систему може довести до фаталног исхода у понашању. Трећа предност техника базираних на DRL-у је могућност њихове имплементације у изразито динамичким окружењима [21,22], што у потпуности коегзистира са чињеницом да МБЛ своје радне задатке обавља на стакленој површини са непредвидивим и променљивим коефицијентима трења/котрљања, као и у условима изражених ваздушних струјања. Развој, тестирање и верификација модела интелигентног управљања базираног на дубоком учењу ојачавањем, биће реализовани у окружењу MATLAB Simulink софтвера. Излаз из модела управљања су управљачке величине (на пример: бројеви обрта точкова, бројеви обрта ротора итд.). На основу фузије хетерогених сензорских информација о окружењу, посебно у условима отвореног простора, МБЛ доноси одлуку о томе коју акцију мора да предузме у одређеном, дакле оцењеном стању система, због чега је изабрана веома ефикасна техника вештачке интелигенције, дубоко учење ојачавањем. Идеја ове докторске дисертације је да овакав вид интелигентног роботског управљања обезбеди могућност за остваривање аутономног понашања МБЛ, иницијално унутар лабораторијског окружења, и то на основу његових остварених когнитивних способности који укључују развој пилот-прототипа роботског система, као и „испитног стола“ у циљу експерименталне валоризације техничких перформанси. Како је управљачки модел базиран на алгоритму дубоког учења ојачавањем захтеван, посебно у погледу процесорских ресурса, потребно је омогућити роботском систему повезивање у информатичко-комуникациону мрежу, и то укључујући периферне агенте: базну станицу (лаптоп) и *bluetooth* модул, а биће коришћени и изванредни ресурси Националне платформе за вештачку интелигенцију са којом Машински факултет у Београду има потписан активни Уговор и изузетну вишегодишњу сарадњу.

Планирана истраживања, у оквиру предложене докторске дисертације, по садржају обухватају неколико актуелних истраживачких целина које се односе на: (i) мобилне роботе који имају могућност аутономног кретања уз вертикалну подлогу (енгл. *wall-climbing robots*), (ii) мобилне роботе намењене чишћењу габаритних стаклених екстеријера високих зграда (енгл. *glass and façade-cleaning robots*), (iii) мобилне роботе - летелице (енгл. *aerial robots*), (iv) мале беспилотне летелице, (v) развој система перцепције који обухвата аквизицију и обраду података комплексног хетерогеног сензорског система који укључује више различитих типова сензора (на пример: даваче силе, даваче јачине струје, даваче за мерење нивоа вакуума, јединице за инерционо мерење (енгл. *Inertial Measurement Unit – IMU*), визуелни систем перцепције заснован на камери итд.) у циљу учења и генерисања корисних информација за интелигентни управљачки систем, (vi) развој оригиналног алгоритма дубоког учења ојачавањем базираног на конволуционим неуронским мрежама (енгл. *Convolution Neural Networks – CNN*) у циљу примене у реалном времену, (vii) развој модела за интелигентно роботско управљање базираног на информацијама добијеним од система перцепције, посебно камере.

2.2 Преглед стања у области истраживања

У наставку, наведена су нека од релевантних и кључних научних достигнућа, која се баве поменутом тематиком, што представља основ за покретање истраживања предвиђеног овом докторском дисертацијом:

- [1] Song, Y., Romero, A., Müller, M., Koltun, V., & Scaramuzza, D. (2023). Reaching the limit in autonomous racing: Optimal control versus reinforcement learning. *Science Robotics*, 8(82), eadg1462.
- [2] Jevtić, Đ., Miljković, Z., Petrović, M., & Jokić, A. (2023). Reinforcement Learning-based Collision Avoidance for UAV. In *2023 10th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETran)* (pp. 1-6). IEEE.

- [3] Sihite, E., Kalantari, A., Nemovi, R., Ramezani, A., & Gharib, M. (2023). Multi-Modal Mobility Morphobot (M4) with appendage repurposing for locomotion plasticity enhancement. *Nature communications*, 14(1), 3323.
- [4] Jokić, A., Petrović, M., & Miljković, Z. (2022). Semantic segmentation based stereo visual servoing of nonholonomic mobile robot in intelligent manufacturing environment. *Expert Systems with Applications*, 190, 116203.
- [5] Miljković, Z., & Jevtić, Đ. (2022). Object Detection and Reinforcement Learning Approach for Intelligent Control of UAV. In *International Conference "New Technologies, Development and Applications"* (pp. 659-669). Cham: Springer International Publishing.
- [6] Nahrendra, I. M. A., Tirtawardhana, C., Yu, B., Lee, E. M., & Myung, H. (2022). Retro-RL: Reinforcing nominal controller with deep reinforcement learning for tilting-rotor drones. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 7(4), 9004-9011.
- [7] Lee, H., Jeong, M., Kim, C., Lim, H., Park, C., Hwang, S., & Myung, H. (2021). Low-level pose control of tilting multirotor for wall perching tasks using reinforcement learning. In *2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (pp. 9669-9676). IEEE.
- [8] Lee, H., Yu, B., Tirtawardhana, C., Kim, C., Jeong, M., Hu, S., & Myung, H. (2021). CAROS-Q: climbing aerial robot system adopting rotor offset with a quasi-decoupling controller. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 6(4), 8490-8497.
- [9] Kim, K., Spieler, P., Lupu, E. S., Ramezani, A., & Chung, S. J. (2021). A bipedal walking robot that can fly, slackline, and skateboard. *Science Robotics*, 6(59), eabf8136.
- [10] Jokić, A., Petrović, M., Kulesza, Z., & Miljković, Z. (2021). Visual Deep Learning-Based Mobile Robot Control: A Novel Weighted Fitness Function-Based Image Registration Model. In *International Conference "New Technologies, Development and Applications"* (pp. 744-752). Cham: Springer International Publishing.
- [11] Miljković, Z., Jevtić, Đ., & Svorcan, J. (2021). Reinforcement learning approach for autonomous UAV navigation in 3D space. In *Proceedings of the 14th International Scientific Conference MMA 2021-Flexible Technologies, Novi Sad, September 23-25, 2021* (pp. 189-192). Novi Sad: Faculty of Technical Sciences.
- [12] Seo, T., Jeon, Y., Park, C., & Kim, J. (2019). Survey on Glass And Façade-Cleaning Robots: Climbing Mechanisms, Cleaning Methods, and Applications. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 6(2), 367-376.
- [13] Schmidt, D., & Berns, K. (2013). Climbing robots for maintenance and inspections of vertical structures - A survey of design aspects and technologies. *Robotics and Autonomous Systems*, 61(12), 1288-1305.
- [14] Xu, J., Du, T., Foshey, M., Li, B., Zhu, B., Schulz, A., & Matusik, W. (2019). Learning to fly: computational controller design for hybrid uavs with reinforcement learning. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 38(4), 42:1-42:12.
- [15] Kendall, A., Hawke, J., Janz, D., Mazur, P., Reda, D., Allen, J. M., Lam, V. D., Bewley, A., & Shah, A. (2019). Learning to drive in a day. In *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 8248-8254). IEEE.
- [16] Koch, W., Mancuso, R., West, R., & Bestavros, A. (2019). Reinforcement learning for UAV attitude control. *ACM Transactions on Cyber-Physical Systems*, 3(2), 22:1-22:21.
- [17] Singla, A., Padakandla, S., & Bhatnagar, S. (2019). Memory-based deep reinforcement learning for obstacle avoidance in UAV with limited environment knowledge. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 22(1), 107-118.
- [18] Tan, J., Zhang, T., Coumans, E., Iscen, A., Bai, Y., Hafner, D., Bohez, S., & Vanhoucke, V. (2018). Sim-to-real: Learning agile locomotion for quadruped robots. *arXiv preprint arXiv:1804.10332*.
- [19] Sutton, R. S., & Barto, A. G. (2018). *Reinforcement learning: An introduction*. MIT press.
- [20] Gandhi, D., Pinto, L., & Gupta, A. (2017). Learning to fly by crashing. In *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (pp. 3948-3955). IEEE.
- [21] Hwangbo, J., Sa, I., Siegwart, R., & Hutter, M. (2017). Control of a quadrotor with reinforcement learning. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2(4), 2096-2103.
- [22] Heess, N., Tb, D., Sriram, S., Lemmon, J., Merel, J., Wayne, G., Tassa, Y., Erez, T., Wang, Z., Eslami, S. M. A., Riedmiller, M., & Silver, D. (2017). Emergence of locomotion behaviours in rich environments. *arXiv preprint arXiv:1707.02286*.

- [23] Imanberdiyev, N., Fu, C., Kayacan, E., & Chen, I. M. (2016). Autonomous navigation of UAV by using real-time model-based reinforcement learning. In *2016 14th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV)* (pp. 1-6). IEEE.
- [24] Sadeghi, F., & Levine, S. (2016). Cad2rl: Real single-image flight without a single real image. *arXiv preprint arXiv:1611.04201*.
- [25] Mitić, M. (2014). *Empirijsko upravljanje inteligentnog mobilnog robota bazirano na mašinskom učenju* (Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu – Mašinski fakultet).
- [26] Mnih, V., Kavukcuoglu, K., Silver, D., Graves, A., Antonoglou, I., Wierstra, D., & Riedmiller, M. (2013). Playing atari with deep reinforcement learning. *arXiv preprint arXiv:1312.5602*.
- [27] Zhang, H., Zhang, J., & Zong, G. (2004). Requirements of glass cleaning and development of climbing robot systems. In *2004 International Conference on Intelligent Mechatronics and Automation, 2004. Proceedings.* (pp. 101-106). IEEE.

Развој модела интелигентног управљања у циљу остваривања аутономног кретања робота намењеног чишћењу габаритних стаклених површина екстеријера високих зграда, подразумева решавање комплексног роботског задатка који се односи на хардверско-софтверску интеграцију у функцији генерисања његових когнитивних способности. Први корак у решавању наведеног проблема односи се на пројектовање специфичне конфигурације МБЛ који треба да реши пројектне захтеве дефинисане у [12,27]. Детаљан преглед стања у области истраживања робота намењених реализацији посебних задатака на висинама дат је у литературним изворима [12,13]. Класификација робота који имају могућност кретања уз вертикалну површину извршена је према два критеријума [13]: (1) према начину остваривања кретања (система за локомоцију) и (2) према начину остваривања приањања, контакта са подлогом. На основу извршене упоредне анализе у раду [13], може да се закључи да се за посебне задатке који се реализују на стакленим површинама екстеријера високих зграда користе системи који приањање остварују дејством силе потиска или електростатичке силе. У погледу одабира оптималног система за локомоцију, закључује се да су начини кретања остварени помоћу шина или ужади, као и помоћу ногу најпогоднији за употребу код овог типа мобилног робота [12]. Потребно је нагласити да су код система чије је кретање остварено помоћу шина или ужади, кључни недостаци слаба прилагодљивост конфигурацији радне површине и лоше маневарске способности, док се код система чије је кретање остварено помоћу ногу недостаци односе на немогућност остваривања континуитета у раду, малу брзину кретања и механичку комплексност. Претходни закључци довели су до тога да је за решавање уочених недостатака, осим код мобилних робота који имају могућност кретања уз вертикалну подлогу и робота намењених чишћењу габаритних стаклених површина екстеријера високих зграда, неопходно проширити област истраживања, те у значајној мери истражити и МБЛ: (1) намењене прању и чишћењу (енгл. *washing and cleaning drones*), (2) који имају могућност приањања на вертикалну површину (енгл. *perching drones*), (3) који се напајају са тла (енгл. *tethering drones*), (4) који су намењени гашењу пожара, инспекцији, одржавању, фарбању и сл.

Убрзани развој МБЛ у последњој деценији, оријентисан ка многим мултидисциплинарним истраживањима, иницирао је појаву нове категорије робота који имају способност кретања уз вертикалну подлогу (енгл. *wall-climbing drones*). Потреба за овим роботима је проистекла из чињенице да МБЛ нису у стању да се адекватно позиционирају, нити поседују потребну стабилност при обављању задатака на висинама. Наглашава се да МБЛ који имају способност кретања уз вертикалну подлогу могу да испуне ове захтеве својом транзицијом из положаја у лету у положај на радној површини и даљим кретањем по њој, најчешће користећи додатне ослонце/систем за локомоцију. У контексту предметне докторске дисертације, издавају се резултати истраживачке лабораторије *Urban Robotics Lab* из Јужне Кореје. Један од последњих истраживачких излаза поменуте лабораторије је прототип интелигентног МБЛ заснован на хексакоптеру Y-конфигурације (3 пара коаксијалних ротора) са механизмом који омогућава симултану промену оријентације (у истом смеру и за исте вредности угла оријентације) два пара коаксијалних ротора око унапред задате осе [8]. Оваква реализација омогућава промену морфолошке структуре МБЛ у ваздуху, што је од суштинске важности за поуздану транзицију робота на радну површину. Истиче се да је

остваривање специфичне конфигурације МБЛ, представљене у [8], резултат седмогодишњих истраживања са циљем одређивања оптималне хардверске конфигурације за поменути пројектантски, али и научноистраживачки исход највишег ранга. Ипак, да би ови работи имали своју практичну примену, неопходно је да остваре стабилност током процеса транзиције, као и поузданост у погледу спречавања незгода са фаталним исходом. Логичан наставак ових истраживања подразумева развој интелигентног управљачког система, базираног на алгоритмима дубоког учења ојачавањем, што је иницијално представљено у [6,7]. Овде је потребно издвојити једно кључно запажање. Наиме, у референци [7], истакнут је значај усвајања вектора акција (представљен је преко шест вредности вучних сила), као и значај оствареног угла оријентације у формирању обучавајућих парова за предложени модел дубоког учења ојачавањем. Дакле, разлика у временима одзива серво мотора и електричних мотора који погоне роторе је различита и ово представља суштински разлог немогућности њихове заједничке интеграције у вектор акција. Због тога, усвојено је да једна од величина вектора стања буде и угао оријентације радног органа серво мотора.

Важни истраживачки резултати, који се односе на развој специфичне конфигурације робота са изразитом прилагодљивошћу морфолошке структуре условима окружења, дати су у [3,9]. Због изузетне сличности са идејом предметне докторске дисертације, у погледу хардверске комплексности, издвојени су као репрезентативни примери за иницијалну анализу.

Данашњи интелигентни МБЛ подразумевају аутономно кретање, уз поседовање когнитивних способности, дакле изразиту могућност адаптације на неодређености у окружењу, односно управљачки систем код ових роботских система треба да одговори на читав скуп комплексних захтева који му се намећу. За разлику од робота који своје радне задатке обављају на тлу, интелигентне МБЛ карактерише следеће: (1) свака грешка или кашњење у управљачком систему може потенцијално довести до фаталног исхода, тј. колизије са окружењем и/или у најгорем случају падања на тло, (2) смањена тачност у остваривању жељеног положаја, (3) робусност која се односи на остваривање жељеног понашања услед поремећаја различитог карактера (нпр. динамички утицаји окружења, недовољна тачност динамичког модела објекта управљања, почетни услови и сл.) мора бити на високом нивоу, (4) очување стабилности и безбедност при обављању задатака на висинама, чак и услед отказа на неком од актуатора, (5) способност реализације управљачких задатака, како у различитим радним режимима, тако и током транзиције између радних режима.

Први пример интеграције конволуционих неуронских мрежа и алгоритма Q-учења, односно примене дубоког учења ојачавањем, приказан је у раду [26]. Истраживање је показало да је на основу издвојених дигиталних информација могуће генерисати адекватне акције одређене вредносном функцијом. Даље, прва примена дубоког учења ојачавањем за потребе аутономне вожње аутомобила дата је у литератури [15]. У раду је демонстрирана могућност извршавања комплексних управљачких задатака на основу информација добијених од камере, уз примену акција у континуалном домену, као и функције наградне оцене стања.

Научноистраживачки резултати који су дати у референцама [1,14,16,21] указују на то да су интелигентни МБЛ, чији су управљачки системи базирани на алгоритмима дубоког учења ојачавањем, супериорнији у поређењу са МБЛ који су конвенционално управљани. Истраживање представљено у референци [1], имало је за циљ одређивање фундаменталних разлика између техника дубоког учења ојачавањем и оптималног управљања, на примеру агилног МБЛ. Први део студије укључивао је квалитативну анализу, односно поређење остварених времена лета (од почетног до циљног положаја) и степена успешности (односно да ли ће доћи до појаве фаталне грешке у управљачком систему) за две различите методе управљања. Утврђено је да је степен успешности управљачког система базираног на алгоритму дубоког учења ојачавањем вишег нивоа у односу на оптималне методе управљања током симулационе евалуације, док је приликом тестирања у реалним условима та разлика била још израженија, јер је једино управљачки систем базиран на алгоритму дубоког учења ојачавањем успешно реализовао задатак. Добијени резултати су иницирали даља истраживања, односно подстакли истраживаче да пронађу

фундаменталне разлоге установљене супериорности. Детаљном анализом представљеном у референци [1], дошло се до закључка да су алгоритми базирани на машинском учењу ојачавањем супериорнији у односу на алгоритме оптималног управљања због њихове могућности да директно оптимизују функцију циља (функција наградне оцене стања), која се код дубоког учења ојачавањем може неупоредиво боље дефинисати, односно боље прилагодити проблему који се третира. Додатно, суштински важно запажање, односи се на брзину процесирања информација управљачког система. Дакле, за разлику од конвенционалних метода управљања МБЛ где минимална захтевана фреквенција процесирања информација износи 250 Hz, управљачки системи базирани на алгоритмима дубоког учења ојачавањем захтевају 2,5 пута мању фреквенцију рада (100 Hz). Истраживање представљено у референци [21] односи се на робусност, а што је демонстрирало способност интелигентног управљачког система, базираног на дубоком учењу ојачавањем, да изврши стабилизацију летелице при почетној брзини од 5 m/s, чији је правац и смер вектора кретања произвољан. Осим поменутог, остварена је брзина процесирања обученог модела од 7 μ s што је изузетан резултат. Упоредна анализа PID регулатора и управљачког система базираног на дубоком учењу ојачавањем била је предмет истраживања у референци [16]. Анализиран је утицај поменутих метода управљања на тачност при остваривању жељених углова оријентације (енгл. *attitude control*) МБЛ. Остварени резултати показали су значајне предности алгоритма дубоког учења ојачавањем – смањење грешке за 44 %, као и 1,15 - 2,5 пута краћа времена успона (енгл. *rise time*) при остваривању жељених углова оријентације. Интелигентни управљачки систем, базиран на дубоком учењу ојачавањем, који обезбеђује аутоматско прилагођавање летним режимима и који је истовремено применљив на различитим конфигурацијама хибридних беспилотних летелица, представљен је у референци [14]. За разлику од најчешће коришћених променљивих које фигуришу у вектору стања [21], уведена су одређена поједностављења ради смањења његове димензионалности. Ово је кључни допринос за остваривање завидних управљачких перформанси и робусности у погледу имплементације на различитим конфигурацијама хибридних беспилотних летелица.

Остале примене алгоритама дубоког учења ојачавањем за различите управљачке задатке, и то превасходно „вишег“ нивоа, приказане су у изворима [2,5,11,17,20,23,24]. Задаци који су третирани у наведеним референцама, углавном се односе на алгоритме за аутономну навигацију и избегавање препрека, што је такође значајно за ову анализу.

Нова примена алгоритама дубоког учења ојачавањем доноси и евидентне научне изазове, као што су: (1) захтевност у погледу процесорских ресурса, и то пре свега модела који третирају континуалне просторе стања и акција изразите димензионалности што последично изискује дистрибуирање управљачких задатака на више процесорских ресурса, али и додатна истраживања у погледу њихове синхронизације и размене генерисане базе знања током процеса обучавања, (2) креирање адекватне функције наградне оцене стања чије чак и минималне модификације могу довести до нежељених резултата у понашању управљачког система, (3) постојање разлике између симулационог и реалног модела интелигентног роботског управљања, (4) применљивост једноставних функција наградне оцене стања у циљу решавања комплексних управљачких проблема и сл. Наведени проблеми су третирани и детаљно описани у следећим литературним изворима [14,18,19,22].

Оригинални алгоритам стерео визуелног управљања за нехолономни мобилни роботски систем приказан је у референци [4]. У поређењу са претходним алгоритмима визуелног управљања, предложени алгоритам као информације користи семантичке мапе, чије класе сваког пиксела неупоредиво боље описују сцену од нивоа осветљености пиксела. У истраживању представљеном у референци [10], аутори су, за потребе регистрације слике примењене у оквиру визуелног управљања, развили нову функцију циља, базирану на тежинским коефицијентима. На овај начин, остварено је знатно побољшање домена конвергенције иницијалне грешке визуелног управљања.

У поређењу са алгоритмима дубоког учења ојачавањем, примењеним у анализираној литератури, значајан научни искорак биће остварен кроз развој модела интелигентног

роботског управљања чији ће вектор акција осим бројева обрта ротора, чинити и бројеви обрта точкова, а потенцијално и додатне управљачке величине попут жељених углова оријентације радног органа серво мотора и сл. Дакле, могуће је постићи виши ниво тачности оствареног положаја интелигентног МБЛ при обављању задатка на специфичној радној површини, као и робусност у погледу остваривања жељеног когнитивног понашања услед поремећаја различитог карактера. Предметна докторска дисертација представља логичан наставак вишегодишњих мултидисциплинарних истраживања која се реализују на Катедри за производно машинство у домену роботике и машинског учења ојачавањем [25].

3. ОСНОВНЕ ХИПОТЕЗЕ

На основу знања и искустава генерисаних досадашњим научним истраживањима, као и детаљном анализом кључних литературних извора у предметној мултидисциплинарној области - когнитивној роботизи, будући рад на докторској дисертацији базираће се на симулационој валидацији и експерименталној верификацији у реалном лабораторијском окружењу, коришћењем предложеног модела интелигентног роботског управљања, који се заснива на оригиналном алгоритму дубоког учења ојачавањем, а у циљу остваривања аутономности кретања МБЛ при извршавању роботског задатка специфичне намене – чишћења габаритних стаклених површина високих зграда.

Истраживања ће бити заснована на следећим полазним хипотезама:

- Прва хипотеза: Модел интелигентног управљања, базиран на оригиналном алгоритму дубоког учења ојачавањем, могуће је применити за остваривање аутономног кретања мобилног робота - летелице, посебно по стакленој површини током обављања роботског задатка чишћења.
- Друга хипотеза: Когнитивне способности мобилног робота - летелице, базиране на оригиналном алгоритму дубоког учења ојачавањем, могу да обезбеде поуздано и ефикасно обављање роботског задатка чишћења стаклених површина на основу оцењеног тренутног стања роботског система.

4. НАУЧНЕ МЕТОДЕ ИСТРАЖИВАЊА

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

- Методе за моделирање и обучавање различитих архитектура конволуционих неуронских мрежа (енгл. *Convolution Neural Networks* – CNN);
- Методе интелигентног роботског управљања на основу информација добијених од хетерогеног сензорског система (на пример: давачи силе, давачи јачине струје, јединица за инерционо мерење, давачи за мерење нивоа вакуума, дигитална камера итд.);
- Методе за компјутерско пројектовање базиране на актуелним CAD софтверима (на пример: SolidWorks) за конфигурисање тродимензионалног модела МБЛ, који укључује адекватно моделирање подсистема за остваривање транзиције, подсистема за кретање по радној површини, подсистема за адхезију, подсистема за чишћење, као и погонског, мерног и сензорског подсистема;
- Методе за развој, тестирање и верификацију модела интелигентног роботског управљања у оквиру софтверског окружења MATLAB Simulink;
- Методе софтверско-хардверске имплементације посебно развијеног алгоритма дубоког учења ојачавањем за остваривање аутономног кретања МБЛ;

- Методе за обраду сигнала током аквизиције у експерименталним лабораторијским условима;
- Методе за експерименталну верификацију и валидацију предложених хипотеза и статистичку анализу остварених резултата.

5. ОЧЕКIVАНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

Научна истраживања, у оквиру предметне докторске дисертације, подразумевају остваривање следећих очекиваних научних доприноса:

- Нови, иновативни приступ развоју комплексног роботског система специфичне намене који треба да обезбеди савладавање препрека произвољних димензија, уз виши ниво тачности оствареног положаја при обављању роботског задатка на радној површини;
- Нови модел интелигентног роботског управљања, базиран на оригиналном алгоритму дубоког учења ојачавањем намењен за аутономно кретање МБЛ.

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 роботе намењене посебним задацима на висинама, односно интелигентно управљање МБЛ, остварено на основу аквизиције и обраде сензорских информација;
2. Пројектовање, моделирање и симулација функционалности специфичне конфигурације прототипа МБЛ на бази вишекритеријумске оптимизације енергетског биланса кретања робота, развоја хибридног система перцепције намењеног аквизицији података/сигнала различите природе, као и фузије хетерогених сензорских информација и интелигентног интерпретера/перцептора стања роботског система;
3. Развој пилот-прототипа роботског система, екстерног модула за напајање робота електричном енергијом, управљачког софтвера „нижег нивоа“, уређаја за удаљену комуникацију, *bluetooth* модула и мобилне апликације;
4. Функционално тестирање реализованих комуникационих линија на релацији: уређај за удаљену комуникацију/мобилна апликација – *bluetooth* модул – мобилни робот - летелица – лаптоп, а потом и провера функционалности, и то прво појединачних система МБЛ, а затим и целокупног роботског система у лабораторијским условима рада;
5. Примена напредних техника за дигиталну обраду нестационарних сигнала ради добијања повратне информације о репрезентативним обележјима сигнала, а у циљу валидације механичког прорачуна МБЛ, утврђивања управљачких величина од интереса при различитим режимима рада;
6. Анализа алгоритама дубоког учења ојачавањем од значаја за развој интелигентног управљања МБЛ, и то превасходно оних са континуалним простором стања и акција, као и метода метахеуристичке оптимизације применљивих у реалном времену;
7. Развој система интелигентног роботског управљања који на основу фузије сензорских информација и примењених техника вештачке интелигенције (дубоког учења ојачавањем и биолошки инспирисаних алгоритама оптимизације) има когнитивне способности, односно могућност закључивања, доношења одлука у реалном времену и учења кроз генерализацију понашања;
8. Развој и тестирање оригиналног MATLAB Simulink модела (интегрише математички модел објекта управљања и модел интелигентног роботског управљања који је

базиран на алгоритму дубоког учења ојачавањем), уз реализовану комуникацију са софтверима који симулирају информације са сензора у условима окружења блиским реалним (нпр. CopeliaSim, Gazebo итд.) и реализоване комуникационе линије са хардверским компонентама (на пример: управљачка јединица за контролу летења (енгл. *flight controller*), микроконтролери, графичке процесорске јединице високих перформанси (енгл. *GPU processing units*) посебно развијене за аутономне роботске системе), као и са базном станицом (лаптоп рачунар). MATLAB Simulink ће бити коришћен као интеграциона платформа за неке од следећих модула: Aerospace Blockset, Deep Learning Toolbox, Reinforcement Learning, UAV Toolbox, Python, ROS Toolbox, Gazebo, PX4 Autopilot, Nvidia CUDA, Open CV итд., који се најчешће користе за развој модела интелигентног управљања МБЛ. У овој фази, од суштинског је значаја валидација и верификација целокупног модела који укључује његово повезивање са процесорским јединицама различитих карактеристика, као и њихову синхронизацију. Основна предност употребе престижне MATLAB Simulink платформе огледа се у могућности валидације комплексних модела интелигентног управљања, и то прво само у оквиру симулационог окружења (енгл. *Model-in-the-Loop* – MIL), потом на екстерном рачунару (енгл. *Software-in-the-Loop* – SIL) и на крају повезивањем са процесорским јединицама које у оквиру овог корака нису имплементирани на МБЛ (енгл. *Hardware-in-the-Loop* – HIL). MIL подразумева тестирање функционалности модела интелигентног управљања, SIL проверава да ли се код који је генерисан у MATLAB-у на основу Simulink модела понаша на идентичан начин као модел при тестирању у оквиру MIL-а, док примена HIL-а омогућава тестирање кода на процесорским јединицама које ће бити коришћене на роботу, у циљу валидације понашања модела управљања у реалном времену, али и провере синхронизације између процесорских јединица различитих радних тактова.

9. Реализација комуникационих линија у оквиру технолошки напредног хардверско-софтверског скупа компонената које у међусобној интеракцији реализују управљачке задатке нижег и вишег нивоа;
10. Тестирање и експериментална верификација оригинално развијеног модела интелигентног роботског управљања, базираног на дубоком учењу ојачавањем и имплементираним на МБЛ;
11. Анализа и дискусија остварених експерименталних резултата.

Оквирна структура предложене докторске дисертације обухвата следеће целине:

1. Увод. Интелигентни мобилни роботи намењени чишћењу габаритних стаклених екстерија високих зграда. Дубоко учење ојачавањем. Биолошки инспирисане технике вештачке интелигенције.
2. Преглед и критичка анализа стања у области досадашњих теоријских и експерименталних истраживања везаних за интелигентно управљање мобилних робота - летелица, са посебним освртом на методе код којих се примењују технике вештачке интелигенције.
3. Пројектовање интелигентног мобилног робота - летелице.
4. Технике за дигиталну обраду нестационарних сигнала.
5. Алгоритми дубоког учења ојачавањем. Модификација и избор оригиналног приступа.
6. Развој модела интелигентног управљања мобилног робота - летелице који подразумева: нови систем перцепције, систем за интелигентно управљање базиран на оригинално модификованом и прилагођеном алгоритму дубоког учења ојачавањем, као и напредни систем за одлучивање.
7. Тестирање и експериментална верификација роботског система. Дискусија резултата.
8. Закључци.
9. Литература.
10. Прилози.

7. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу анализе поднете пријаве теме докторске дисертације кандидата Ђорђа Јевтића, мастер инжењера машинства, архивирани под евиденцијним бројем 933/1 од 6.6.2024. године, а сходно сагласности Колегијума наставника Катедре за производно машинство број 933/2 од 18.6.2024. године, као и према Одлуци Наставно-научног већа број 933/3 од 11.7.2024. године, Комисија за подношење извештаја о научној заснованости теме 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 Наставно-научном већу Универзитета у Београду – Машинског факултета да се

Ђорђу Јевтићу, маст.инж.маш.

одобри израда докторске дисертације са темом под насловом

Аутономно кретање робота специфичне намене базирано на дубоком учењу ојачавањем

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

На основу Одлуке Наставно-научног већа број 933/3 од 11.7.2024. године, за **ментора** кандидата Ђорђа Јевтића, маст.инж.маш., током рада на предметној докторској дисертацији, Комисија предлаже да буде именован **др Зоран Миљковић, редовни професор** Универзитета у Београду – Машинског факултета који у претходних десет година има 16 објављених радова у часописима са импакт фактором са SCI-Web of Science® листе (Образац 3.), и то у домену машинског инжењерства – производног машинства, дакле има све неопходне компетенције у оквиру научне области којој припада тема докторске дисертације, са чиме је Комисија у потпуности сагласна.

С поштовањем,

Београд, 22.8.2024. год.

Чланови Комисије:

.....
Др Милица Петровић, ванредни 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 Јелена Сворцан, ванредни професор
Универзитет у Београду – Машински факултет

.....
Др Александар Родић, научни саветник
Институт Михајло Пупин