

Факултет Машински

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

468/4

(Број захтева)

Веће научних области техничких наука

(Назив већа научне области коме се захтев
упућује)

24.04.2025.

(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:

**ИНТЕРАКТИВНО ПРОГРАМИРАЊЕ ИНДУСТРИЈСКИХ РОБОТА ПРИМЕНОМ
ТЕХНОЛОГИЈА ПРОШИРЕНЕ РЕАЛНОСТИ**

(пун назив предложене теме докторске дисертације)

НАУЧНА ОБЛАСТ: Машинство (ужа научна област: производно машинство)**ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ:**

- Име, име једног од родитеља и презиме кандидата:
АНДРИЈА (ДРАГАН) ДЕВИЋ
- Претходно образовање (назив и седиште факултета, студијски програм):
Универзитет у Београду - Машински факултет, Краљице Марије 16, 11120 Београд 35
- Година завршетка претходног нивоа студија: 2020.
- Година уписа на докторске студије: 2020.
- Назив студијског програма докторских студија: Машинско инжењерство

ПОДАЦИ О МЕНТОРУ:

Име и презиме ментора: Никола Славковић

Звање: ванредни професор

Списак радова који квалификују ментора за вођење докторске дисертације:

- [1] Slavkovic Nikola, Zivanovic Sasa, Dimic Zoran, Kokotovic Branko (2024) An advanced machining robot flexible programming methodology supported by verification in a virtual environment, International Journal of Computer Integrated Manufacturing 1–19, <https://doi.org/10.1080/0951192X.2024.2428682>, IF3.7-2023 (21/51) M22
- [2] Zivanovic Sasa, Dimic Zoran, Furtula Mladen, Slavkovic Nikola, Djurkovic Marija, Vidakovic Jelena (2024) A flexible programming and verification methodology for reconfigurable CNC woodworking machine, BioResources 19(4):9708–9726, <https://doi.org/10.15376/biores.19.4.9708-9726>, IF1.5-2023 (9/20) M22
- [3] Vorkapić Nikola, Slavkovic Nikola, Kokotovic Branko, Zivanovic Sasa, Dimic Zoran (2024) Implementation of a cutting forces model through virtual simulation of machining process, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 135:3085–3099, <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14681-7>, IF3.2-2023 (27/51) M22
- [4] Milutinovic Milan, Vasilic Goran, Zivanovic Sasa, Dimic Zoran, Kokotovic Branko, Slavkovic Nikola (2024) Calculation of wheel path for 3+2-axis grinding of brazed carbide profilemill cutters for wood and plastic, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 130:4603–4620, <https://doi.org/10.1007/s00170-024-12992-3>, IF3.2-2023 (27/51) M22
- [5] Živanović Saša, Dimić Zoran, Rakić Aleksandar, Slavković Nikola, Kokotović Branko, Manasijević Srećko (2023) Programming methodology for multi-axis CNC woodworking machining center for advanced manufacturing based on STEP-NC, Wood Material Science & Engineering 18(2):630-639, <https://doi.org/10.1080/17480272.2022.2057816>, IF2.3-2023 (6/20) M21
- [6] Stojadinović Slavenko, Živanović Saša, Slavković Nikola, Durakbasa Numan M (2021) Digital measurement twin for CMM inspection based on step-NC, International Journal of Computer Integrated Manufacturing 34(12):1327-1347, <https://doi.org/10.1080/0951192X.2021.1972460>, IF4.42-2021 (21/51) M22
- [7] Vorkapić Nikola, Pjević Miloš, Popović Mihajlo, Slavković Nikola, Živanović Saša (2020) An additive manufacturing benchmark artifact and deviation measurement method, Journal of Mechanical Science and Technology 34(7):3015-3026, <https://doi.org/10.1007/s12206-020-0633-2>, IF1.734-2020 (89/133) M23
- [8] Slavković Nikola, Živanović Saša, Kokotović Branko, Dimić Zoran, Milutinović Milan (2020) Simulation of compensated tool path through virtual robot machining model, Journal of The Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering 42(7):1678-5878, <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02461-9>, IF2.122-2020 (69/133) M22
- [9] Slavković Nikola, Živanović Saša, Milutinović Dragan (2019) An indirect method of industrial robot programming for machining tasks based on STEP-NC, International Journal of Computer Integrated Manufacturing 32(1):43-57, <https://doi.org/10.1080/0951192X.2018.1543952>, IF2.861-2019 (23/50) M22
- [10] Živanović Saša, Slavković Nikola, Milutinović Dragan (2018) An approach for applying STEP-NC in robot machining, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 49:361-373, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2017.08.009>, IF4.392-2018 (5/26) M21

Обавештавамо вас да је Наставно – научно веће на седници одржаној 24.04.2025. 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: 468/4
Датум: 24.04.2025. 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 24.04.2025. 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 **АНДРИЈЕ ДЕВИЋА**, магист. инж. маш. под насловом **„ИНТЕРАКТИВНО ПРОГРАМИРАЊЕ ИНДУСТРИЈСКИХ РОБОТА ПРИМЕНОМ ТЕХНОЛОГИЈА ПРОШИРЕНЕ РЕАЛНОСТИ“**.

Извештај је поднела Комисија у саставу: др Саша Живановић, ред. проф., др Зоран Миљковић, ред. проф., др Живана Јаковљевић, ред. проф., др Милица Петровић, ванр. проф. и др Јелена Видаковић, виши научни сарадник Лола институт Београд.

За ментора докторске дисертације именује се др Никола Славковић, ванредни професор Универзитета у Београду - Машинског факултета.

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

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф. др Владимир Поповић

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Извештај о научној заснованости теме докторске дисертације кандидата **Андрије Девића, маг. инж. маш.**

Одлуком Наставно-научног већа Универзитета у Београду - Машинског факултета број 468/2 од 03.04.2025. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације под називом **„Интерактивно програмирање индустријских робота применом технологија проширене реалности“** кандидата **Андрије Девића, маг. инж. маш.**

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Андрија Девић, маг. инж. маш., рођен је 5. августа 1991. године у Београду, Република Србија. Основну школу „Франце Прешерн“ у Београду завршио је 2006. године као одличан ђак. Средњу електротехничку школу „Никола Тесла“ у Београду, смер Електротехничар телекомуникација, завршио је са одличним успехом 2010. године.

На Универзитет у Београду - Машински факултет уписао се школске 2015/2016. године. Основне академске студије - машинско инжењерство завршио је 2018. године, одбранивши завршни рад (BSc) са оценом 10 (десет) из предмета Мерења у аутоматском управљању, под менторством проф. др Зорана Рибара, и просечном оценом током основних академских студија 8,07 (осам и 7/100).

Школске 2018/2019. године уписао је Мастер академске студије - машинско инжењерство, Модул за аутоматско управљање, а завршио их је 28. септембра 2020. године са просечном оценом током мастер академских студија 9,05 (девет и 5/100). Мастер рад (MSc), који је оцењен оценом 10 (десет), из предмета Механика робота на тему „Пројектовање и управљање једног роботског система са шест степени слободе“ је радио под менторством проф. др Михаила Лазаревића. Награђен је поводом Дана факултета за изванредан успех постигнут на првој години Мастер академских студија.

Након дипломирања, у школској 2020/2021. години, уписао је Докторске студије - машинско инжењерство на Универзитету у Београду - Машинском факултету (број индекса

Д19/2020). Кандидат Андрија Девећ је, као студент докторских студија, активно учествовао и у наставном процесу Катедре за производно машинство Универзитета у Београду - Машинског факултета кроз реализацију лабораторијских вежби на предметима Мехатронски системи и Компјутерско управљање и надзор у аутоматизацији производње. Такође, као демонстратор је учествовао и у извођењу наставних активности на Мастер академским студијама на JOINT LEARNING LAB које су организоване за потребе пројекта Европске уније EU ERASMUS+ Project AVATAR.

Кандидат је запослен у Истраживачко развојном институту Лола у Сектору за роботик у од новембра 2020. године. Одлуком бр. 349 Научног већа Лола института у Београду од 02.11.2020. године изабран је у звање истраживач - приправник. Одлуком бр. 312 од 20.12.2024. директора Лола института, а на основу предлога Научног већа, кандидат је награђен Годишњом наградом Лола института за остварен најбољи успех у раду младих истраживача - докторанада. Кандидат је учествовао у извођењу блок практичне наставе за ученике завршних година средњих школа техничког усмерења и гимназија у Лола институту. Усавршавање у области роботике и технологија проширене реалности наставља похађањем специјализованих курсева TIA-MICRO1 и Unity Developer. У оквиру својих научноистраживачких и стручних активности у Лола институту, кандидат је ангажован и на комерцијалним пројектима.

Познавање страних језика

Енглески језик - говори, чита и пише.

Познавање рада на рачунару

Напредно коришћење програма: MS Office (Word, Excel, Power Point), SolidWorks (Part, Assembly, Drawing, Sheet metal, FEA Analysis), Altium designer (PCB prototyping), AutoCAD, MATLAB, TIA Portal, Arduino, mikroC, Unity, RoboDK, LabView (Data Acquisition), Latex.

Истраживачке области

Производно машинство, Аутоматско управљање, Роботика, Технологије проширене реалности.

Остало

Кандидат је члан Српског друштва за механику од 2024. године.

1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Кандидат Андрија Девећ, маг. инж. маш., уписао је Докторске студије на Универзитету у Београду - Машинском факултету школске 2020/2021. године. У циљу реализације Програма усавршавања, положио је следеће обавезне и изборне предмете:

Први семестар Докторских 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	9 (девет)
<i>Аквизиција и обрада експерименталних података (и*)</i>	Проф. др Бранко Кокотовић	5	10 (десет)
<i>Истраживање и публикавање - I</i>	Проф. др Петар Петровић	10	10 (десет)

Други семестар Докторских студија

Назив предмета	Предметни наставник	ЕСПБ	Оцена
<i>Одабрана поглавља из механике (o*)</i>	Проф. др Зоран Митровић	5	10 (десет)
<i>Интелигентна аутоматизација (u*)</i>	Проф. др Петар Петровић	5	10 (десет)
<i>Интерфејс човек-машина (u*)</i>	Проф. др Александар Жуњић	5	10 (десет)
<i>Истраживање и публиковање - II</i>	Проф. др Петар Петровић	15	10 (десет)

Трећи семестар Докторских студија

Назив предмета	Предметни наставник	ЕСПБ	Оцена
<i>Интелигентни индустријски роботи (u*)</i>	Проф. др Никола Славковић	5	10 (десет)
<i>Мехатронски системи и адаптроника (u*)</i>	Проф. др Петар Петровић	5	10 (десет)
<i>Истраживање и публиковање - III</i>	Проф. др Петар Петровић	20	10 (десет)

Четврти семестар Докторских студија

Назив предмета	Предметни наставник	ЕСПБ	Оцена
<i>Пројекат идеје докторске дисертације</i>	Проф. др Никола Славковић Проф. др Саша Живановић Проф. др Милица Петровић	30	10 (десет)

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

Андрија Девећ је на Докторским студијама - Машинско инжењерство на Универзитету у Београду - Машинском факултету 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 Андрије Девећа на Универзитету у Београду - Машинском факултету, реализовани кроз експериментални рад у Лабораторији за кибернетику и мехатронске системе и Лабораторији за индустријску роботiku и вештачку интелигенцију (Истраживање и публиковање I-III), а верификовани објављивањем радова, као и учествовањем у извођењу наставе на предметима Катедре за производно машинство, указују на то да је кандидат веома успешно остварио још 45 ЕСПБ бодова. Кандидат је успешно написао и одбранио Пројекат идеје докторске дисертације, што је Комисија у саставу проф. др Никола Славковић, проф. др Саша Живановић и проф. др Милица Петровић потврдила оценом 10 (десет), а тиме је кандидат стекао још 30 ЕСПБ бодова. Дакле, у складу са чланом 21. Правилника о Докторским студијама на Универзитету у Београду - Машинском факултету, кандидат је остварио укупно 120 ЕСПБ бодова, чиме је испунио основни услов да упише трећу годину студија и пријави тему докторске дисертације.

У наставку је дат списак објављених научних радова и других релевантних резултата и активности које опредељују афинитет кандидата за рад на предложеној теми.

Рад у истакнутом међународном часопису (M22)

- [1] **Devic, A.**, Vidakovic, J., Zivkovic, N. (2024) Development of Standalone Extended-Reality-Supported Interactive Industrial Robot Programming System. *Machines* 12(7):480. <https://doi.org/10.3390/machines12070480>. (IF 2.1 za 2023. izvor Kobson)

Саопштење са међународног скупа штампано у целини (M33)

- [2] **Devic, A.**, Vidakovic, J., Zivkovic, N., Stepanovic, A. (2024) Advancement of the industrial robot programming language L-IRL using augmented reality. *Proceedings of the 15th International Scientific Conference MMA 2024 – Flexible Technologies*, pp. 39-42. Novi Sad, Serbia, September 24-26. <https://doi.org/10.24867/MMA-2024-02-003>.
- [3] **Devic, A.**, Vidakovic, J., Zivkovic, N., Lazarevic, I. (2024) An approach in the design an AR-enhanced robot programming platform for educational desktop robot arm. *Proceedings of the International Conference of Experimental and Numerical Investigations and New Technologies, CNNTech 2024, LNNS 1216*, pp. 121-128. Belgrade, Serbia, Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-78635-8_12.
- [4] Živković, N., Vidaković, J., **Dević, A.**, Lazarević, M., Lazarević, I. (2024) An overview of XR technologies usage for industrial robot programming. *Proceedings of the 23rd International Symposium INFOTEH-JAHORINA*, pp. 218-221. University of East Sarajevo, Faculty of Electrical Engineering, March 20-22. <https://doi.org/10.5281/zenodo.13789998>.
- [5] Vidaković, J., **Dević, A.**, Živković, N., Kvirgić, V., Lazarević, M. (2024) Implementation of inverse kinematics algorithm for 6DoF robot arm in Unity. *Proceedings of the 23rd International Symposium INFOTEH-JAHORINA*, pp. 60-64. University of East Sarajevo, Faculty of Electrical Engineering, March 20-22.
- [6] **Dević, A.**, Vidaković, J., Živković, N., Lazarević, M. (2023) Synthesis of the control unit of the desktop robot arm actuated by stepper motors. *Proceedings of the 16th International Conference on Accomplishments in Mechanical and Industrial Engineering*, pp. 361-365. Banja Luka, BiH, June 1-2.
- [7] **Dević, A.**, Vidaković, J., Živković, N., Lazarević, M. (2023) Systematic design of a desktop robot arm in Solidworks and Matlab Simulink. *Proceedings of the 9th International Congress of the Serbian Society of Mechanics*, pp. 319-326. Vrnjačka Banja, Serbia. July 5-7.
- [8] Vidakovic, J., **Devic, A.**, Lazarevic, I., Zivkovic, N. (2024) Design of Augmented Reality-Based Android App for Simulation and Programming of Industrial Robots. *Proceedings of the International Conference of Experimental and Numerical Investigations and New Technologies, CNN TECH 2023*, pp. 239-245. Zlatibor, Serbia, July 3-7, Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-46432-4_20.
- [9] Zivkovic, N., **Devic, A.**, Vidakovic, J., Lazarevic, I., Lazarević, M. (2024) Design of a 6DOF Robot Simulation System in ROS-Gazebo with a Brief Reference to Modern Robot Simulation Software. *Proceedings of the International Conference of Experimental and Numerical Investigations and New Technologies, CNN TECH 2023*, pp. 246-252. Zlatibor, Serbia, July 3-7, Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-46432-4_21.

- [10] Vidakovic, J., **Devic, A.**, Zivkovic, N., Kvrpic, V., Stepanic, P. (2023) Practical Approaches for Robot Dynamic Model Implementation for Control and Simulation Purposes. Proceedings of the International Conference of Experimental Research and Numerical Simulation in Applied Sciences, CNNTech 2022, Lecture Notes in Networks and Systems, 564:147-163. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-19499-3_8.
- [11] **Devic A.**, Lukic N., Matijasevic L., Petrovic B. P. (2021) Linking CAD modeler and XR engine for digital twin-based collaborative robotic assembly. Proceedings of the 38th International Conference on Production Engineering - ICPE-S, pp. 144-148. Čačak, Serbia, October 14-15.
- [12] Stepanic P., Vikadovic J., **Devic A.**, Ducic N. (2021) Direct Inverse Control of Two-Tank System Using Neural Networks. Proceedings of the 38th International Conference on Production Engineering - ICPE-S, pp 131-136. Čačak, Serbia, October 14-15.

Саопштење са међународног скупа штампано у изводу (M34)

- [13] Živković, N., Lazarević, M., Vidaković, J., **Dević, A.** (2024) Cascaded ILC-MPC controller for robot manipulators. Booklet of abstracts of the 2nd International Conference on Mathematical Modelling in Mechanics and Engineering, pp. 181-182, Mathematical Institute of the Serbian Academy of Sciences and Arts, Belgrade, September 12-14. <https://machinery.mas.bg.ac.rs/handle/123456789/7946>.

Рад у националном часопису (M51)

- [14] **Dević, A.**, Vidaković, J., Živković, N., Lazarević, M. (2023) Synthesis of the control unit of the desktop robot arm actuated by stepper motors. Annals of Faculty Engineering Hunedoara - International Journal of Engineering. Tome XXI, Fascicule 4, pp. 85-88.

Ново техничко решење у фази реализације (M85)

- [15] **Девећ, А.**, Видаковић, Ј., Живковић, Н. (2024) Развој самосталног интерактивног система за програмирање индустријских робота подржаног технологијом проширене реалности (L-IRL XR). Лола институт, Београд, Ново техничко решење примењено на националном нивоу - M85.

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Кандидат Андрија Девећ, маг. инж. маш., својим досадашњим истраживачким активностима показао је посебну заинтересованост, квалитет и изражену способност за научноистраживачки рад. Публиковани научни радови у истакнутом међународном часопису, националном часопису, у зборницима радова међународних скупова, 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, као и други остварени резултати Андрије Девећа, маг. 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 предметној докторској дисертацији.

2. Предмет и циљ истраживања

Персонализована производња намеће захтеве развоја нове генерације производних система који су у могућности да брзо одговоре на четири кључна захтева тржишта: значајна варијантност производа, драстично редукован обим серија, драстично скраћен животни век производа, и брз одзив на нове потребе тржишта. У том контексту, покренут је низ научно-истраживачких програма чији је основни циљ реализација нове генерације производних технологија, као што су на пример Фабрике будућности (енгл. Factories of Future) и Кибернетско-физички производни системи (енгл. Cyber-Physical Manufacturing Systems) Индустије 4.0 [23-25]. Индуstriјски роботи заузимају важну улогу у производним системима заснованим на концепту Индустије 4.0 [26]. Интеграција напредних технологија у производне системе и развој нове генерације роботских система представљају кључне циљеве за реализацију производних система велике флексибилности. У циљу повећања флексибилности и ефикасности производних система, развијају се интелигентни роботски системи који колаборативно извршавају радне задатке у непосредној интеракцији са човеком [26,27].

Један од основних проблема концепта колаборативног рада човека и робота (енгл. Human-robot collaboration, HRC) је безбедност, односно колизија робота са човеком и/или опремом [28]. Потенцијално решење овог проблема је премештање физичке интеракције човека и робота у дигитални апстрактни простор, кроз реализацију CAD (енгл. Computer-Aided Design) модела робота и/или радног окружења и подршку одговарајућом технологијом која омогућава интеграцију човека у апстрактни простор и ефективну интеракцију са дигиталним технолошким ентитетима [26,29]. Кроз такав контекст, човек задржава могућност квази-физичке интеракције са роботом, без ризика од угрожавања физичке безбедности у најширем смислу. Интеракција човека и робота (енгл. Human-robot interaction, HRI) у радним задацима води ка хуманоцентричном приступу у производним системима и фокусира се на технологије које омогућавају унапређење наведене интеракције.

Проширена реалност (енгл. Extended Reality, XR) омогућава квалитетнију перцепцију и интеракцију са стварним светом, и ствара нове начине ангажовања и продуктивности човека. Такође, проширена реалност представља технологију великог потенцијала за развој нове генерације интерфејса човек-машина (енгл. Human-Machine Interfaces, HMI). Технологија XR обухвата аугментовану реалност (енгл. Augmented Reality, AR), виртуелну реалност (енгл. Virtual Reality, VR) и мешовиту реалност (енгл. Mixed Reality, MR) и све више се користи у умреженим физичким системима и реализацији комуникације на релацији човек-машина. Искуство проширене реалности, односно доживљај дигиталних објеката у реалном окружењу могуће је реализовати помоћу специјализованих HMI уређаја за ту намену под називом HMD (енгл. Head-mounted displays), као и помоћу паметних преносивих уређаја (паметни телефон и таблет). У домену програмирања робота, XR технологија представља значајан потенцијал у контексту омогућавања напредне визуелизације која је резултат природне људске способности да перципира тродимензионални свет и користи га на ефикасан начин, кроз когнитивне способности човека.

Иако је примена робота у индустрији вишеструка, почев од извршавања задатака манипулације и опслуживања машина преко обављања различитих процеса укључујући и

монтажу до обављања специјалних задатака као што су мерење и контрола, њихово програмирање у променљивим и неструктурираним окружењима и даље није флексибилно. Тренутно најраспрострањеније, традиционалне методе програмирања индустријских робота су обучавање и програмирање језицима за роботе [10,30]. Програмирање обучавањем обухвата два начина програмирања: обучавање помоћу уређаја за обучавање и обучавање вођењем. При обучавању вођењем оператер директно ступа у физичку интеракцију са роботом, односно физички помера робот по жељеним трајекторијама. При обучавању робот се користи у фази програмирања, које је такође и дуготрајно при програмирању сложених задатака. При програмирању робота језицима за роботе кључну улогу имају комерцијални софтвери за offline програмирање и симулацију рада робота. Овакав начин програмирања захтева висок ниво вештина и значајно искуство програмера. Са захтевима које поставља персонализована производња, који се првенствено односе на варијантност производа и драстично редукован обим серија, јавила се потреба за флексибилнијим и практичнијим методама програмирања.

Метод неексплицитног програмирања робота, односно програмирање демонстрацијом (енгл. Programming by Demonstration, PbD) или учење из демонстрације (енгл. Learning from Demonstration, LfD) представљају концепт програмирања заснован на преносу вештина извршавања задатка човека на робот кроз демонстрацију оператера, а не кроз претходно генерисане програме. Неексплицитне методе не захтевају висок ниво вештина и значајно искуство програмера и погодне су за програмирање робота при извршавању задатака у динамичким и неструктурираним окружењима. У окружењу проширене реалности човек може слободно да оствари безбедну интеракцију са роботом, независно од физичких перформанси његовог физичког еквивалента, и да кроз такав контекст реализује процес програмирања радног задатка робота без експлицитног кодирања. Другим речима, програмирање робота врши се коришћењем концепта неексплицитног програмирања.

Програмирање демонстрацијом се, поред кинестетичког обучавања, најчешће реализује кроз компјутерско гледање, где је систем за обучавање у могућности да препозна кретање (понашање) оператера, односно програмера, кроз своје напредне алгоритме. Системи за обучавање могу бити базирани на маркерима (енгл. marked-based systems) и/или на различитим системима који су реализовани помоћу акцелерометара и жироскопа [31]. Нека истраживања [21,22] у области програмирања демонстрацијом задатака манипулације и монтаже фокусирају се на праћење кретања (понашања) објекта којим се манипулише. Овакав приступ, у реализацији програмирања демонстрацијом, помера проблем разумевања покрета оператера („како да се уради задатак“) на разумевање понашања објекта („шта да се уради са објектом“). Програмирање демонстрацијом усмерено ка објекту манипулације (енгл. Object Centric Paradigm for Robot Programming by Demonstration) поједностављује проблем праћења покрета потребних током учења и елиминише проблеме који се јављају при трансформацијама координата при праћењу покрета оператера.

Развој интерфејса човек-робот у контексту напредне визуелизације, тј. XR технологија, који је присутан у референтној литератури [2,5-10,12,15-19], представља интеграцију платформи за развој софтвера подржаних XR технологијом са популарним софтверима за offline програмирање, управљање и симулацију рада робота. Развојно окружење Unity [5,14-16,18-20] представља једну од најраспрострањенијих платформи за креирање XR софтверских решења са висококвалитетним 3D рендеровањем слике. У литератури се Unity користи као развојно окружење нових интерфејса човек-машина, као и напредних алата за олакшано програмирање робота. Да би се реализовало програмирање кретања енд-ефектора робота у простору спољашњих координата, предложено је неколико интеграција Unity-ја са популарним платформама за програмирање и управљање робота ROS (енгл. Robot Operating

System), тзв. ROS-Unity suite, и са offline/online програмским окружењима за програмирање робота као што је RoboDK. Наведени софтверски пакети ROS/RoboDK користе интегрисане планере путање и њихове интегрисане модуле за нумеричко решавање инверзног кинематичког проблема робота. Развој оваквог несамосталног система не оставља могућност адаптивности развијеног интерфејса (са аспекта развојних инжењера), побољшане прилагодљивости интерфејса за различите потребе у индустрији, не представља потпуно вишеплатформско решење и не омогућава значајну мобилност оператера при интеракцији са роботом јер захтева додатну опрему.

Предмет планираних истраживања у оквиру предложене докторске дисертације обухвата развој напредног интерактивног интерфејса човек-робот, који ће интегрисати традиционалне и напредне методе неексплицитног програмирања у циљу повећања флексибилности, ефикасности и интуитивности програмирања робота, уз употребу супериорне визуелизације и напредне интеракције у окружењу проширене реалности. Предложени интерфејс човек-робот би био самостално, вишеплатформско решење које омогућава смањено временско кашњење преноса сигнала (енгл. latency), односно боље перформансе, бољу адаптивност и побољшану прилагодљивост за различите потребе у индустрији. Такође, омогућава коришћење лако доступних, широко распрострањених и економски исплативих паметних уређаја, као што су таблети и телефони базирани на iOS и Android оперативним системима, и елиминише потребу за додатном опремом коју користе ROS или слични софтвери чиме се смањују неопходни хардверски захтеви и омогућава боља мобилност крајњих корисника - робот оператера.

Научни циљ дисертације је развој аналитичких модела кинематике и динамике робота и планера путање, и њихова интеграција у окружење проширене реалности, кроз одговарајуће процедуре, као и развој специфичних алгоритама за препознавање и одређивање положаја референтних објеката у технолошком окружењу, са циљем реализације интерактивног интерфејса човек-робот за напредно неексплицитно програмирање индустријских робота.

Предложена докторска дисертација реализоваће се кроз следеће основне циљеве истраживања:

1. Идентификацију кинематичких и динамичких параметара индустријских робота и интеграцију модела робота у развојно окружење које подржава проширену реалност;
2. Развој алгоритама управљања робота у окружењу проширене реалности који подразумевају решавање инверзне кинематике уз анализу сингуларних конфигурација, развој планера путање који омогућава рад у реалном времену и интеграцију динамичког модела робота који омогућава задавање реално остваривих трајекторија робота;
3. Развој алгоритама који омогућавају реализацију функционалности интерактивног интерфејса човек-робот у окружењу проширене реалности, а које се односе на: унапређење традиционалних метода и реализацију метода неексплицитног програмирања уз употребу супериорне визуелизације и напредне интеракције;
4. Развој специфичних алгоритама за визуелно препознавање референтних објеката, који садрже атрибуте потребне за реализацију задатка манипулације, и одређивање њихових положаја у окружењу проширене реалности и технолошком окружењу.
5. Формирање експерименталне инсталације за верификацију предложене методологије развоја интерфејса човек-робот у окружењу проширене реалности кроз реализацију дефинисаних задатка манипулације у технолошком окружењу.

2.1. Преглед и анализа литературе

Иако су истраживања у области примене технологија проширене реалности интензивна, примена XR технологије у реалним производним окружењима и даље захтева значајна унапређења у погледу преформанси, тачности позиционирања, приступачности хардвера и софтвера, као и развој интерфејса човек-робот који би био самостално, вишеплатформско решење које смањује временско кашњење преноса сигнала између системских модула. Идентификоване могућности за унапређење у смислу смањења времена програмирања робота, тј. увећања ефикасности процеса програмирања, безбедности, омогућавања отклањања грешака система за традиционално/неексплицитно програмирање у XR окружењу су додатни разлог развоја сопственог интерфејса за програмирање робота подржаног XR технологијом који се разматра у предложеној теми докторске дисертације. Значајан део истраживања ће бити усмерен ка објекту манипулације које ће поједноставити проблем праћења покрета потребних током учења и елиминисати проблеме који се јављају при трансформацијама координата при праћењу покрета оператера. Даље се наводе неки од важнијих литературних извора који се тичу развоја интерфејса за програмирање робота применом технологија проширене реалности, а на које се ослања предложена докторска дисертација:

- [1] Fang, H.C., Ong, S.K., Nee, A.Y.C. (2012) Interactive robot trajectory planning and simulation using augmented reality, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 28(2):227-237.
- [2] Gaschler, A., Springer, M., Rickert, M., Knoll, A. (2014) Intuitive robot tasks with augmented reality and virtual obstacles, *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation – ICRA*, pp. 6026-6031.
- [3] Chacko, S.M., Kapila, V. (2019) An augmented reality interface for human-robot interaction in unconstrained environments, *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3222-3228.
- [4] Chacko, S.M., Granado, A., Kapila, V. (2020) An augmented reality framework for robotic tool-path teaching, *Procedia CIRP*, 93:1218-1223.
- [5] Lotsaris, K., Gkournelos, C., Fousekis, N., Kousi, N., Makris, S. (2021) AR based robot programming using teaching by demonstration techniques, *Procedia CIRP*, 97:459-463.
- [6] Bambusek, D., Materna, Z., Kapinus, M., Beran, V., Smrz, P. (2019) Combining interactive spatial augmented reality with head-mounted display for end-user collaborative robot programming. *Proceedings of 28th IEEE international conference on robot and human interactive communication*, pp. 1-8.
- [7] Kapinus, M., Materna, Z., Bambušek, D., Beran, V., Smrž, P. (2023). Arcor2: Framework for collaborative end-user management of industrial robotic workplaces using augmented reality. *arXiv preprint arXiv:2306.08464*.
- [8] Kapinus, M., Beran, V., Materna, Z., Bambusek, D. (2024) Augmented reality spatial programming paradigm applied to end-user robot programming, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 89:102770.
- [9] Thoo, Y.J., Maceiras, J., Abbet, P., Racca, M., Girgin, H., Calinon, S. (2021) Online and offline robot programming via augmented reality workspaces, *arXiv:2107.01884*.
- [10] Ong, S.K., Yew, A.W.W., Thanigaivel, N.K., Nee, A.Y. (2020) Augmented reality-assisted robot programming system for industrial applications, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 61:101820.

- [11] Quintero, C.P., Li, S., Pan, M.K., Chan, W.P., Van der Loos, H.M., Croft, E. (2018) Robot programming through augmented trajectories in augmented reality, *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1838-1844.
- [12] Ikeda, B., Szafir, D. (2024) PProgramAR: Augmented Reality End-User Robot Programming, *ACM Transactions on Human-Robot Interaction*, 13(1):1-20.
- [13] Yigitbas, E., Jovanovikj, I., Engels, G. (2021) Simplifying Robot Programming Using Augmented Reality and End-User Development. In: Ardito, C., et al. *Human-Computer Interaction – INTERACT 2021. Lecture Notes in Computer Science*, vol 12932. Springer, Cham.
- [14] Ostanin, M., Zaitsev, S., Sabirova, A., Klimchik, A. (2022) Interactive industrial robot programming based on mixed reality and full hand tracking, *IFAC-PapersOnLine*, 55(10):2791-2796.
- [15] Lee, J., Lim, T., Kim, W. (2024) Interactive Robot Trajectory Planning With Augmented Reality for Non-expert Users, *International Journal of Control, Automation and Systems*, 22:2263–2272.
- [16] Blankemeyer, S., Wiemann, R., Posniak, L., Pregizer, C., Raatz, A. (2018) Intuitive robot programming using augmented reality, *Procedia CIRP*, 76:155-160.
- [17] Hernández, J.D., Sobti, S., Sciola, A., Moll, M., Kavraki, L.E. (2020) Increasing robot autonomy via motion planning and an augmented reality interface, *IEEE Robotics and Automation*, 5(2):1017–1023.
- [18] Lambrecht, J., Kastner, L., Guhl, J., Krüger, J. (2021) Towards commissioning, resilience and added value of Augmented Reality in robotics: Overcoming technical obstacles to industrial applicability, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 71:102178.
- [19] Gadre, S.Y., Rosen, E., Chien, G., Phillips, E., Tellex, S., Konidaris, G. (2019) End-user robot programming using mixed reality, *Proceedings of International conference on robotics and automation – ICRA*, pp. 2707-2713.
- [20] Liu, G., Sun, W., Li, P. (2024) Motion capture and AR based programming by demonstration for industrial robots using handheld teaching device, *Scientific Reports*, 14(1):23259.
- [21] Huang, D.W., Katz, G.E., Langsfeld, J.D., Oh, H., Gentili, R.J., Reggia, J.A. (2015) An object-centric paradigm for robot programming by demonstration, In: *Foundations of Augmented Cognition, Proceedings of 9th International Conference AC 2015*, pp. 745-756.
- [22] Wen, J., Zhu, Y., Zhu, M., Li, J., Xu, Z., Che, Z., Shen, C., Peng, Y., Liu, D., Feng, F., Tang, J. (2024) Object-centric instruction augmentation for robotic manipulation, *arXiv:2401.02814*.
- [23] Yao, X., Zhou, J., Lin, Y., Li, Y., Yu, H., Liu, Y. (2019) Smart manufacturing based on cyber-physical systems and beyond, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30:2805-2817.
- [24] Oks, S. J., Jalowski, M., Lechner, M., Mirschberger, S., Merklein, M., Vogel-Heuser, B., Möslin, K. M. (2024) Cyber-Physical Systems in the Context of Industry 4.0: A Review, Categorization and Outlook, *Information Systems Frontiers*, 26(5):1731-1772.
- [25] Jardim-Goncalves, R., Romero, D., Grilo, A. (2017) Factories of the future: challenges and leading innovations in intelligent manufacturing, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 30(1):4-14.

- [26] Magrini, E., Ferraguti, F., Ronga, A. J., Pini, F., De Luca, A., Leali, F. (2020) Human-robot coexistence and interaction in open industrial cells, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 61:101846.
- [27] Keshvarparast, A., Battini, D., Battaia, O., Pirayesh, A. (2024) Collaborative robots in manufacturing and assembly systems: literature review and future research agenda, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 35(5):2065-2118.
- [28] Hanna, A., Larsson, S., Götvall, P. L., Bengtsson, K. (2022) Deliberative safety for industrial intelligent human–robot collaboration: Regulatory challenges and solutions for taking the next step towards Industry 4.0, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 78:102386.
- [29] Feng, B., Wang, Z., Yuan, L., Zhou, Q., Chen, Y., Bi, Y. (2025) Towards safe motion planning for industrial human-robot interaction: A co-evolution approach based on human digital twin and mixed reality, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 95:103012.
- [30] Pan, Z., Polden, J., Larkin, N., Van Duin, S., Norrish, J. (2012) Recent progress on programming methods for industrial robots, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 28(2):87-94.
- [31] Calinon, S. (2018) Learning from Demonstration (Programming by Demonstration), *Encyclopedia of robotics*, 1-8.

Иницијални приступи програмирању индустријских робота помоћу XR технологије били су фокусирани на 2D пројекције и статичке сцене [1-2], док савремена решења интегришу XR уређаје са напредним алгоритмима за интеракцију у тродимензионалном простору у реалном времену. У раду [2] су аутори помоћу пројектора унапредили реалност радног простора робота пројектовањем поједностављеног 2D виртуелног окружења, како би се кориснику омогућило проналажење позиција објеката манипулације ради програмирања кретања без колизије у виртуелном развојном окружењу за роботе. У ту сврху аутори су развили уређај за дефинисање референтних положаја у тродимензионалном простору. Интензивним развојем уређаја за перцепцију аугментоване и виртуелне реалности, поред продора у тродимензионални простор, омогућен је и једноставнији развој софтверских решења и интерфејса за програмирање робота у XR окружењу кроз ослањање на савремене XR развојне платформе [3-19]. Решења приказана у [3,4] омогућавају програмирање задатака манипулације робота са 4 степена слободе у равни маркера без визуализације кретања робота у аугментованој реалности. Софтверско решење за паметни телефон је развијено у развојном окружењу за игре које је интегрисано са Matlab-ом где се извршавају задаци планирања трајекторије. У раду [3], представљено је и ограничено препознавање објеката за манипулацију који морају бити дефинисаног облика правилног хексаедра и дефинисаних димензија.

Решење у раду [5] представља једноставан развој интерфејса за програмирање робота кроз интеграцију развојних окружења за роботе (нпр. ROS) и развојних окружења за игре (нпр. Unity) уз коришћење напредне генерације XR уређаја, при чему су кориснику омогућене једноставне, али и ограничене методе дефинисања трајекторије робота у тродимензионалном простору. Радови [3-8] не омогућавају приказ аугментованог робота у XR окружењу заједно са аугментованим трајекторијама енд-ефектора приликом процеса програмирања. Радови [7,8] омогућавају приказ само аугментоване трајекторије, док решења приказана у [5,6] интегришу само аугментовани енд-ефектор у оквиру корисничког интерфејса. У радовима [9-11], приказана су нека од првих решења у којима је постигнут приказ аугментованог робота заједно са аугментованом трајекторијом током програмирања, што знатно унапређује корисничко искуство.

У литератури се могу уочити различити приступи у погледу нивоа интеракције и флексибилности који су корисницима доступни при задавању трајекторије робота. У раду [9] корисник дефинише трајекторију у унутрашњим координатама робота. Обучавање вођењем током кога се меморишу положаји дуж трајекторије приказано је у радовима [4,5]. Овакав начин програмирања је значајан из разлога што омогућава интуитивно програмирање робота, будући да оператер руком води робот кроз жељене положаје. Иако овај приступ у реалним, индустријским, условима има одређена ограничења, нпр. неопходност управљања методом нултог обртног момента и безбедносне ризике услед физичког контакта са роботом, у контексту аугментованог (виртуелног) робота те препреке не постоје [2]. Дефинисање трајекторије преко задавања референтних положаја енд-ефектора у 3D простору помоћу функционалности које омогућава савремена HMD опрема (енг. air-click, air-tap покрети) приказано је у радовима [5,12]. Комбинација обучавања вођењем и симулације уређаја за обучавање за тачније дефинисање положаја енд-ефектора приказано је у радовима [7,8], док је у раду [13] приказана комбинација неексплицитног програмирања, преко задавања референтних положаја, и програмирања традиционалним методама.

Радови [3,4] омогућавају задавања континуалног кретања енд-ефектора дуж путање (енгл. Continuous Path, CP), док је у радовима [10,14-16] приказан приступ који омогућава задавања РТР (енгл. Point to Point) кретања и CP кретања на основу задатих референтних положаја енд-ефектора у XR окружењу. Рад [10] приказује једно од првих истраживања, из области, у коме је кориснику омогућено да дефинише РТР и CP кретања дефинисањем референтних положаја робота у аугментованој реалности, и то за потребе роботског заваривања. Употребом стерео камере и интеграцијом у развојно окружење робота омогућена је и детекција колизије аугментованог робота са реалним окружењем у реалном времену.

У раду [17], стерео камере су коришћене за препознавање радног простора и облика објеката при програмирању задатака манипулације мобилног робота у XR окружењу. Овим је омогућено да се елиминира потреба за прецизним поклапањем положаја аугментованих и стварних објеката, што није био случај у претходним истраживањима. Рад [18] се бави решавањем проблема одређивања и побољшања тачности позиционирања HMD уређаја у односу на робот применом машинског учења.

Сва решења, приказана у литератури, која омогућавају програмирање робота у XR окружењу, а која се ослањају на интеграцију система развојних окружења за роботе [2,5-10,12,15-19], укључујући решења базирана на Matlab пакетима [3,4], и развојних окружења за игре, као и решења која користе стерео камере за одређивање положаја објеката уместо маркера [18], нису самостална решења. Систем за програмирање робота у XR окружењу приказан у раду [20] не интегрише развојна окружења за роботе, и није самосталан из разлога што интегрише додатни уређај за дефинисање вектора приступа (енг. approach vector) енд-ефектора при програмирању робота. Систем описан у раду [1] је самосталан, али решење не укључује интерфејс базиран на XR HMD уређајима, већ само на 2D екрану.

Предлози за верификацију кретања робота, кроз симулације у виртуелном окружењу и колоризовање енд-ефектора, приказани су у радовима [5,10]. Могућности детектовања колизије са виртуелним објектима, на бази библиотеке из развојних окружења за роботе, приказане су у радовима [2,5,7,13], а са реалним објектима у раду [10]. Један од првих резултата из области програмирања робота помоћу интерфејса подржаног XR технологијом са самосталним детектовањем колизије приказан је у раду [1].

У раду [21] представљен је нови приступ у реализацији програмирања демонстрацијом који помера проблем разумевања покрета оператера („како да се уради задатак“) на разумевање понашања објекта („шта да се уради са објектом“). Систем је развијен у Matlab окружењу и омогућава програмирање робота за задатке манипулације у виртуелном окружењу на рачунару дефинисањем само крајњих положаја објеката кроз интеграцију Matlab-а и камере постављене на реалном роботу. Примена оваквог решења значајно скраћује време застоја, јер се комплетно програмирање врши изван производне линије. У раду [22], представљен је још један систем за програмирање оријентисан ка објекту манипулације, односно његовим атрибутима, који омогућава програмирање робота за задатке манипулације текстуалним путем, уз коришћење алгорита великих мулти-модалних језичких модела (енгл. Multi-modal Large Language Models). Међутим, овај систем има ограничене могућности у погледу облика објеката за манипулацију. Као и у раду [21], систем интегрише камеру постављену на робот, а која омогућава препознавање иницијалних позиција објеката у радном простору робота. Системи за програмирање робота описани у радовима [21,22] не укључују XR хардвер, што их последично чини самосталним, али их истовремено чини мање интуитивним у поређењу са системима који су базирани на XR технологији.

Поред развијених решења за програмирање робота применом технологија проширене реалности, у радовима [3,6,8-13,15,19,20] је приказана и анализа успешности примене традиционалних интерфејса за програмирање робота и интерфејса базираних на XR технологији, при чему су учесници експеримената углавном неекспертски корисници. Резултати истраживања показују позитивне резултате примене интерфејса базираних на XR технологији у погледу брзине процеса програмирања и интуитивности.

3. Основне хипотезе

На основу детаљне анализе релевантних литературних извора у предметној мултидисциплинарној области и помоћу знања стечених током досадашњих истраживања, а у циљу теоријске и експерименталне верификације у реалном лабораторијском окружењу предложеног интерактивног интерфејса за програмирање индустријских робота заснованог на технологијама проширене реалности, истраживања ће бити заснована на следећим полазним хипотезама:

Прва хипотеза: За изабрану конфигурацију индустријског робота могуће је развити алгоритме и одговарајуће софтверске модуле такве да се, на основу кинематичког и динамичког модела робота и планера путање, могу имплементирати методе традиционалног и методе неексплицитног програмирања робота у окружењу проширене реалности.

Друга хипотеза: На основу техника визуелног препознавања и одређивања положаја објеката, који садрже све неопходне атрибуте за дефинисање задатка манипулације, у радном простору робота могуће је развити и имплементирати алгоритме и софтверске модуле за реализацију концепта интерактивног програмирања робота.

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 кинематичког и динамичког моделирања индустријских робота;
- Методе управљања и програмирања индустријских робота;

- Методе за компјутерско пројектовање базиране на CAD/CAM софтверима за конфигурисање 3D модела и симулацију рада роботских ћелија;
- Методе компјутерског (машинског) гледања;
- Методе за софтверско-хардверску имплементацију развијених модела робота и алгоритама управљања.

5. Очекивани научни допринос

Научни допринос дисертације припада домену интерактивног програмирања индустријских робота применом технологије проширене реалности. На основу полазних хипотеза и уз примену наведених метода, очекивани научни резултати истраживања у оквиру ове дисертације подразумевају:

- Нову методологију за развој интерактивног интерфејса човек-робот при програмирању индустријских робота унапређеним традиционалним и неексплицитним приступима применом технологија проширене реалности;
- Нову методу за визуелно препознавање референтних објеката, која у поређењу са постојећим методама остварује предности у смислу интуитивнијег, ефикаснијег и тачнијег позиционирања робота у окружењу проширене реалности и технолошком окружењу, на бази дефинисаних атрибута објеката неопходних за реализацију задатака манипулације, уз избегавање колизија и остваривање безбедног колаборативног рада.

6. План истраживања и структура рада

План истраживања у оквиру предложене теме докторске дисертације састоји се од следећих фаза:

1. Анализа стања у области истраживања интеракције човек-робот. Анализа могућности примене технологија проширене реалности при интеракцији човек-робот. Анализа реализације метода неексплицитног програмирања индустријских робота.
2. Преглед и критичка анализа литературних извора и претходних истраживања, релевантних за различите приступе реализације програмирања робота, традиционалним и неексплицитним методама, подржаних технологијама проширене реалности.
3. Анализа техника за интеграцију 3D CAD модела индустријских робота и њиховог управљања базираног на динамичким моделима робота у окружење које подржава примену технологија проширене реалности.
4. Развој кинематичког и динамичког модела робота у развојном окружењу за креирање садржаја проширене реалности који омогућава задавање реално остваривих трајекторија робота. Развој алгоритама за планирање трајекторије робота који омогућавају програмирање робота у окружењу проширене реалности у реалном времену.
5. Анализа техника за визуелно препознавање и одређивање положаја референтних објеката у окружењу проширене реалности и технолошком окружењу.

6. Развој методе за програмирање робота применом алгоритма за визуелно препознавање и одређивање положаја објеката и приступа усмереног ка објекту манипулације, односно његовим дефинисаним атрибутима.
7. Интеграција развијених алгоритама и софтверских модула у интерактивни интерфејс човек-робот за програмирање робота подржано технологијама проширене реалности.
8. Верификација развијеног интерактивног интерфејса човек-робот кроз генерисање програма и њихову оптимизацију у окружењу проширене реалности.
9. Тестирање и практична експериментална верификација развијеног интерфејса на примерима задатака манипулације у технолошком окружењу.

Оквирна структура предложене докторске дисертације обухвата следеће целине:

1. Увод
2. Преглед и анализа постојећих интерфејса интеракције човек-робот и релевантних метода програмирања робота
3. Преглед и анализа постојећих метода програмирања робота подржаних технологијама проширене реалности
4. Развој интерактивног интерфејса човек-робот подржаног технологијама проширене реалности
 - Генерисање модела индустријских робота
 - Реализације планера путање на бази кинематичких и динамичких модела робота
 - Алгоритми за реализацију традиционалних и неексплицитних метода програмирања
5. Метод визуелног препознавања референтних објеката и одређивање њихових положаја
 - Процедуре програмирања робота усмерене ка објекту манипулације
 - Дефинисање атрибута објекта манипулације
 - Дефинисање задатака манипулације
 - Алгоритам препознавања и одређивања положаја објекта
6. Експериментална верификација и анализа резултата
 - Интеграција развијених алгоритама и метода у окружење проширене реалности
 - Верификација развијеног интерфејса на примерима задатака манипулације у технолошком окружењу
 - Анализа резултата
7. Закључци
8. Литература
9. Прилози

7. Закључак и предлог

На основу анализе поднете пријаве теме докторске дисертације кандидата Андрије Девића, мас. инж. маш., архивирани под евиденционим бројем 296/1 од 24.02.2025. године, а сходно сагласности Колегијума наставника Катедре за производно машинство број 468/1 од 27.03.2025. године, као и према Одлуци Наставно-научног већа број 468/2 од 03.04.2025. 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 **Андрији Девићу, маг. инж. маш.** одобри израда докторске дисертације са темом под насловом **Интерактивно програмирање индустријских робота применом технологија проширене реалности** која припада научној области: **машинско инжењерство** и ужој научној области **производно машинство**, а за коју је матичан Универзитет у Београду - Машински факултет.

Комисија предлаже Наставно-научном већу Универзитета у Београду - Машинског факултета да се за ментора наведене докторске дисертације кандидата Андрије Девића, маг. инж. маш. именује **др Никола Славковић**, ванредни професор Универзитета у Београду - Машинског факултета који испуњава све услове у складу са чланом 28. Правилника о докторским студијама на Универзитету у Београду - Машинском факултету.

Београд, 10.04.2025. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....
Др Саша Живановић, редовни професор
Универзитет у Београду - Машински факултет

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

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

.....
Др Милица Петровић, ванредни професор
Универзитет у Београду - Машински факултет

.....
Др Јелена Видаковић, виши научни сарадник
Лола институт Београд