

Факултет Машински

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

1708/5

(Број захтева)

Веће научних области техничких наука(Назив већа научне области коме се захтев
упућује)21.12.2023. године

(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:

**„НАПРЕДНО ИТЕРАТИВНО УПРАВЉАЊЕ УЧЕЊЕМ РОБОТСКИХ СИСТЕМА ПРИМЕНОМ
РАЧУНА НЕЦЕЛОГ РЕДА И КВАТЕРНИОНА“**

(пун назив предложене теме докторске дисертације)

НАУЧНА ОБЛАСТ

Механика

ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ:

- Име, име једног од родитеља и презиме кандидата:
НИКОЛА (ЉУБИША) ЖИВКОВИЋ
- Претходно образовање (назив и седиште факултета, студијски програм):
Војна академија Београд, Војномашинско инжењерство
Машински факултет Београд, мастер студије, Машинско инжењерство
- Година завршетка претходног нивоа студија: 2018.
- Година уписа на докторске студије: 2020.
- Назив студијског програма докторских студија: Машинско инжењерство

ПОДАЦИ О МЕНТОРУ:

Име и презиме ментора:

Михаило Лазаревић

Звање:

редовни професор

Списак радова који квалификују ментора за вођење докторске дисертације:

1. Boško Cvetković, M. P. Lazarević, Fractional-Order Iterative Learning Control for Robotic Arm-PD2D α Type, Filomat 35:1 (2021), 1–10 <https://doi.org/10.2298/FIL2101001C>
2. M. P. Lazarević, P. D. Mandić, S. Ostojić, Further results on advanced robust iterative learning control and modeling of robotic systems, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, November 3, <https://doi.org/10.1177/0954406220965996>, p.1-16, 2020
3. Lazarević, M. P., Tzekis, P. Robust second-order PD type iterative learning control for a class of uncertain fractional order singular systems. Journal of Vibration and Control, 1077546314562241, accepted 2014, vol. 22(8) pp.2004–2018, 2016, <https://doi.org/10.1177/1077546314562241>
4. J. Vidaković, V. Kvirgić, M. Lazarević, P. Stepanić, Computed torque control for a spatial disorientation trainer, Facta universitatis Series: Mechanical Engineering Vol. 18, No 2, 2020, pp. 269 – 280, <https://doi.org/10.22190/FUME190919003V>.
5. J. Vidaković, V. Kvirgić, M. Lazarević: Control System Design for a Centrifuge Motion Simulator Based on a Dynamic Model, -Strojinski Vestnik -Journal of Mechanical Engineering, vol. 64, no. 7-8, pp. 465-474, 2018, DOI: 10.5545/sv-jme.2018.5272.
6. P. D. Mandić, M. Bošković, T. B. Šekara, M. P. Lazarević, A new optimisation method of PIDC controller under constraints on robustness and sensitivity to measurement noise using amplitude optimum principle, International Journal of Control, p.1-15, 2021, <https://doi.org/10.1080/00207179.2021.1912392>
7. M. Cajić, M. P. Lazarević, Fractional order spring/spring-pot/actuator element in a multibody system: Application of an expansion formula, Mechanics Research Communications 62, (2014) 44–56. <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2014.08.009>.
8. P. Mandić, T. Šekara, M. Lazarević, M. Bošković, Dominant pole placement with fractional order PID controllers: D-decomposition approach, ISA Transactions, <http://dx.doi.org/10.1016/j.isatra.2016.11.013> ISSN: 0019-0578, Volume 67, March 2017, Pages 76-86.
9. Lj. Bučanović, M. Lazarević, S. Batalov, Fractional PID Controllers Tuned by Genetic Algorithms for Expansion Turbine in the Cryogenic Air Separation Process, Chemical Industry, (Hem. Industrija), ISSN 2217-7426, DOI: 10.2298/HEMIND1308821080Z, 2013.
10. Miljković, Z., Mitić, M., M. Lazarević, Babić, B., Neural Network Reinforcement Learning for Visual Control of Robot Manipulators, Expert Systems with Applications, Vol. 40, Issue 5, April 2013, pp. 1721-1736, 2013, DOI: [10.1016/j.eswa.2012.09.010](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.09.010)
11. M. Živanović, M. Lazarević, Using the Decomposition Principle to Stabilize the Nominal Motion of a Mechanical System with Given Accuracy, Automation and Remote Control, 2012, Vol. 73, No 12, 2012, pp. 2001-2020

Обавештавамо вас да је Наставно – научно веће на седници одржаној 21.12.2023. године размотрило предложену тему и закључило да је тема погодна 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: 1708/4
Датум: 21.12.2023. 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 21.12.2023. 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 **НИКОЛЕ ЖИВКОВИЋА**, маг. инж. маш. под насловом **„НАПРЕДНО ИТЕРАТИВНО УПРАВЉАЊЕ УЧЕЊЕМ РОБОТСКИХ СИСТЕМА ПРИМЕНОМ РАЧУНА НЕЦЕЛОГ РЕДА И КВАТЕРНИОНА“**.

Извештај је поднела Комисија у саставу: др Александар Обрадовић, ред. проф., др Немања Зорић, ред. проф., др Петар Мандић, доцент, др Томислав Шекара, ред. проф. Универзитет у Београду – Електротехничког факултета и др Јелена Видаковић, научни сарадник, Лола институт.

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

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

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф. др Владимир Поповић

ВЕЋУ ДОКТОРСКИХ СТУДИЈА

Предмет: Извештај о научној заснованости теме докторске дисертације кандидата **Николе Живковића, магистар инжењерства.**

Одлуком Наставно-научног већа Машинског факултета бр. 1708/3 од **07.12.2023.** године, именовани смо за чланове Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације **„Напредно итеративно управљање учењем роботских система применом рачуна нецелог реда и кватерниона”** кандидата **Николе Живковића, магистар инжењерства.**

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Кандидат Никола Живковић рођен је 20. децембра 1992. године у Алексинцу. Основну школу похађао је у периоду од 1999. до 2007. године у селу Бобовишту и насељу Алексиначки Рудници и завршио са одличним успехом. Гимназију општег смера „Милорад Влачић” у Власеници (БиХ), уписао је 2007. године и завршио 2011. године са одличним успехом. Након завршетка средње школе, у септембру 2011. године, уписао је Војну академију у Београду на смеру Војномашинско инжењерство, модул Борбена возила. Војну академију завршава септембра 2015. године са просечном оценом 8,16. Дипломски рад под називом *„Прорачун оптерећења система за заокрет гусеничних возила”*, одбранио је са оценом 10 код професора др Славка Муждеке. Даље школовање наставио је октобра 2015. године на Машинском факултету у Београду на смеру Машинско инжењерство, модул Биомедицинско инжењерство. Мастер студије завршио је септембра 2018. године са просечном оценом 9,45. Мастер рад под називом *„Математичко моделовање и управљање егзоскелетом за рехабилитацију”* одбранио је са оценом 10 код професора др Михаила Лазаревића.

Прву праксу обавио је на Институту за хемију, технологију и металургију (ИХТМ) у Београду у Центру за микроелектронске технологије (ЦМТ). Прво радно искуство стекао је у АМСС-ЦМВ у лабораторији за АДР на испитивању и контролисању цистерни и возила за превоз опасних материја у периоду од маја до октобра 2019. године. У периоду од 2018. до 2020. године био је ангажован на неколико мањих пројеката у вези роботике преко интернет

платформи за *freelance* послове. Докторске студије уписује новембра школске 2020/2021. године на Машинском факултету Универзитета у Београду, где му је потенцијални ментор проф. др Михаило Лазаревић, са Катедре за Механику. Тренутно је на трећој години докторских студија, и има положене све испите који су предвиђени планом и програмом Докторских студија. Запослен је на Лола институту од новембра 2020. године као истраживач приправник у сектору за управљање роботима, машинама алаткама и за роботске апликације где се бави научно-истраживачким радом.

Учествовао је као аутор/коаутор на неколико националних и међународних научних скупова. До сада је објавио два коауторска рада у врхунским часописима националног значаја. Коаутор је једне монографије националног значаја. Служи се програмским језицима C, C++ и Python и инжењерским софтверима *SolidWorks*, *AutoCAD* и *MATLAB/Simulink*. Течно говори енглески језик и има основно познавање руског језика.

1.2. Стечено научно-истраживачко искуство

Никола Живковић је на Докторским студијама Машинског факултета у Београду положио следеће испите: Виши курс математике (оцена 10), Нумеричке методе (оцена 10), ОМНИР и комуникација (оцена 10), Аналитичка механика (оцена 9), Истраживање и објављивање I (оцена 10), Одабрана поглавља из механике (оцена 10), Биолошки инспирисани алгоритми оптимизације (оцена 10), Рачун нецелобројног реда са применама у инжењерству (оцена 10), Истраживање и објављивање II (оцена 10), Оптимално управљање кретањем механичких система (оцена 10), Напредна роботика (оцена 10), Истраживање и објављивање III (оцена 10), Истраживање и објављивање IV (оцена 10) и успешно је одбранио Пројекат идеје докторске дисертације (оцена 10). У складу са чланом 21. Правилника о Докторским студијама Машинског факултета у Београду, кандидат Никола Живковић је остварио укупно 120 ЕСПБ бодова, чиме је испунио основни услов да пријави докторску дисертацију. Поред бављења научноистраживачким (нумеричким и експерименталним) радом, на Лола институту учествује у реализацији додатних послова у сектору за управљање роботима, машинама алаткама, и за роботске апликације. Показује афинитет ка темама из области роботике (управљање роботских система, математичко моделовање и симулација роботских система, примена технологија проширене реалности у роботизици), што се може закључити и по списку објављених радова приказаном у наставку.

Радови објављени у врхунским научним часописима националног значаја (M51):

1. Lazarević M., **Živković N.**: *The advanced iterative learning control algorithm for rehabilitation exoskeletons*, - Scientific Technical Review, Vol. 70, No. 3, pp. 29-34, 2020. DOI: [10.5937/str2003029L](https://doi.org/10.5937/str2003029L).
2. **Živković N.**, Vidaković J., Lazarević M.: *Forward kinematics algorithm in dual quaternion space based on Denavit-Hartenberg convention*, - Applied Engineering Letters: Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 8, No. 2, pp. 52-59, 2023. DOI: [10.18485/aletters.2023.8.2.2](https://doi.org/10.18485/aletters.2023.8.2.2).

Радови саопштени на скуповима међународног значаја штампани у целини (M33):

1. Lazarević M., **Živković N.**, Radojević D.: *Open-closed iterative learning control algorithm for exoskeleton rehabilitation purposes*, - MATEC Web of Conferences el. Proceedings, 2019, Vol. 292, pp. 1-6. DOI: [10.1051/mateconf/201929201010](https://doi.org/10.1051/mateconf/201929201010).
2. **Živković N.**, Petrović M., Lazarević M.: *Adaptive iterative learning control of robotic system based on particle swarm optimization*, - 8th International Congress of Serbian Society of

Mechanics Proceedings, Kragujevac June 2021, Serbia, pp. 334-343. [Online]. Available: <https://machinery.mas.bg.ac.rs/handle/123456789/4093>.

3. **Živković N.**, Vidaković J., Mitrović S., Lazarević M.: *Implementation of dual quaternion-based robot forward kinematics algorithm in ROS*, - 11th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO) Proceedings, Budva June 2022, Montenegro, pp. 1-4. DOI: [10.1109/MECO55406.2022.9797160](https://doi.org/10.1109/MECO55406.2022.9797160).
4. Dević A., Vidaković J., **Živković N.**, Lazarević M.: *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, Banja Luka June 2023 BiH, pp. 361-365. [Online]. Available: <https://machinery.mas.bg.ac.rs/handle/123456789/6972>.
5. **Živković N.**, Lazarević M., Vidaković J.: *Assessment of fractional order impact on performance of fractional ILC controller for upper limb exoskeleton*, - Proceedings of the 16th International Conference on Accomplishments in Mechanical and Industrial Engineering, Banja Luka June 2023, BiH, pp. 333-337. [Online]. Available: <https://machinery.mas.bg.ac.rs/handle/123456789/6973>.
6. Stepanić P., Marinković S., Vidaković J., Dučić N., **Živković N.**: *Internal model control of two-tank system using neural networks*, - Proceedings of the 16th International Conference on Accomplishments in Mechanical and Industrial Engineering, Banja Luka June 2023, BiH, pp. 345-350.
7. Dević A., Vidaković J., **Živković N.**, Lazarević M.: *Systematic design of a desktop robot arm in Solidworks and Matlab Simulink*, - Proceedings of the 9th International Congress of the Serbian Society of Mechanics, Vrnjačka Banja July 2023, Serbia, No. 122, pp. 1-8.
8. Vidaković J., Dević A., **Živković N.**, Kvirgić V., Stepanić P.: *Practical approaches for robot dynamic model implementation for control and simulation purposes*, - Experimental Research and Numerical Simulation in Applied Sciences. CNNTech 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, Zlatibor July 2022, Serbia, Vol. 564, pp. 147-163. DOI: [10.1007/978-3-031-19499-3_8](https://doi.org/10.1007/978-3-031-19499-3_8).

Радови саопштени на скуповима међународног значаја штампани у изводу (M34):

1. **Živković N.**, Vidaković J., Lazarević M.: *Hybrid PSO-Newton-Raphson algorithm for inverse kinematics problem in robotics*, - International Conference of Experimental and Numerical Investigations and New Technologies Book of Abstracts, Zlatibor July 2021, Serbia, pp. 46-46. [Online]. Available: <https://machinery.mas.bg.ac.rs/handle/123456789/4089>.
2. Vidaković J., Lazarević M., **Živković N.**, Stepanić P., Mitrović S.: *Computed torque control simulation for 6DOF industrial robot*, - 1st International Conference on Mathematical Modelling in Mechanics and Engineering ICME Book of Abstracts, Belgrade September 2022, Serbia, pp. 109-110. [Online]. Available: <https://machinery.mas.bg.ac.rs/handle/123456789/4081>.
3. **Živković N.**, Vidaković J., Lazarević M.: *An overview of forward dynamics algorithms and their use in open-source dynamics engines*, - 1st International Conference on Mathematical Modelling in Mechanics and Engineering ICME Book of Abstracts, Belgrade September 2022, Serbia, pp. 98-99. [Online]. Available: <https://machinery.mas.bg.ac.rs/handle/123456789/4082>.
4. **Živković N.**, Lazarević M.: *PSO-optimized fractional order iterative learning controller for 3DOF uncertain exoskeleton system*, - Proceedings of the 9th International Congress of the Serbian Society of Mechanics, Vrnjačka Banja July 2023, Serbia, No. 123, pp. 1-2.

Монографија националног значаја (M42):

1. Lazarević M., **Živković N.**, Dubonjac A.: *Iterativno upravljanje putem učenja robotskih sistema: klasičan i moderan pristup*. Beograd, Srbija: Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, 2021, ISBN 978-86-6060-105-8.

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Својим досадашњим научно-истраживачким активностима кандидат Никола Живковић је испољио заинтересованост, квалитет и стручност за научно-истраживачки рад. Поред положених испита, одслушаних предавања и одбрањеног Пројекта идеје докторске дисертације, у протеклом периоду спровео је различита нумеричка и експериментална истраживања, учествовао у реализацији више научно-истраживачких и стручних пројеката и публиковао значајан број научних радова из области којој припада предложена тема. Досадашњи објављени радови и истраживачка делатност кандидата су суштински повезани са научном облашћу којој припада тема предложене Докторске дисертације и квалификују кандидата за успешан и ефикасан теоријски и експерименталан рад на предложеној теми. Комисија сматра да је кандидат Никола Живковић испунио све потребне услове за пријаву теме докторске дисертације и да је способан за самостални рад на предложеној теми Докторске дисертације.

2. Предмет и циљ истраживања

Предмет истраживања докторске дисертације са предложеним насловом је развој и примена нових алгоритама за управљање роботских система из области итеративног управљања учењем (ИУУ) коришћењем савремене теорије рачуна нецелог реда (*фракционог рачуна*) и биолошки инспирисаних алгоритама оптимизације уз истовремену примену савремене теорије (би)кватерниона (*дуалних кватерниона*) и Родриговог приступа у процесу добијања напредних модела роботских система. Такође, биће посвећена извесна пажња и стратегијама управљања заснованим на познавању динамичког понашања система, као што су методе израчунатог момента (*инверзне динамике*) и предиктивног управљања по моделу, и њиховој интеграцији са новоразвијеним методама ИУУ нецелог реда приликом пројектовања управљачких система за роботске системе. Имајући у виду горе наведено, дисертација се бави проблематиком напредног управљања и моделирања механичких/роботских система са адекватним развојем и применом одговарајућих модела истих.

Као што је познато, роботика је мултидисциплинарна наука која доживљава интензиван развој од половине прошлог века када први роботи почињу да се користе у индустријске сврхе. Од тада она налази све већу примену у готово свим индустријским гранама, али и у другим областима. С обзиром да се роботски механизми суштински развијају ради остваривања жељених кретања, кинематика и динамика робота представља незаобилазни предмет анализе, управљања и симулације у роботизици. Пошто је динамичко понашање објекта управљања од фундаменталног значаја за остваривање квалитетног управљања роботских система, потребно је формирати динамички модел посматраних роботских система. У овој дисертацији као објекти управљања биће искоришћени роботски систем - егзоскелет за рехабилитацију горњих удова са четири степена слободе и индустријски робот LOLA 15 са шест степени слободе. Динамички модели биће изведени применом Родриговог приступа [1] укључујући и генерисање алгоритама за решавање директног и инверзног проблема динамике наведених роботских система. Поред номиналног динамичког модела, потребно је извести и проучити параметризован модел, где најчешће масено-инерционе величине роботског система представљају параметре неизвесности [2]. Параметризовани динамички модел биће искоришћен приликом подешавања параметара ИУУ и нецелог реда фракционог оператора управљачког система.

Поред динамичких модела посматраних роботских система биће изведени и кинематички модели истих. Кинематички модел робота најчешће служи за задавање кретања робота, планирање и верификацију трајекторије кретања и представља основу за формирање одговарајућих алгоритама управљања. За кинематичко моделовање користиће се упоредо Родригов приступ [1] и Денавит-Хартенберг конвенција заједно са алгебром дуалних кватерниона [3]. Дуални кватерниони поред тога што представљају компактан математички запис трансляторних и ротационих трансформација координата, такође дуални кватерниони немају сингуларне положаје, једнозначни су, грешка заокруживања приликом ренормализације је мања него код матрица и интерполација између два кватерниона се врши најкраћом могућом путањом [4]. Напредни алгоритми за израчунавање директне и инверзне кинематике роботских система LOLA 15 и егзоскелета биће формираны применом дуалних кватерниона.

Са друге стране, итеративно управљање учењем представља једну врсту интелигентног управљања која је заснована на идеји учења кроз понављање одређеног радног задатка више пута. Историјат ИУУ почиње осамдесетих година двадесетог века [6] када су објављени први радови на ову тему и до данас је привукла пажњу и примену у областима као што су роботика, процесна и хемијска индустрија. Методологија ИУУ пружа начин за побољшање перформанси система управљања кроз итеративно усавршавање и учење на основу претходних искустава, тј. из претходних грешака, како би се унапредио одзив система током времена. Предности ИУУ су: једноставна структура закона управљања, остваривање робусности управљања, изузетно тачно праћење жељене трајекторије упркос неизвесностима и поремећајима и компензација ефеката кашњења [5]. У дисертацији биће посвећена посебна пажња на примени фракционог рачуна (*рачуна нецелог реда*) у горе наведеној области истраживања. Рачун нецелог реда или фракциони рачун је уопштење класичног диференцијалног и интегралног рачуна на операције интеграције и диференцијације нецелог (фракционог) реда. Почетак рачуна нецелог реда везује се за седамнаести век и односи се за кореспонденцију која је остварена између Лопитала и Лајбница, и то у време када су Њутн и Лајбниц постављали основе диференцијалног и интегралног рачуна. Интензиван теоријски развој фракциони рачун доживљава у деветнаестом веку а крајем двадесетог и почетком двадесет првог века коначно добија примену у инжењерској пракси и природним наукама као што су реологија, теорија управљања, акустика, оптика, хемијска физика, машинско инжењерство и електротехника, [6],[7],[8]. Данас се може рећи да рачун нецелог реда представља област математичке анализе која се бави изучавањем и применом извода и интеграла произвољног реалног или чак комплексног реда. Једна од главних предности примене рачуна нецелог реда у механици и теорији управљања је та да изводи и интеграл нецелог реда немају локални карактер, већ узимају у обзир целокупну историју понашања посматраног система или процеса [6],[8] тиме омогућавајући тачнији опис система и синтезу квалитетнијег управљачког система.

Применом теорије рачуна нецелог реда у алгоритмима ИУУ добија се скуп напредних алгоритама управљања који се назива итеративно управљање учењем нецелог реда - ИУУНР (енг. *Fractional Order Iterative Learning Control - FOILC*). Закони ИУУНР увођењем диференцијалног оператора нецелог реда имају више степени слободе, тј. више параметара за подешавање тиме омогућавајући квалитетнији одзив система. У овој дисертацији биће разматрано неколико типова ИУУНР са акцентом на примени D^α (Диференцијални) типа и PD^α (Пропорционално Диференцијални) типа, где α представља вредност реда које диференцијални оператор нецелог реда може имати. ИУУНР се налази у директној грани управљачког система и може се рећи да је у *offline* режиму јер зависи од вектора управљања и грешке излаза система из претходне итерације радног задатка. Извесну пажњу је потребно посветити и примени нископропусног филтера код закона ИУУ јер непостојање филтера

(„фактор заборављања“) може довести до дивергенције одзива и нестабилности система [9]. Пропусни опсег филтера, односно учестаност одсецања, представља још један параметар управљања чијим се подешавањем може добити значајно бољи одзив система [10]. Додатни параметри изискују следствено додатни напор и ангажовање око подешавања истих. Стога, биће примењен алгоритам за оптимално подешавање вредности параметара учења и реда оператора диференцијације код ИУУНР закона управљања. У том циљу, предложени су и одабрани тзв. популациони алгоритми који су инспирисани природним феноменима и понашањем животиња или инсеката. Алгоритми као што су *Particle Swarm Optimization* (PSO) [11] и *Gray Wolf Optimizer* (GWO) [12] имају веома једноставну структуру. Концепт функционисања им је заснован на синхронизованом кретању јата птица или риба кроз простор, односно понашању сивих вукова током лова. Ови алгоритми нису рачунарски захтевни и могу се ефикасно применити приликом подешавања параметара управљачког система. У раду [13] је приказано подешавање параметара ИУУНР путем BBO (енг. *Biogeography-based Optimization*) алгоритма, где је модел система у потпуности познат. Предлаже се подешавање вредности реда оператора диференцијације и параметара учења закона ИУУНР применом биолошки инспирисаних алгоритама оптимизације на основу динамичког модела роботског система са параметризованом вредношћу масе у циљу побољшања робустности система управљања на неизвесности модела објекта управљања [14]. ИУУ подразумева законе управљања где се формира одговарајући вектор управљања у зависности од информација из претходне итерације(а) радног радатка и који омогућава успешну компензацију грешке праћења. Са друге стране, познато је да роботски систем представља један вишеструкопреносни, нелинеарни, нестационарни систем и стога је потребно пројектовати управљачки систем који ће бити у стању да обезбеди задовољавајуће понашање таквог објекта управљања. Поред закона ИУУНР у директној спрези, биће примењени и нелинеарни закони управљања као што су методе израчунатог момента (енг. *Computed Torque* - CT) [15], [16] и предиктивно управљање по нелинеарном моделу (енг. *Nonlinear Model Predictive Control* - NMPC) [17], [18].

Један од крајњих исхода ове докторске дисертације јесте и софтверска имплементација алгоритама управљања развијених у претходном делу ове дисертације као и израда прототипа егзоскелетног система. За потребе имплементације користиће се бесплатни алати и библиотеке за роботске апликације отвореног кода под називом *Robot Operating System* (ROS), *CasADi* као и сопствена софтверска решења. За хардверски развој и имплементацију користиће се развојне платформе као што су *Arduino*, *Raspberry Pi* и *Espressif*. За израду механичке структуре роботског система - егзоскелета користиће се углавном техника 3D штампе а одабир актуатора и сензора обавиће се на основу пројектованог 3D модела и резултата симулација. На основу горњег развоја отвара се простор и за развој једноставне апликације која би потенцијално могла бити искоришћена за рехабилитацију пацијента коришћењем алата за виртуелну/проширену реалност (VR/AR - *Virtual Reality/Augmented Reality*). Такав систем би обухватао егзоскелет, сет за VR/AR и апликацију са задацима за пацијента у циљу рехабилитације, као што су праћење путање, премештање објеката са једног места на друго и слично.

Преглед и анализа литературе

- [1] Čović V., Lazarević M.: *Mehanika robota*. Faculty of Mechanical Engineering, 2021.

- [2] R. Kelly, V. S. Davila, and A. Loría, Eds., „Introduction to Adaptive Robot Control,” in *Control of Robot Manipulators in Joint Space*, in *Advanced Textbooks in Control and Signal Processing*. , London: Springer, 2005, pp. 313-335. doi: [10.1007/1-85233-999-3_18](https://doi.org/10.1007/1-85233-999-3_18)
- [3] Valverde, A., Tsiotras, P.: *Spacecraft Robot Kinematics Using Dual Quaternions*. Robotics 2018, vol. 7, no. 64, doi: [10.3390/robotics7040064](https://doi.org/10.3390/robotics7040064)
- [4] Kenwright B.: *A Beginners Guide to Dual-Quaternions*. in WSCG 2012 Conference Proceedings Part I, June 2012, Plzen, Czech Republic, pp. 1-10.
- [5] J.-X. Xu, S. K. Panda, and T. H. Lee, Real-time Iterative Learning Control, 1st ed. in *Advances in Industrial Control*. London: Springer, 2009. doi: [10.1007/978-1-84882-175-0](https://doi.org/10.1007/978-1-84882-175-0).
- [6] M. P. Lazarević, „Introduction to Fractional Calculus with Brief Historical Background,” ESIS Publishing House, 2022, pp. 435–452, ISBN: 978-88-314-8255-4.
- [7] Kilbas, AA, Srivastava, H, Trujillo, JJ: *Theory and Applications of Fractional Differential Equations*. North-Holland Mathematics Studies, Elsevier, Amsterdam, Nederland, Vol.204,2006,ISBN: 9780444518323.
- [8] Atanacković TM, Pilipović S, Stanković B, et al. *Fractional calculus with applications in mechanics: wave propagation, impact and variational principles*. London: Wiley, 2014, ISBN: 978-1-118-90913-3.
- [9] R. W. Longman and Y.-C. Huang,: *The Phenomenon of Apparent Convergence Followed by Divergence in Learning and Repetitive Control*. in *Intell. Autom. Soft Comput.*, vol. 8, no. 2, pp. 107–128, Jan. 2002, doi: [10.1080/10798587.2002.10644210](https://doi.org/10.1080/10798587.2002.10644210).
- [10] D. A. Bristow, A. Alleyne, and M. Tharayil, „A Time-Varying Q-Filter Design for Iterative Learning Control,” in *2007 American Control Conference*, Jul. 2007, pp. 5503–5508. doi: [10.1109/ACC.2007.4282553](https://doi.org/10.1109/ACC.2007.4282553).
- [11] Kennedy J., Eberhart R.: *Particle swarm optimization*. Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks. Vol. 4. IEEE, 1995.
- [12] Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., Lewis, A.: *Grey wolf optimizer*. *Advances in engineering software*, vol. 69, pp. 46-61, 2014, doi: [10.1016/j.advengsoft.2013.12.007](https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007).
- [13] I. Ghasemi, A. R. Noei, and J. Sadati, „*Intelligent Fractional Order Iterative Learning Control Using Feedback Linearization For A Single-Link Robot*,” *IJUM Eng. J.*, vol. 18, no. 1, pp. 155-176, 2017, doi: [10.31436/ijumej.v18i1.563](https://doi.org/10.31436/ijumej.v18i1.563).
- [14] M. P. Lazarević, P. D. Mandić, and S. Ostojić, „*Further results on advanced robust iterative learning control and modeling of robotic systems*,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 235, no. 20, pp. 4719-4734, 2021, doi: [10.1177/0954406220965996](https://doi.org/10.1177/0954406220965996).
- [15] M. W. Spong, S. Hutchinson, and M. Vidyasagar, *Robot Modeling and Control*, 2nd edition. Hoboken, NJ: Wiley, 2020.
- [16] J.-J. E. Slotine and W. Li, *Applied nonlinear control*. Englewood Cliffs, N.J: Prentice Hall, 1991.
- [17] J. Tamimi and P. Li, „*Nonlinear Model Predictive Control Using Multiple Shooting Combined with Collocation on Finite Elements*,” *IFAC Proc. Vol.*, vol. 42, no. 11, pp. 703-708, 2009, doi: [10.3182/20090712-4-TR-2008.00114](https://doi.org/10.3182/20090712-4-TR-2008.00114).
- [18] W. Qiu, Z. Xiong, J. Zhang, Y. Hong, and W. Li, „*Integrated predictive iterative learning control based on updating reference trajectory for point-to-point tracking*,” *J. Process Control*, vol. 85, pp. 41-51, 2020, doi: [10.1016/j.jprocont.2019.11.003](https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2019.11.003).

3. Полазне хипотезе

На основу изучавања литературе и досадашњих истраживања у овој области постављене су следеће хипотезе:

- Дати роботски системи се могу разматрати као системи крутих тела са коначним бројем степени слободе кретања који се могу моделирати у виду отвореног кинематичког ланца.
- Дефинисањем одговарајућих математичких модела и решавањем система једначина аналитичким и нумеричким методама одређује се тачно и апроксимативно понашање система на кинематичком тако и на динамичком нивоу.
- Применом рачуна нецелог реда код закона итеративног управљања учењем могу се реализовати напредни управљачки алгоритми са одговарајућим диференцијално-интегралним операторима нецелог реда у циљу добијања квалитетнијег одзива разматраних роботских система.
- На основу параметризованог модела динамичког понашања система могу подешавати параметри учења и ред диференцијалног оператора применом биолошки инспирисаних алгоритама у циљу повећања робустности управљачког система.

4. Научне методе истраживања

Током реализације циљева истраживања користиће се следеће научне методе (теорије):

- Теорија рачуна нецелог реда;
- Методе аналитичке механике;
- Теорија кватернионске алгебре;
- Савремене методе биолошки инспирисаних алгоритама оптимизације;
- Стандардне методе експерименталног приступа;
- Методе компаративне анализе.

5. Очекивани научни допринос

Очекује се да ће кроз ову дисертацију успешном реализацијом циљева истраживања и применом поменутих научних метода и поступака, бити остварен следећи научни допринос:

- Унапређење постојећих алгоритама итеративног управљања учењем целог реда и развој нових алгоритама напредног ИУУ нецелог реда и њихова примена на управљање роботских система,
који у оквиру себе подразумева:
 - примена диференцијалног оператора нецелог реда код закона итеративног управљања учењем,
 - унапређење начина задавања кретања роботског система применом кинематичког модела заснованог на алгебри дуалних кватерниона.

- унапређење начина подешавања параметара учења код закона итеративног управљања учењем применом биолошки инспирисаних алгоритама оптимизације (популациони алгоритми засновани на понашању скупа различитих јединки - *swarm intelligence*),
- унапређење робустности роботског управљања применом параметризованог кватернионског модела роботског система и оптимизованог ИУУ нецелог реда,

6. План истраживања и структура рада

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

- Преглед одговарајуће литературе која се односи на примену актуелне теорије управљања која укључује и савремену теорију нецелог реда, итеративног управљања учењем, моделирања роботских система.
- Формирање кинематичких и динамичких модела посматраних роботских система на основу 3Д модела применом Родриговог приступа и теорије дуалних кватерниона.
- Пројектовање управљачког система применом метода итеративног управљања (не)целог реда у синергији са методама инверзне динамике и предиктивног управљања по нелинеарном моделу и интеграција биолошки инспирисаних алгоритама за подешавање параметара учења.
- Софтверска имплементација пројектованих управљачких система коришћењем постојећих софтверских алата и библиотека као што су *ROS*, *Unity*, *MuJoCo* и *CasADi* на хардверске развојне платформе као што су *Arduino*, *Raspberry Pi*, *Espressif*.
- Пројектовање механичке структуре роботског система - егзоскелета у софтверу за 3Д моделовање.
- Израда прототипа модела егзоскелета коришћењем технологија за брзу израду прототипова. Тестирање пројектованих управљачких система на прототипу егзоскелета.

Предвиђено је да докторска дисертација има следећу структуру:

1. Увод
2. Преглед доступне литературе и досадашњих релевантних истраживања
3. Напредно кинематичко и динамичко моделовање роботских система
4. Пројектовање управљачког система и нумеричка симулација понашања система управљања
5. Пројектовање и израда прототипа роботског система - егзоскелет
6. Софтверска и хардверска имплементација пројектованог управљачког система
7. Закључак и дискусија
8. Литература

7. Закључак и предлог

Одлуком Наставно-научног већа Универзитета у Београду - Машинског факултета, број 1708/04 од 21.12.2023. године, за ментора докторске дисертације кандидата Николе Живковића именован је **др Михаило Лазаревић**, редовни професор Универзитета у Београду - Машинског факултета, са чиме је Комисија сагласна.

Комисија за оцену научне заснованости теме закључује да је кандидат успешно положио све испите предвиђене планом усавршавања и објавио научне радове чиме је стекао услов за одобравање теме за израду докторске дисертације. На основу свега наведеног, пријаве за израду докторске дисертације архивирани под бројем 1708/1 од 30.10.2023. године и уз сагласност Катедре за механику архивирани под бројем 1708/2 од 15.11.2023. године, Комисија сматра да је предложена тема јасно дефинисана, научно утемељена и актуелна, те да је као таква пододбна за израду докторске дисертације и да се њеним изучавањем може остварити значајан научни и стручни допринос.

Комисија такође закључује да је кандидат испунио све потребне услове за пријаву теме докторске дисертације, дефинисане Законом о високом образовању, Статутом Универзитета у Београду - Машинског факултета и Правилником о Докторским студијама Универзитета у Београду - Машинског факултета, као и да поседује истраживачке способности за рад на докторској дисертацији. Комисија предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета у Београду да се

Николи Живковићу, магистру машин.

одобри израду докторске дисертације под називом

**„Напредно итеративно управљање учењем роботских система применом рачуна
нецелог реда и кватерниона ”**

која припада научној области Машинско инжењерство, и ужој научној области Механика, а за коју је матичан Универзитет у Београду - Машински факултет.

Београд, 15.12.2023. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....
Проф. др Александар Обрадовић,
Универзитет у Београду – Машински факултет

.....
Проф. др Немања Зорић,
Универзитет у Београду – Машински факултет

.....
Доцент др Петар Мандић,
Универзитет у Београду – Машински факултет

.....
Проф. др Томислав Шекара,
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

.....
др Јелена Видаковић, научни сарадник
Лола институт д.о.о.