

Универзитет у Београду
Електротехнички факултет

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Подобност теме и кандидата Николе Кнежевића за израду докторске дисертације.

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета бр. 1290/57 од 12.09.2023. године именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата Николе Кнежевића, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, за израду докторске дисертације и научне заснованости теме под насловом:

„Управљање робота у физичкој интеракцији са околином и сарадњи са човеком засновано на техникама учења и оптимизације”.

(енг. „*Control of robots in physical interaction with the environment and cooperation with humans based on learning and optimization techniques*”).

На основу материјала приложеног уз захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Никола Кнежевић је рођен 11.01.1993. године у Краљеву. Завршио је Гимназију у Краљеву, специјализовано математички смер, са одличним успехом. Електротехнички факултет је уписао 2012. године где је дипломирао 2016. на Одсеку сигнали и системи са просечном оценом 8,93. Основне студије је завршио одбравивши дипломски рад под насловом „Надзор и управљање флексибилне роботске ћелије са два индустријска робота“. Мастер студије уписао 2016. године, а завршио 2018. године, са просечном оценом 9,67, уз завршни мастер рад под насловом „Аутономно репрограмирање робота демонстрирано на процесу палетизације“. Докторске студије на Електротехничком факултету је уписао 2018. године, где је положио све испите са просечном оценом 10. Ужа област научног истраживања му је роботика. Ангажован је као сарадник у настави на Одсеку сигнали и системи први пут у децембру 2016. године, а следеће године поново изабран у исто звање. У звање асистента је изабран у фебруару 2019. године. Фокус рада Николе Кнежевића на докторским студијама су колаборативни роботи, посебно истраживање у области

управљања роботским системима са попустљивим зглобовима и изучавање техника машинског учења које се могу применити на роботске системе који се користе за интеракцију човека и робота, био-инспирисаних робота и попустљивих актуатора.

Коаутор је наставног материјала за предмет Роботика и аутоматизација – Роботика: збирка решених задатака, у којој су приказани и решени задаци који прате поменути курс. Такође као учесник на Erasmus+ пројекту „Иновативни приступ учењу у развоју софтверски пројектоване инструментације и њена примена у системима који раде у реалном времену“, радио је на припреми наставног материјала из области мобилне роботике. Учествоје у организацији студентског такмичења ABB RoboChallenge, које се одржава последње три године у сарадњи са компанијом АББ Србија.

Никола Кнежевић је аутор 2 рада у часопису са SCI листе (M22), 2 рада у часописима ван SCI листе, 8 радова са међународних конференција (M33), 5 радова са домаћих конференција (M63) и 2 уџбеника.

Аутор је награђеног рада на конференцији IcEtran 2019 као најбољи рад у сесији за роботiku и флексибилну аутоматизацију под називом „End-Effector Cartesian Stiffness Optimization: Sequential Quadrating Programing Approach”.

1.2. Стечено научно-истраживачко искуство

Кандидат Никола Кнежевич је од 2016. године био ангажован као сарадник у настави на Електротехничком факултету. Од 2018. године је ангажован као асистент на истом факултету.

На Одсеку за сигнале и системе Никола Кнежевић је ангажован на следећим курсевима:

- Роботика и аутоматизација – 13E053РА;
- Аутономни мобилни роботи – 19E054АМР, 19M054АМР;
- Сензори и актуатори – 13E053СА;
- Хидраулички и пнеуматички системи – 13E053ХПС;
- Роботски системи – 13M051РС;
- Специјални роботски системи – 13M051СПС;
- Сигнали и системи – 19E052СИС, 13E052СИС, 13E052СИСР;
- Основи система управљања – 19E053ОСУ, 13E053ОСУ, 13E053ОСУЕ;
- ЦНЦ системи и флексибилна аутоматизација – 19E054ЦНЦ, 13E054ЦНЦ, 19M054ЦНЦ;
- Практикум из софтверских алата – 13E052ПСА;

- Системи аутоматског управљања 1 – 13E053CAУ1;
- Системи аутоматског управљања 2 – 13E053CAУ2;

Никола Кнежевић је ангажован на неколико научних и међународних пројеката у области роботике на којима спроводи наведена истраживања, од којих се могу издвојити:

❖ Међународни пројекти:

- *MUSAE: A Human-Centered Factory for a Future Technological Sustainable Development Driven by Arts* (Horizon Europe; 06.2023.-08.2025.) – реализација алгоритама за контролу робота засновану на људским покретима.
- *Artificial Intelligence for Dimensional and Surface Quality Control of Cut Parts* (Horizon 2020 cascading; SHOP4CF project; 09.2022.-03.2023.) – развој и имплементација система за контролу квалитета код поступка обраде коже (површинска и димензиона контрола) коришћењем система визије и вештачке интелигенције.
- *Brain Watch- Human Centered Robotics for Connected Factories* (Horizon 2020 cascading; SHOP4CF project; 11.2021.-08.2022.) – развој и интеграција роботске ћелије са колаборативним роботом за апликацију колаборативног склапања фискалних каса;
- *BOWI-Boosting Widening Digital Innovation Hubs - for robotics and embedded systems* (Horizon 2020; 07.2021.-06.2023.) – технички ментор при интеграцији нових технологија и иновативних решења у области дигитализације, вештачке интелигенције и роботике;
- *DIH-HERO: Digital Innovation Hubs in Healthcare Robotics* (Horizon 2020; 01.2019.-12.2022.) – пружање техничке подршке приликом интеграције роботских система у медицинским апликацијама;
- *DIH²- A Pan European Network of Robotics DIHs for Agile Production* (Horizon 2020; 01.2019.-12.2022.) – ментор при реализацији експеримената приликом интеграције нових роботизованих система и дигиталних платформи за ефикасније праћење података система;
- *ReconCell* (Horizon 2020 cascading; 09.2018.-02.2019.)– рад на развоју флексибилне роботске ћелије за аутоматизовано лепљене светала за авионске писте;

❖ Домаћи истраживачки пројекти:

- *Modular and versatile collaborative intelligent waste management robotic system for circular economy – CircuBot* (Фонд за науку РС; 05.2023.-05.2025) – рад на реализацији система за ефикасно сортирање смећа коришћењем колаборативних робота.
- *ForNextCobot* (Фонд за науку РС; 07.2020.-07.2022.)– рад на развоју алгоритама за обликовање крутости завршног уређаја робота за задатке колаборативног рада робота и човека;

- *Истраживање и развој амбијентално интелигентних сервисних робота антропоморфних карактеристика* (Министарство просвете, науке и технолошког развоја; 03.2019.) – истраживање и развој роботских решења у сервисним задацима са акцентом на антропоморфне роботе у сервисним апликацијама;

❖ Комерцијали пројекти:

- *Inovacije i nove tehnologije u MSP u centralnoj i zapadnoj Srbiji* (Научно Технолошки Парк Чачак / UNOPS; 10.2022.–04.2023.) – обуке из области роботике, реализација идејних решења за аутоматизацију/роботизацију производних процеса у малим и средњим предузећима.
- *Razvoj dijagnostičnog modula za efikasno upravljanje transformatorom* (Comel Doo; 10.2019.-03.2020.) – реализација система за мониторинг и дијагностику базираном на примени вештачке интелигенције за примену на трансформаторима средње снаге;

❖ Билатерални пројекти:

- *Razvoj PREDIKTivnog kontrolera sa promenljivom krutoscju za industrijskog KOlaborativnog roBOTa(PREDIKT-KOBOT)* – (Министарство просвете, науке и технолошког развоја; 04.2023.)
- *Serijski manipulatori kao covekovi asistivni sistemi u industriji (HUMAN-COMAN)* (Министарство просвете, науке и технолошког развоја; 06.2020)
- *Razvijanje novih pristupa za olaksavanje kolaborativnog rada robota najnovije generacije i coveka u zadacima zajednicke manipulacije objektima* (Министарство просвете, науке и технолошког развоја – 10.2018.)

Испити и обавезе предвиђени планом и програмом докторских студија:

Р.Бр.	Испит	Оцена	ЕСПБ
1	Моторна контрола и рехабилитација	10	9
2	Неуралне мреже	10	9
3	Биомедицински сензори и претварачи	10	9
4	Теорија роботских система	10	9
5	Увод у научни рад	10	6
6	Класификација и естимација сигнала	10	9
7	Савремене методе за пројектовање регулатора у системима управљања	10	9
8	Методе моделовања звучног поља	10	9
9	Аутономни роботски системи без људске посаде	10	9
10	Специјални роботски системи	10	9

Р.Бр.	Одрађене обавезе	ЕСПБ
1	студијски истраживачки рад I	15
2	научно стручни рад	3
3	студијски истраживачки рад II	15

Списак радова:

- **Књиге и монографије:**

1. К. Јовановић, **Н. Кнежевић**, Роботика – Збирка решених задатака, Академска мисао, ИСБН 978-86-7466-876-4, 2021.
2. Б. Јаковљевић, С. Јоцић, Т. Новак, Ж. Коколански, Б. Велковски, D. Tefelski, A. Tefelska, М. Јанковић, М. Барјактаровић, К. Јовановић, **Н. Кнежевић**, П. Атанасијевић, М. Новичић, *Control, virtual instrumentation and signal processing use case practicum*, University of Novi Sad, Faculty of technical sciences, ISBN 978-86-6022-211-6, 2019.

- **Радови у часописима са импакт фактором:**

1. Н. Заграђанин, Д. Памучар, К. Јовановић, **Н. Кнежевић**, Б. Павковић, Autonomous Exploration in a Complex Environment Based on Multi-Criteria Decision-Making and Using the D* Lite Algorithm for Path Planning, *Intelligent Automation & Soft Computing*, Vol. 32, No. 3, pp. 1369-1386, 2022. ISSN: 1079-8587 (print), ISSN: 2326-005X (online), Impact Factor: 3.401, M22
2. А. Вукићевић, М. Петровић, **Н. Кнежевић**, К. Јовановић, Deep Learning-Based Recognition of Unsafe Acts in Manufacturing Industry, *IEEE ACCESS*, Vol. 11, pp. 103406 - 103418, Sep, 2023, Impact Factor: 3.9, M22

- **Радови у часописима без импакт фактора:**

1. **Н. Кнежевић**, Б. Лукић, К. Јовановић, L. Žlajpah, Т. Petrič, End-effector Cartesian stiffness shaping – sequential least squares programming approach, *Serbian Journal of Electrical Engineering*, Vol. 18(1), pp. 1-14, Јануар, 2021.
2. **Н. Кнежевић**, М. Бјелић, К. Јовановић, Automated Sound Intensity Measurement With Robot And Intensity Probe, *International Journal of Electrical Engineering and Computing*, Vol. 2, No. 1, pp. 20 - 28, 10.7251/IJEEC1801020K, Јун 2018.

• **Радови са међународних конференција:**

1. Б. Лукић, **Н. Кнежевић**, К. Јовановић, Robot's Cartesian Stiffness Adjustment Through the Stiffness Ellipsoid Shaping, *Advances in Service and Industrial Robotics - Proceedings of the 32th International Conference on Robotics in Alpe-Adria Danube Region (RAAD 2023)*, pp. 289 - 296, Springer, Bled, Slovenia, 2023
2. **Н. Кнежевић**, М. Трумић, А. Fagiolini, К. Јовановић, Input-Observer-Based Estimation of the External Torque for Single-Link Flexible-Joint Robots, *Advances in Service and Industrial Robotics - Proceedings of the 32th International Conference on Robotics in Alpe-Adria Danube Region (RAAD 2023)*, pp. 97 - 105, Springer, Bled, Slovenia, 2023
3. Н. Зарпађанин, **Н. Кнежевић**, К. Јовановић, Б. Павковић, Autonomous Robot Exploration in Gazebo Simulator, *10th International Scientific Conference on Defensive Technologies. OTEH 2022*.
4. Б. Лукић, К. Јовановић, **Н. Кнежевић**, Л. Џлајпах, Т. Петрић, Maximizing the End-Effector Cartesian Stiffness Range for Kinematic Redundant Robot with Compliance, *Advances in Service and Industrial Robotics. RAAD 2020. Mechanisms and Machine Science*, Springer, Cham, 2020.
5. **Н. Кнежевић**, Б. Лукић, К. Јовановић, Т. Петрић, Л. Џлајпах, End-Effector Cartesian Stiffness Optimization: Sequential Quadrating Programming Approach, *IcETRAN 2019*, Друштво за ЕТРАН, Сребрно Језеро, Јун, 2019.
6. **Н. Кнежевић**, Б. Лукић, К. Јовановић, Feedforward Control Approaches to Bidirectional Antagonistic Actuators Based on Learning, *Advances in Service and Industrial Robotics - Proceedings of the 28th International Conference on Robotics in Alpe-Adria Danube Region (RAAD 2019)*, pp. 337 - 345, Springer, Kaiserslautern, Germany, 2019.
7. **Н. Кнежевић**, М. Новичић, Н. Катић, М. Јанковић, К. Јовановић, Real-time control of human-like robot joint based on online measurement of joint position and muscle activity, *IcETRAN 2018*, pp. 1044 - 1047, Друштво за ЕТРАН, Палић, Јун, 2018.
8. **Н. Кнежевић**, К. Јовановић, З. Гордић, В. Поткоњак, М. Мајсторовић, Hazard Identification, Risk Assessment and Safety Integration for Flexible Robotic Cell, *IcETRAN 2017*, Друштво за ЕТРАН, Јун, 2017.

• **Радови са домаћих конференција:**

1. Д. Класановић, Л. Југовић **Н. Кнежевић**, Realization And Model Identification Of Variable Stiffness Actuator Based On Torsion Springs, *ETRAN 2023*, Друштво за ЕТРАН, Јун, 2023.
2. **Н. Кнежевић**, Д. Сеничић, К. Јовановић, Toward Open-Source Robotics – ROS Use Case in Industrial and Mobile Robotics, *PSSOH*, Октобар, 2019.
3. Ђ. Панин, А. Јоцић, **Н. Кнежевић**, М. Бјелић, К. Јовановић, Д. Шумарац Павловић, Реализација аутоматизованог система за снимање акустичких карактеристика музичких инструмената са резонаторском кутијом помоћу роботске руке, *18th International Symposium INFOTEN-IAHORINA*, Јахорина, 2018.

4. М. Бјелић, **Н. Кнежевић**, К. Јовановић, Automatizovano merenje intenziteta zvuka pomoću robota i intenzitetske sonde, *Infoteh*, pp. 17 - 22, Јахорина, 2018.
5. З. Гордић, **Н. Кнежевић**, М. Мајсторовић, К. Јовановић, Реализација дидактичке производне ћелије са два индустријска робота, *Примена нових технологија и идеја у школском инжењерском образовању*, Пожега, Србија, Мај, 2017.

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Комисија је размотрила све претходно наведене резултате рада и стечена искуства кандидата Николе Кнежевића. На основу приложених докумената и усмене презентације теме докторске дисертације, Комисија је стекла увид у способности кандидата за научно-истраживачи рад и његове могућности да током израде докторске дисертације оствари резултате који ће бити приказани и оцењени од стране међународне научне заједнице. Став Комисије је да кандидат Никола Кнежевић испуњава све потребне суштинске и формалне услове да приступи изради докторске под наведеном темом.

2. Предмет и циљ истраживања

У протеклих неколико деценија, фокус индустријског развоја се заснивао на повећању продуктивности и ефикасности ослањајући се на рапидан развој технологија у области вештачке интелигенције, роботике и аутоматизације [1-3]. Иако је имплементација концепта Индустрије 4.0 допринела свеобухватној аутоматизацији индустрије, задаци који захтевају велики напор по питању когнитивних и физичких напора најчешће обављају људи [4,5]. Због тога се у протеклом периоду ради на развоју иновативних концепата код којих ће човек бити централна фигура аутоматизација (Индустрија 5.0). Циљ Индустрије 5.0 је да поред ефикасности у производњи задовољи и основне људске потребе као што су безбедност, здравље и задовољство приликом обављања индустријских послова [6,7].

Циљ дисертације ће бити анализа и дизајн радних станица које ће човеку омогућити да са што мање стреса, физичког и когнитивног оптерећења извршава задатке заједно са колаборативним роботом као и развој концепата и алгоритама који ће омогућити безбедну интеракцију човека са роботима.

На примеру задатка склапања биће демонстриран рад кооперативног система за мануелно склапање фискалних уређаја. У контексту задатака склапања индустрија 5.0 треба да предложи иновативна решења као што су колаборација робота и човека, да смањи когнитивни напор приликом извођења монотоних и репетитивних задатака и слично. Иновативна радна станица треба да садржи неколико кључних компоненти:

- Интерфејс машина-човек дизајниран тако да што мање омета већ постојећу рутину радника;
- Актуаторске јединице које сачињавају роботски системи као и аудио-визуелни системи који ће подстаћи интеракцију човека са окружењем;
- Платформа за размену података која ће на поуздан и ефикасан начин вршити размену података у циљу примене софтвера за паметну алокацију ресурса у производњи.

Такође, ова дисертација ће обрадити и различите роботске системе и алгоритме како би се оствариле безбедна физичка интеракција са човеком и/или окружењем, како би се искористио пун потенцијал неуроергономских радних станица у Индустрији 5.0.

Развојем роботских технологија (колаборативних робота, сензора, интерфејса...), роботи су примењени у великом дијапазону задатака. Међутим, како би роботи радили у неструктурираном окружењу, морају бити сигурни за рад са човеком, окружењем, и безбедни по себе. Да би се осигурала безбедност између робота и човека [8], као и робусност у контактним задацима, робот треба да садржи способност да контролише физичку интеракцију са окружењем кроз хардверски реализовану и/или софтверски контролисану механичку попустљивост, односно крутост као њену реципрочну меру. Постоје три главна приступа за контролисање матрице крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему односно попустљивости завршног уређаја, којим се дефинишу и перформансе интеракције робота са околином, где се графичка репрезентација ових матрица може приказати елипсоидом крутости:

- 1) Софтверски контролисана (активна) крутости при чему је могуће користити имплементацију са или без сензора силе и момента на завршном уређају [9,10];
- 2) Софтверски контролисана (активна) крутост код робота који поседују сензоре момента на сваком зглобу [11];
- 3) Хардверски контролисана (пасивна) крутост где се примењују иновативни приступи у дизајну самих актуатора (актуатори са серијском еластичношћу односно актуатори са променљивом крутошћу) [12].

Приступ 1) се заснива на контроли крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему, док се приступи 2) и 3) заснивају на контроли крутости на нивоу зглоба робота. Свакако, сва три приступа могу имати додатан бенефит од експлоатације редундантности (нултог простора) за кинематички редундантне задатке. Овим приступом је могуће вршити обликовање крутости на нивоу завршног уређаја усвајајући одређена ограничења као што су геометрија и конфигурација робота, број степени слободе потребних за извршавање задатка или оствариве крутости на нивоу зглоба робота [13,14].

Такође, крутост завршног уређаја се може поделити на ону која зависи од конфигурације робота (енг: configuration-dependent stiffness CDC) и ону која зависи од заједничког утицаја крутости на нивоу зглоба (енгл.: common mode stiffness CMS) [15]. CDC има смисла разматрати код редундантних робота и највећи утицај има на оријентацију елипсоида крутости, док CMS утиче на запремину елипсоида. Крутост завршног уређаја зависи од конфигурације у којој се робот налази (осликава се кроз Јакобијан матрицу) и од крутости на нивоу зглоба, и представља нелинеарну везу између позиције и крутости зглоба до крутости завршног уређаја Декартовом координатном систему [11,16].

Контролисање тачних вредности крутости завршног уређаја робота у Декартовом координатном систему (енгл.: end-effector, EE) представља изазован задатак због тешкоћа у естимацији саме крутости и могућности контролисања комплетне матрице крутости завршног уређаја. Међутим, у већини практичних примена су потребне само квантитативне вредности крутости (висока/ниска) у правцу кретања EE-а (или правцу који је нормалан на тај правац). Потпуна контрола матрице крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему захтева велики број контролисаних улаза [16], што је тешко постићи у реалним апликацијама.

Како би се осигурала ефикасност при контроли крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему, за различите редундантне роботе, матрица крутост завршног уређаја се може представити елипсоидом крутости. Овај приступ пружа интуитивнију и визуално пријемчиву репрезентацију крутости. Применом оптимизације засноване на секвенцијалном квадратном програмирању (енгл.: sequential least square programming, SLSQP) овакви нелинеарни проблеми могу бити решени у реалном времену [17,18]. Циљ је оптимизовати вредности крутости зглобова и путању зглобова робота, користећи истраживање нултог простора (енгл.: null space) за одређени задатак, поштујући ограничења која се намећу од стране самог робота и/или задатка [19,20].

Користећи декомпозицију сопствених вредности матрице крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему, алгоритам треба да минимизује разлику у оријентацији главне осе тренутне и жељене елипсоидне крутости, као и фактор скалирања између главне и споредних оса елипсоиде. Овакав приступ се може искористити за обликовање крутости у задацима монтаже, сечења, фине обраде површина, итд. Односно, код оваквих задатака дуж правца кретања је потребно постићи одговарајуће особине по питању кртости завршног уређаја (висока крутост), док је по бочним осама пожељно имати ниске вредности крутости како би робот био способан да се прилагоди не-структурираним променама у окружењу или при судару. Такође, овај приступ ће омогућити корисницима боље разумевање и контролу робота, без обзира на њихово знање о распону крутости које је могуће остварити на нивоу зглоба/завршног уређаја и међусобним зависностима елемената матрице крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему.

Како би се поменути задаци извршили на предвиђени начин неопходно је извршити процену величина од интереса као што су крутост завршног уређаја робота и екстерне силе које делују на завршни уређај робота током интеракције са околином.

Такође, да би се омогућила безбедна интеракција између робота и његове околине, потребно је у реалном времену пратити екстерне силе и моменте који делује на робота, како би се у случају колизије могло реаговати на одговарајући начин. Уколико је колизија неизбежна потребно је да робот осигура безбедност [21], и да при томе управља позицијом и крутошћу на одговарајући начин [22,23].

Иницијални кораци за одређивање на који начин је потребно да робот одговори на судар јесте детекција да се судар заправо десио, изоловати локацију на којој се тај судар десио, и извршити естимацију амплитуде екстерне силе односно момента [24]. За детектовање и естимирање екстерних сила и момената постоји неколико предложених решења као што су посебне врсте навлака за роботе [25] као и решења базирана на прикупљању информација са сензора силе и момента монтираног или на зглобу робота или на завршном уређају [26]. Такође, постоје и решења која на основу опсервација енергије, брзине или момента реконструишу информацију о екстерној сили и моменту, ослањајући се на информације са сензора позиције и струје [25].

Користећи искључиво енкодере и податке о струји биће извршена процена екстерних момената који делују на робота са једним флексибилним зглобом, актуатором променљиве крутости у антагонистичкој конфигурацији. Стратегија естимације се састоји од два корака: прво се реконструишу еластични обртни моменти које генеришу мотори унутар актуатора променљиве крутости, а затим се процењује спољни обртни момент користећи податке о претходно реконструисаним еластичним обртним моментима и динамичким моделом робота. За реконструкцију/естимацију еластичног момента као и самог екстерног момента биће коришћен опсервер са непознатим улазима.

[1] M. Ghobakhloo, "The future of manufacturing industry: a strategic roadmap toward industry 4.0," *Journal of manufacturing technology management*, vol. 29, no. 6, pp. 910–936, 2018.

[2] R. Goel and P. Gupta, *Robotics and Industry 4.0*. Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 157–169. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-030-14544-6_9

[3] V. Alcacer and V. Cruz-Machado, "Scanning the industry 4.0: A literature review on technologies for manufacturing systems," *Engineering science and technology, an international journal*, vol. 22, no. 3, pp. 899–919, 2019.

[4] N. Ahmad, A. Shamsuddin, and N. Abu Seman, "Industry 4.0 implications on human capital: A review," *Journal for Studies in Management and Planning*, vol. 4, no. 13, pp. 221–235, 2018

- [5] S. Waschull, J. A. C. Bokhorst, and J. C. Wortmann, "Impact of technology on work: Technical functionalities that give rise to new job designs in industry 4.0," in *Advances in Production Management Systems. The Path to Intelligent, Collaborative and Sustainable Manufacturing*, H. L'ödding, R. Riedel, K.-D. Thoben, G. von Cieminski, and D. Kiritsis, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 274–281
- [6] Y. Lu, H. Zheng, S. Chand, W. Xia, Z. Liu, X. Xu, L. Wang, Z. Qin, and J. Bao, "Outlook on human-centric manufacturing towards industry 5.0," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 62, pp. 612–627, 2022.
- [7] F. Longo, A. Padovano, and S. Umbrello "Value-oriented and ethical technology engineering in industry 5.0: A human-centric perspective for the design of the factory of the future," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 12, p. 4182, 2020.
- [8] Santis A. D., Siciliano B., Luca A. D. & Bicchi, A. "An atlas of physical human–robot interaction". *Mechanism and Machine Theory* 43, 253–270 (2008).
- [9] Hogan N., "Impedance control: An approach to manipulation: Part ii—implementation." *J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 107, 8–16 (1985).
- [10] Ficuciello F., Romano A., Villani L. & Siciliano B. "Cartesian impedance control of redundant manipulators for human-robot co-manipulation". 2014 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems.
- [11] Ajoudani, A., Tsagarakis N. G. & Bicchi A. "On the role of robot configuration in cartesian stiffness control" (2015). 2015 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA).
- [12] Braun D. J. et al. "Robots driven by compliant actuators: Optimal control under actuation constraints." *IEEE Transactions on Robotics* 29, 1085–1101 (2013).
- [13] Lukić B., Jovanović K., Knežević N., Žlajpah L. & Petrič T. "Maximizing the end-effector cartesian stiffness range for kinematic redundant robot with compliance" (2020). *Advances in Service and Industrial Robotics*.
- [14] Knezevic N., Lukic B., Jovanovic K., Zlajpah L. & Petric T. "End-effector cartesian stiffness shaping - sequential least squares programming approach". *Serbian Journal of Electrical Engineering* 18, 1–14 (2021).
- [15] Ajoudani A., Gabbicini M., Tsagarakis N., Albu-Schaffer A. & Bicchi A. "Teleimpedance: Exploring the role of common-mode and configuration-dependant stiffness" (2012). 2012 12th IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots (Humanoids 2012)
- [16] Albu-Schaffer A., Fischer M., Schreiber G., Schoeppe F. & Hirzinger G. "Soft robotics: what cartesian stiffness can obtain with passively compliant, uncoupled joints?" (2004). 2004 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS).
- [17] Chen Y. & Ding Y. "Posture optimization in robotic flat-end milling based on sequential quadratic programming". *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 145, 061001 (2023).
- [18] Usevitch N. S., Hammond Z. M. & Schwager M. "Locomotion of linear actuator robots through kinematic planning and nonlinear optimization". *IEEE Transactions on Robotics* 36, 1404–1421 (2020).

- [19] Ficuciello F., Romano A., Villani L. & Siciliano B. "Cartesian impedance control of redundant manipulators for human-robot co-manipulation" (2014). 2014 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems.
- [20] Lukić B., Jovanović K., Žlajpah L. & Petrič T. "Online cartesian compliance shaping of redundant robots in assembly tasks". *Machines* 11 (2023).
- [21] Lippi M., Gillini G., Marino A., Arrichiello F. "A data-driven approach for contact detection, classification and reaction in physical human-robot collaboration". In: 2021 IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation (ICRA). pp. 3597–3603. IEEE (2021)
- [22] Trumić M., Della Santina C., Jovanović K., Fagiolini A. "Adaptive control of soft robots based on an enhanced 3d augmented rigid robot matching". In: 2021 American Control Conference (ACC). pp. 4991–4996. IEEE (2021)
- [23] Trumić M., Jovanović K., Fagiolini A. "Decoupled nonlinear adaptive control of position and stiffness for pneumatic soft robots". *The Intl. J. of Robotics Research* 40(1), 277–295 (2021)
- [24] Haddadin S., De Luca A., Albu-Schaffer A. "Robot collisions: A survey on detection, isolation, and identification". *IEEE Trans. on Robotics* 33(6), 1292–1312 (2017)
- [25] Pang G., Yang G., Heng W., Ye Z., Huang X., Yang H.Y., Pang Z. "Coboskin: soft robot skin with variable stiffness for safer human–robot collaboration". *IEEE Trans. on Industrial Electronics* 68(4), 3303–3314 (2020)
- [26] De Luca A., Albu-Schaffer A., Haddadin S., Hirzinger G. "Collision detection and safe reaction with the dlr-iii lightweight manipulator arm". In: 2006 IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems. pp. 1623–1630. IEEE (2006)

3. Полазне хипотезе

Полазне хипотезе докторске дисертације су:

- Колаборација између робота и човека може повећати ефикасност приликом обављања монотоних/тешких/опасних послова али и побољшати опште услове и задовољство радника приликом обављања тих задатака.
- Ефикасност у кооперативним/колаборативним задацима се може унапредити коришћењем иновативних решења попут адаптивних интерфејса, напредних сензорских система, алгоритама за естимацију човекових намера и психо-физичког стања.
- Коришћењем метода машинског учења, модел актуатора променљиве крутости се може унапредити и затим користити у управљачким задацима.
- Технике итеративног учења пружају могућност континуалног учења параметара модела чиме се смањује значај и промена механичких карактеристика модела.

- Промена крутости завршног уређаја редундантног робота се може постићи променом кинематичке конфигурације робота или променом крутости у зглобовима робота.
- Интуитивна графичка репрезентација еквивалентне крутости завршног уређаја може омогућити једноставније и интуитивније управљање физичком интеракцијом робота у односу на обликовање потпуне матричне интерпретације механичке крутости. Обликовање елипсоида крутости у Декартовом координатном систему се може посматрати као нелинеарни оптимизациони проблем са ограничењима.
- Реконструкцију еластичног момента могуће је одрадити помоћу опсервера непознатог улаза (енгл.: *Unknown Input Observer*).
- Узимајући у обзир динамику линка и еластични момент зглоба робота могуће је одредити екстерни момент који делује на зглоб робота.

4. Методе истраживања

Три различита евалуациона окружења ће бити реализована ради анализе и провере постављених хипотеза. Валидација хипотеза ће се прво извести на одговарајућим симулационим моделима реализованих користећи *MuJoCo* симулационо окружење и *ROS* (енгл.: *Robot Operating System*) а затим и на реалним експерименталним поставкама.

Први део дисертације ће се бавити анализом кооперативног рада робота и човека при задацима мануелног склапања односно монтаже. Првобитно ће бити дизајнирана и реализована радна станица за мануелно склапање потпомогнуто колаборативним роботом са 7 степени слободе (енгл.: *degrees of freedom, DoF*) *Franka Emika Panda*. Поред тога, биће реализовани системи који ће подржати рад човека и робота базиран на *Fiware* софтверском решењу, систем за пружање правовремених упутстава раднику (*ADIN – Adaptive Interfaces*), систем за не-инвазивну интеракцију човека са целокупним системом заснован на *LeapMotion* сензорском систему, систем за естимацију менталног фокуса, задовољства и когнитивног оптерећења коришћењем ЕЕГ уређаја (*MBTrain Smartphones*). Како би се утврдиле перформансе система користиће се субјективни тестови као и мерења система за естимацију могуће активности.

Други део дисертације ће обрадити одабране методе машинског учења погодних за учење нелинеарних модела као што су модели актуатора променљиве крутости. Одговарајући подаци за обучавање модела ће бити прикупљени са реалног актуатора. Разматрани тип актуатора са променљивом крутошћу има нелинеарне опруге у антагонистичкој конфигурацији. Конкретан модел актуатора је *QB Advanced Pro*. Код оваквих актуатора нелинеарне опруге у антагонистичкој конфигурацији омогућавају линеарну промену крутости целокупног система. Валидација модела ће бити извршена на реалним актуаторима који се нису користили за прикупљање обучавајућег скупа података.

Затим ће се користити итеративно учење како би се модел актуатора могао прилагодити на евентуалне промене у механичкој структури настале експлоатацијом актуатора.

Затим ће у тези бити обрађен алгоритмима за обликовањем матрице/елипсоиде крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему. Иницијално је потребно развити симулационе и математичке моделе како би се евалуација алгоритама извршила на одговарајући начин. Као алгоритми за подешавање крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему разматраће се одговарајућа подгрупа оптимизационих алгоритама погодних за нелинеарне системе. Резултати добијени у симулационим окружењима биће експериментално потврђени на реалном планарног манипулатору са 4 степена слободе и *Franka Emika Panda* роботу.

Последњи део тезе ће се фокусирати на естимацију крутости и екстерних сила и момената робота са актуаторима са променљивом крутошћу. Како би се извршило тестирање постигнутих резултата приликом примена алгоритама за планирање/обликовање крутости завршног уређаја робота у Декартовом координатном систему биће реализован алгоритам за естимацију крутости. Користећи *Franka Emika Panda* робота да изврши пертурбације над роботом са актуаторима са променљивом крутошћу (*4DoF QB Advanced Pro*) биће снимљени померају и силе/моменти који се том приликом генеришу између два робота. На основу ових мерења ће бити извршена процена крутости завршног уређаја. Затим ће бити обрађени алгоритми за естимацију еластичног момента и екстерне силе/момента. Применом опсервера непознатог улаза извршиће се реконструкција еластичног момента а затим и екстерне силе/момента, опсервација ће се ослањати на информације са сензора позиције и динамичком моделу робота.

5. Очекивани научни доприноси

Очекивани научни доприноси дисертације су:

- Систематичан преглед литературе из области кооперативног/колаборативног рада робота и човека, нових модела актуатора и њиховог моделирања и управљања заснованог на учењу и примени техника оптимизације.
- Развој неуроергономске радне станице за мануелно склапање потпомогнуто колаборативним роботом.
- Реализација алгоритма машинског учења за учење модела актуатора променљиве крутости као и итеративног алгоритма за компензацију несавршености које настају услед експлоатације актуатора.
- Развој нових алгоритама за управљање роботима у задацима физичке интеракције заснованих на контроли момента и/или крутости зглоба робота и реконфигурацији робота.

- Развој техника управљања крутости завршног уређаја у Декартовом систему дуж оса примарних за ефикасније и безбедније извођење типичних индустријских задатака.
- Реализација система за естимацију крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему.
- Реализација иновативних алгоритама за естимацију екстерне силе/момента заснованих на опсерверу непознатог улаза.

6. План истраживања

Истраживања ће бити обављена у неколико корака:

- 1) Преглед научно-стручне литературе ради анализе постојећих праваца истраживања у области кооперативно/колаборативног рада робота и човека;
- 2) Преглед научно-стручне литературе ради анализе метода машинског учења за потребе учења модела актуатора променљиве крутости;
- 3) Преглед научно-стручне литературе ради анализе метода за обликовање крутости завршног уређаја;
- 4) Развој и тестирање роботске ћелије за потпомогнуто мануелно склапање;
- 5) Развој модула за ефикаснију кооперацију између робота и човека (адаптивни дисплеји, неинвазивни сензорски системи, системи за процену стања човека приликом интеракције са роботом, ...);
- 6) Развој алгоритама машинског учења за учење модела актуатора са променљивом крутошћу (QB Advanced Pro);
- 7) Припрема симулационог и експерименталног окружења за тестирање алгоритама машинског учења;
- 8) Реализација симулационих и математичких модела потребних за тестирање алгоритама оптимизације за обликовање крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему;
- 9) Развој оптимизационих алгоритама са ограничењима за потребе обликовања крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему;

10) Експериментална евалуација резултата добијених на симулационом окружењу у задацима обликовања крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему;

11) Развој алгоритама за детекцију и естимацију екстерне силе/момента за системе са једним степеном слободе;

12) Развој алгоритама за детекцију и естимацију екстерне силе/момента за системе са више степени слободе.

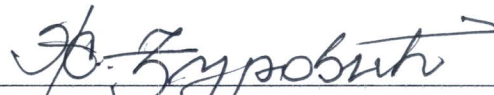
7. Закључак и предлог

На основу изложеног, Комисија констатује да кандидат Никола Кнежевић, мастер инжењер електротехнике и рачунарства, испуњава све потребне услове за израду докторске дисертације под насловом "Управљање робота у физичкој интеракцији са околином и сарадњи са човеком засновано на техникама учења и оптимизације". Поред испуњености формалних услова, кандидат је демонстрирао способност систематичног приступа анализи проблема и теоријским и практичним знањима у управљању роботских система, као и излагању резултата у научној заједници.

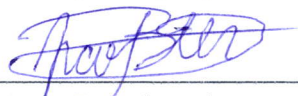
Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да кандидату Николи Кнежевићу, мастер инжењеру електротехнике и рачунарства, одобри израду докторске дисертације под насловом "Управљање робота у физичкој интеракцији са околином и сарадњи са човеком засновано на техникама учења и оптимизације", под менторством др Косте Јовановића, ванредног професора на Електротехничком факултету Универзитета у Београду.

У Београду, 11.10.2023. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



др Жељко Ћуровић, редовни професор,
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Арсо Вукићевић, виши научни сарадник,
Универзитет у Крагујевцу – Факултет инжењерских
наука



др Ненад Јовичић, ванредни професор,
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

ИЗЈАВА

Као предложени ментор докторске дисертације “Управљање робота у физичкој интеракцији са околином и сарадњи са човеком засновано на техникама учења и оптимизације” кандидата Николе Кнежевића, сагласан сам са Извештајем Комисије за оцену подобности теме и кандидата.

У Београду, 30.10.2023.



Коста Јовановић, ванредни професор