

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Николе Кнежевића

Одлуком 920-27 бр. од 14.05.2024. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Николе Кнежевића под насловом

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

После прегледа достављене Дисертације и других пратећих материјала и разговора са Кандидатом, Комисија је сачинила следећи

### РЕФЕРАТ

#### 1. УВОД

##### 1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

11.10.2018. године Никола Кнежевић је уписао докторске студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, на модулу Управљање системима и обрада сигнала. Све испите предвиђене наставним планом и програмом докторских студија положио је са просечном оценом 10.

24.08.2023. године Никола Кнежевић је пријавио тему за израду докторске дисертације под радним 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“).

05.09.2023. године Комисија за студије трећег степена разматрала је предлог теме за израду докторске дисертације и предлог Комисије о оцени научне заснованости теме упутила Научно-наставном већу на усвајање.

12.09.2023. године Научно-наставно веће именовало је Комисију за оцену научне заснованости теме докторске дисертације у сасаву:

- др Жељко Ђуровић, 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;

за ментора је предложен: др Коста Јовановић, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет.

11.10.2023. године обављена је јавна усмена одбрана теме докторске дисертације на Електротехничком факултету у Београду пред комисијом у саставу:

- др Жељко Ђуровић, 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.

На одбрани су присуствовали сви чланови Комисије. Комисија је оценила усмену одбрану предложене теме као успешну (оцена ”задовољно”).

07.11.2023. године Научно-наставно веће усвојило је извештај Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације.

18.12.2023. године Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације Николе Кнежевића 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”).(број 61206-4676/2-23 од 18.12.2023. године)

29.04.2024. године кандидат Никола Кнежевић је предао на преглед и оцену докторску дисертацију 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”).

07.05.2024. године Комисија за студије трећег степена потврдила је испуњеност потребних услова за подношење предлога Научно-наставном већу Електротехничког факултета за формирање Комисије за оцену докторске дисертације.

14.05.2024. године Научно-наставно веће Факултета именовало је Комисију за оцену докторске дисертације у саставу (број 920-27 од 14.05.2024. године):

- др Жељко Ђуровић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет;
- др Арсо Вукићевић, доцент, Универзитет у Крагујевцу – Факултет инжењерских наука;
- др Ненад Јовичић, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет.
- др Александра Крстић, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет.
- др Андреј Савић, виши научни сарадник, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет.

## 1.2. Научна област дисертације

Дисертација кандидата Николе Кнежевића припада научној области Електротехничко и рачунарско инжењерство, ужој научној области Аутоматике са Роботиком, за коју је матичан Електротехнички факултет. За ментора дисертације одређен је др Коста Јовановић, ванредни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду, због истакнутих доприноса у ужој области Аутоматике, а посебно у подобласти Роботике, конкретно управљања роботима, што је и предмет дисертације.

## 1.3. Биографски подаци о кандидату

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 одбранивши 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 работи, 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-инспирираних 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 последњих шест година у сарадњи са компанијом АББ Србија.

Никола Кнежевић је аутор 4 рада у часописима са SCI листе (M22), 2 рада у часописима ван SCI листе, 9 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 роботичку и флексибилну аутоматизацију под називом „*End-Effector Cartesian Stiffness Optimization: Sequential Quadrating Progaming Approach*“.

Никола Кнежевић је ангажован на неколико научних и међународних пројеката у области роботике на којима спроводи наведена истраживања у области роботике.

## **2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ**

### 2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација је по форми и структури у потпуности усклађена са Упутством о облику и садржају докторске дисертације која се брани на Универзитету у Београду.

Докторска дисертација је написана на српском језику, ћириличним писмом и има укупно 111 страна. Докторска дисертација је организована у 6 поглавља са 42 слике, 3 табеле и листом од 205 референци.

Текст докторске дисертације подељен је на основна поглавља:

1. Увод
2. Физичка интеракција робота са окружењем
3. Сарадња робота и човека - задатак склапања потпомогнут колаборативним роботом
4. Обликовање крутости завршног уређаја колаборативног робота – геометријски приступ
5. Обликовање крутости завршног уређаја робота погоњених актуаторима са променљивом крутошћу – приступ учења и оптимизације
6. Закључак

Поред основних поглавља дисертација садржи насловну страну на српском и енглеском језику, страницу са подацима о ментору и члановима Комисије, сажета са кључним речима и подацима о научној области на српском и енглеском језику. Поред тога на крају текста налазе се обавезне изјаве (Изјава о ауторству, Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада, Изјава о коришћењу).

## 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Прво поглавље даје преглед основних мотива за спровођење истраживања, доноси основне хипотезе докторске дисертације и даје увид у остварене научне публикације и доприносе.

Друго поглавље даје преглед основних појмова као што су механичка импеданса, пасивна и активна крутост. Такође, поглавље пружа преглед основних методологија за обликовање крутости код робота (на нивоу зглоба робота или на нивоу завршног уређаја робота). Дат је преглед приступа и изазова у процени интеракције робота са окружењем где су неки од најважнијих изазова детекција, идентификација и класификације интеракције као и реакција на интеракцију. Такође, представљено је које особине робот остварује решавањем представљених изазова. Описане су основне методе за управљање роботом у задацима интеракције са окружењем као што су контрола силе, импедансно и адмитансно управљање. Представљена је класификација радних места у којима робот и човек раде и направљена је подела између врсте интеракције између робота и човека, као и безбедносне мере и особине које роботски системи морају поседовати у одређеним нивоима интеракције између робота и човека.

Треће поглавље описује изазове интеракције човека и робота и даје предлог једног решења неуроергономске радне станице за сарадњу човека и робота. У том духу разматра се типичан задатак у индустрији у којем робот и човек сарађују – задатак монтаже или склапања. Првобитно је дизајнирана и реализована радна станица за мануелно склапање потпомогнуто 7DoF (енг. *degrees of freedom* – степени слободе) колаборативним роботом (*Franka Emika Panda*), као модул за физичку подршку раднику током обављања задатка. Поред тога, реализовани су системи подршке рада човека и робота базираних на *Fiware* софтверском решењу. Затим модул за нефизичку подршку раднику (аудио– визуелну), као што је систему за пружање правовремених упутстава раднику (*ADIN – Adaptive Interfaces*). Онда модул за процену физичких стања радника (мониторинг и предикција кретања или ергономије радника), где је представљен систему за неинвазивну интеракцију човека са целокупним системом заснован на *LeapMotion* сензорском систему. Следећи модул је модул за процену психичког (менталног) стања радника (мозак-рачунар интерфејси или системи за процену менталног стања на основу праћења покрета очију), као што је систему за естимацију менталног фокуса, задовољства и когнитивног оптерећења коришћењем ЕЕГ

уређаја (*MBTrain Smartphones*). Као и модул за пружање стратешке подршке (коришћење експертских система, анализе података за доношење одлука), где је представљен систем за интелигентну прераспodelу радних задата *Smart Task Scheduler*. Како би се утврдиле перформансе система и допринос робота унапређењу когнитивним аспектима радника на радном месту користиће се субјективни тестови као и мерења система за естимацију могућности активности.

Затим, у четвртном поглављу тезе је обрађен алгоритмима за обликовање крутости завршног уређаја колаборативног робота у Декартовом координатном систему коришћењем геометријског приступа. Иницијално су развијени симулациони и математички модели како би се евалуација алгоритама извршила на одговарајући начин. Као алгоритми за подешавање крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему, разматрана је одговарајућа подгрупа оптимизационих алгоритама погодних за нелинеарне системе (секвенцијално квадратно програмирање). Предлаже се коришћење елипсоида крутости као интуитивније репрезентације матрице крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему. Резултати добијени у симулационим окружењима су експериментално потврђени на реалном *Franka Emika Panda* роботу, у два експериментална сценарија – провлачење шрафа кроз алуминијумски профил и сечење траке.

Пето поглавље дисертације обрађује одабране методе машинског учења погодне за учење нелинеарних модела као што су модели актуатора променљиве крутости. Разматрани тип актуатора је актуатор са променљивом крутошћу са нелинеарним опругама у антагонистичкој конфигурацији. Конкретан модел актуатора коришћен у овом поглављу је *QB Advanced Pro*. Код оваквих актуатора нелинеарне опруге у антагонистичкој конфигурацији омогућавају линеарну промену крутости целокупног система. Валидација модела је извршена на реалним актуаторима који се нису користили за прикупљање обучавајућег скупа података. Затим је имплементирано и итеративно учење како би се модел актуатора прилагодио евентуалним променама у механичкој структури насталих експлоатацијом актуатора.

Последњи део тезе се фокусира на естимацију крутости и екстерних сила и момената робота са актуаторима са променљивом крутошћу. За потребе тестирања постигнутих резултата приликом примена алгоритама за планирање/обликовање крутости завршног уређаја попустљивог робота у Декартовом координатном систему, реализован је алгоритам за естимацију крутости. Увођењем случајних пертурбација над роботом погоњеног актуаторима променљиве крутости (*4DoF QB Advanced Pro*) добијен је одговарајући одзив система (помераји и силе/моменти који се том приликом генеришу). На основу мерења одзива система услед пертурбација, извршена је процена крутости завршног уређаја.

У шестом поглављу истичу се кључни закључци дисертације, осврћући се на научне доприносе изложеног материјала, и будуће правце истраживања које приказани резултати отварају.

### 3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

#### 3.1. Савременост и оригиналност

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. 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. Због тога се у протеклом периоду радило 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.

Циљ дисертације је 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 демонстриран је 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 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 подстичу интеракцију човека са окружењем;
- Платформа за размену података која на поуздан и ефикасан начин врши размену података у циљу примене софтвера за паметну алокацију ресурса у производњи.

Такође, ова дисертација обрађује и различите роботске системе и алгоритме у циљу остваривања безбедне интеракције са човеком и/или окружењем. 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 и безбедни за непосредан рад са човеком, окружењем, и безбедни по себе. Да би се осигурала безбедност између робота и човека, као и робусност у контактним задацима, робот треба да има 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 крутости односно попустљивости завршног уређаја робота у Декартовом координатном систему којим се дефинишу и перформансе интеракције робота са околином, где се графичка репрезентација ових матрица може приказати елипсоидом крутости:

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

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 се могу побољшати експлоатацијом редувантности (нултог простора) за кинематички редувантанте 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.

Контролисање тачних вредности крутости завршног уређаја робота у Декартовом координатном систему (енг. *end-effector*, *EE*) представља изазован задатак због одређених потешкоћа у естимацији саме крутости и могућности контролисања комплетне матрице крутости завршног уређаја. Међутим, у већини практичних примена су потребне само

квалитативне вредности крутости (висока/ниска) у правцу кретања завршног уређаја (или правцу који је нормалан на правац кретања). Потпуна контрола матрице крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему захтева велики број контролисаних улаза, што је тешко постићи у реалним апликацијама.

Како би се осигурала ефикасност при контроли крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему, за различите редувантне роботе, матрица крутости завршног уређаја се може представити елипсоидом крутости. Овај приступ пружа интуитивнију и визуелно пријемчиву репрезентацију крутости. Применом оптимизације засноване на секвенцијалном квадратном програмирању (енг. *sequential least square programming*, SLSQP) контролисање крутости, претрага нултог простора, итд. као нелинеарани проблеми могу бити решени у реалном времену. Циљ је пронаћи оптималне вредности крутости зглобова и путању зглобова робота, користећи истраживање нултог простора (енг. *null space*) за одређени задатак, поштујући ограничења која се намећу од стране самог робота и/или задатка.

Користећи декомпозицију сопствених вредности матрице крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему, алгоритам треба да минимизује разлику у оријентацији главне осе тренутне и жељене елипсоиде крутости, као и фактор скалирања између главне и споредних оса елипсоиде. Овакав приступ се може искористити за обликовање крутости у задацима монтаже, сечења, fine обраде површина, итд. Односно, код оваквих задатака дуж правца кретања је потребно постићи одговарајуће особине по питању крутости завршног уређаја (висока крутост), док је по бочним осама пожељно имати ниске вредности крутости како би робот био способан да се прилагоди неструктурираним 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. 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 и да при томе управља позицијом и крутошћу на одговарајући начин.

Код робота погоњених актуаторима који модулишу крутост користећи еластични елемент уграђен између мотора и самог линка, безбедна интеракција је гарантована дизајном. Ови актуатори се деле на две велике подгрупе, оне који имају константну крутост (еластични елемент је повезан на ред између мотора и линка) и називају се серијски еластични актуатори (енг. *Serial Elastic Actuators*, SEA), и на оне који своју крутост могу да мењају током времена (постоје два мотора помоћу којих је могуће симултано мењати позицију линка робота и подешавати крутост еластичног елемента) и називају се актуатори променљиве крутости (енг. *Variable Stiffness Actuator*, VSA). Коришћење роботских система са попустљивим актуаторима са уграђеним еластичним елементом поред уграђене безбедности пружа кориснику и одређена побољшања по питању енергетске ефикасности (овакви актуатори могу енергију судара да сачувају у еластичном елементу и искористе је у каснијој експлоатацији), или пак пружају боље перформансе код репетитивних задатака као што су закуцавање ексера, бацање и други (пројектовањем одговарајућег управљања се могу постићи већи излазни momenti него код класичних крутих актуатора). Са друге стране, овакве актуаторе је теже моделовати због своје сложене конструкције, али и због уграђеног еластичног елемента који има нелинеарну природу, па је изазовно и пројектовати одговарајуће контролере којима би се вршило управљање овог типа актуатора. Моделовању актуатора са променљивом крутошћу могуће је приступити кроз различите приступе машинског учења. Коришћењем алгоритама машинског учења омогућава се мапирање

улазно излазне карактеристике ових актуатора без потребе познавања конструкције актуатора. Алгоритми машинског учења пружају могућност обучавања и оног дела модела актуатора променљиве крутости који се стандардним приступом моделовања занемарује или се не може моделовати, као што су несиметрије актуатора или трења, чиме се додатно подиже ефикасност при експлоатацији. Такође, коришћењем алгоритама машинског учења са особинама инкременталног обучавања могуће је, током фазе експлоатације актуатора променљиве крутости, вршити додатна обучавања на основу података добијених током саме експлоатације. Овакви алгоритми су веома корисни јер сам еластични елемент може да промени своје карактеристике услед експлоатације и самим тим се деградирају перформансе модела актуатора, па се овим алгоритмима модел актуатора по потреби може додатно обучити како би се надоместиле промене параметара.

### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У докторској дисертацији је цитирано 205 библиографских референци наведених по редоследу цитирања у тексту дисертације. Цитиране референце већином припадају области управљања роботских система у интеракцији, остваривању безбедности роботских система при интеракцији са људима и окружењем, као и области машинског учења и оптимизација код робота који се примењују у задацима интеракције, на основу чега се може закључити да је кандидат остварио темељан увид у резултате досадашњих истраживања у предметној научној области.

### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У току истраживања које је резултовало овом дисертацијом, примењене су следеће научне методе:

1. Кроз преглед научно-стручне литературе извршена је анализа постојећих праваца истраживања у области кооперативног/колаборативног рада робота и човека;
2. Извршен је преглед научно-стручне литературе ради анализе метода машинског учења за потребе учења модела актуатора променљиве крутости;
3. Такође извршен је преглед научно-стручне литературе ради анализе метода за обликовање крутости завршног уређаја;
4. Развијена је и тестирана роботска ћелија за роботом потпомогнуто мануелно склапање;
5. Развијени су модули за ефикаснију кооперацију између робота и човека (системи за физичку подршку, психолошку подршку, не-физичку подршку и стратешку подршку човеку приликом интеракције са роботом);
6. Реализовани су симулациони и математички модела потребни за тестирање алгоритама оптимизације за обликовање крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему;
7. Развијени су оптимизациони алгоритама са ограничењима за потребе обликовања крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему;
8. Извршена је експериментална евалуација резултата добијених на симулационом окружењу у задацима обликовања крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему;
9. Развијени су алгоритама машинског учења за учење модела актуатора са променљивом крутошћу (*QB Advanced Pro*);
10. Припремљени су симулациона и експериментална окружења за тестирање алгоритама машинског учења;
11. Примењени су алгоритама за естимацију у циљу процене параметара матрице крутости завршног уређаја робота у Декартовом координатном систему.



### 3.4. Применљивост остварених резултата

У оквиру ове докторске дисертације представљен је дизајн неуроергономске радне станице за процес ручне монтаже потпомогнуте колаборативним роботом, усмерене ка човеку, чији су ефекти тестирани на објективне и субјективне мере перформанси и оптерећења радника у реалном фабричком окружењу. Радна станица приказује главне елементе новог концепта Индустрије 5.0, укључујући модуле за менталну (*BrainWatch*) и физичку (*M2O2P-L*) процену стања радника, као и модуле за физичку (*Cobot*) и визуелну (*ADIN*) помоћ раднику. Компоненте система развијене су као део активности у оквиру пројекта *Smart Human Oriented Platform for Connected Factories (SHOP4CF)*. Све компоненте су развијене кроз концепт отвореног кода и јавно су доступне кроз *SHOP4CF* и (*RAMP*) портфолио. Неуроергономска радна станица је демонстрирана у реалном фабричком окружењу где је 5 искусних радника извршило тестирање сваке компоненте система. Приказана архитектура система омогућава велику флексибилност и прилагођење сваке компоненте индивидуалним захтевима различитих апликација док задовољава све стандарде дефинисане концептима Индустрије 5.0. Односно, сваки од конкретно развијених софтверско-хардверских решења може бити прилагођено по потреби другој апликацији, или може бити замењено модулом који користи другу технологију за процену стања радника или подршку раднику. На пример, могуће је имплементирати егзоскелете као уређаје за физичку подршку радницима који могу да повећају перформансе радника или да спрече мишићно-скелетна обољења. За нефизичку подршку могу се користити технологије засноване на проширеној или виртуелној реалности како би се пружиле додатне информације раднику о самом процесу. Односно, могуће је применити камере, тактилне сензоре или сензоре за праћење кретања очију како би се добио увид у физичке и психичке аспекте радника. Примарни доприноси предложене неуроергономске радне станице за роботом потпомогнуто склапање укључују смањење броја неисправних производа, повећање производње, повећање задовољства радника уз смањење напора током извршавања радног задатка.

У циљу даљег унапређења интеракције између робота и човека (прелазак из кооперативног ка колаборативном раду) представљена је метода обликовања крутости у Декартовом координатном систему који превазилази типичне изазове у контроли крутости у Декартовом координатном систему, као што су процена крутости, знање о могућем опсегу крутости, формулисање квантитативних индикатора у матрици крутости у Декартовом координатном систему и потреба за коришћење сензора за силу/момент. Предложени приступ користи геометријску репрезентацију крутости у Декартовом координатном систему и користи методе оптимизације за обликовање крутости у Декартовом координатном систему дуж оса које су битне за предефинисане задатке и командоване трајекторије робота. Предложена методологија, доприноси кориснички оријентисаном планирању и дефинисању крутости и дефинисању жељеног понашања робота у типичним задацима интеракције (монтажа, убацивање, сечење, бушење, итд). Алгоритам оптимизације представљен у дисертацији, за обликовање крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему користи *SLSQP* технику како би осигурао ефикасност при решавању нелинеарних проблема оптимизације. Стога је представљена методологија општа и применљива на различите роботске системе. Додатно, представљени алгоритам омогућава интуитивнији приступ извршавању роботских задатака са побољшаном ефикасношћу и поузданошћу у раду у неструктурираним окружењима или током деловања поремећаја при извршавању задатака. Својства алгоритма и главни бенефити предложеног приступа експериментално су демонстрирани на два репрезентативна контактна задатка - провлачење шрафа кроз алуминијумски профил и сечење. Предложена методологија може се применити на широк спектар задатака у којима перформансе зависе од механичке интеракције између робота и његовог окружења.

Ради омогућавања безбедне и ефикасне интеракције и код најновијих типова робота који користе актуаторе са променљивом крутошћу, у дисертацији се предлаже у потреба алгоритама машинског учења са особинама итеративног учења, као што је локално пондерисана пројекциона регресија (*LWPR*). Предложеним приступом извршено је моделовање актуатора променљиве крутости у бидирекционој антагонистичкој конфигурацији. Потом су искоришћене особине итеративног учења како би се извршила поправка наученог модела током процеса експлоатације. Потребе за додатним обучавањем модела актуатора променљиве крутости проистиче из могућности еластичног елемента да промени своје параметре услед експлоатације или хабања актуатора током времена. Коришћењем симулираног и реалног актуатора променљиве крутости (*QB Advanced Pro*) у дисертацији је извршена евалуација перформанси научених модела на бази *LWPR* алгорита. Специфична реализација *SLSQP* оптимизација се и код робота погоњених актуаторима променљиве крутости показала као ефикасан алат за одређивање оптималне конфигурације робота и крутости на нивоу зглоба робота како би остварила задату крутост завршног уређаја у Декартовом координатном систему. Перформансе управљања робота погоњеног актуаторима променљиве крутости експериментално су верификоване на планарном роботу са четири степена слободе у присуству случајно генерисаних пертурбација, где је за изазивање пертурбација коришћен *Franka Emika Panda* колаборативни робот опремљен сензором силе и момента.

### 3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат, мастер инжењер електротехнике и рачунарства Никола Кнежевић, показао је све особине неопходне за самосталан научно-истраживачки рад. У прилог томе сведочи да је до сада објавио 19 научно-стручних радова, од чега 4 публикована у међународним часописима са импакт фактором, где је на два рада првопотписани аутор.

Начин на који је написана докторска дисертација и научни доприноси који су у њој представљени потврђују спремност кандидат за самосталан научно-истраживачки рад, почевши од систематичног прегледа доступне литературе, преко уочавања недостатака и ограничења предложених методологија, до развијене структуре и придружене методологије за унапређење уочених недостатака у пољу безбедне и ефикасне интеракције робота са човеком и окружењем. Научни рад кандидата одликује темељан и систематичан приступ решавању научних проблема.

## **4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС**

### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

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.
- Развој нових алгоритама за управљање роботима у задацима физичке интеракције заснованих на нивоу контроле момента и/или крутости зглоба робота и реконфигурацијом робота.
- Развој техника управљања крутости завршног уређаја у Декартовом систему дуж оса примарних за ефикасније и безбедније извођење типичних индустријских за- датака.

- Реализација алгорита машинског учења за обучавање модела актуатора променљиве крутости као и итеративног алгорита за компензацију несавршености које настају услед експлоатације актуатора.
- Реализација система за естимацију крутости завршног уређаја у Декартовом - координатном систему.

#### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Остварени научни доприноси представљају унапређења научних знања у поређењу са постојећим стањем на следећи начин:

- Представљена неуроергономска станица омогућава природнији и безбеднији рад човека приликом мануелних задатака склапања водећи рачуна о психо-физичким стањима човека, повећавајући задовољство радника али и перформанси процеса.
- Развијени алгоритми за контролу крутости завршног уређаја робота у Декартовом координатном систему у физичкој интеракцији коришћењем модулације крутости на нивоу зглоба робота и реконфигурације доприносе свеопштем прихватању робота у човековој околини јер промовишу безбедну и ефикасну интеракцију. Такође, доприносе коришћењу колаборативних робота код необучених радника јер омогућавају подешавање крутости на нивоу завршног уређаја без потребе за познавањем међусобних утицаја компонената матрице крутости ако и могуће остваривих вредности у матрици крутости.
- Реализовани алгоритми машинског и итеративног учења доприносе једноставнијем и бољем моделовању актуатора променљиве крутости узимајући у обзир асиметрије у самом актуатору, нелинеарности настале услед коришћења еластичног елемента као и трења и несавршености настале током периода експлоатације.
- Кроз реализован систем за естимацију крутости завршног уређаја у Декартовом координатном систему омогућена је евалуација особина робота остварена развијеним алгоритмима за обликовање крутости завршног уређаја робота.

#### 4.3. Верификација научних доприноса

Списак радова у којима је публикован део резултата истраживања у оквиру докторске дисертације кандидата Никола Кнежевића дат је у наставку:

##### Категорија M22:

– **Knežević, N**, Lukić, B, Petrič, T, Jovanović K, A Geometric Approach to Task- -Specific Cartesian Stiffness Shaping. Journal of Intelligent & Robotic Systems 110, 14 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10846-023-02035-6>

– **Knežević, N**, Petrović M, Jovanović K, Cartesian Stiffness Shaping of Compliant Robots- Incremental Learning and Optimization Based on Sequential Quadratic Programming. Actuators 13, no. 1:32 (2024). <https://doi.org/10.3390/act13010032>

##### Категорија M53:

– **Knežević, N**, Lukić, B, Jovanović K, Žlajpah L, Petrič, T, Endeffector Cartesian Stiffness Shaping - Sequential Least Squares Programming Approach. Serbian Journal of Electrical Engineering 18, 1 (2021). <https://doi.org/10.2298/SJEE2101001K>

##### Категорија M33:

– Lukić, B, **Knežević, N**, Jovanović K, Robot's Cartesian Stiffness Adjustment Through the Stiffness Ellipsoid Shaping. Advances in Service and Industrial Robotics - Proceedings of the

32nd International Conference on Robotics in Alpe-Adria Danube Region (RAAD 2023). pp. 289 - 296. Springer. Bled. Slovenia. (2023).

– **Knežević, N**, Trumić M, Fagiolini A, Jovanović K, Input-Observer-Based Estimation of the External Torque for Single-Link Flexible-Joint Robots. Advances in Service and Industrial Robotics - Proceedings of the 32nd International Conference on Robotics in Alpe-Adria Danube Region (RAAD 2023). pp. 97 - 105. Springer. Bled. Slovenia. (2023).

– Rodić J, Golubović D, **Knežević N**, Jovanović K, Natural Non-Invasive Human-Machine Interface Based on Hand Gesture Recognition. Proceedings of the 9th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN 2017). Društvo za ETRAN. (2022).

– Lukić B, Jovanović K, **Knežević N**, Žlajpah L, Petrič T, 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).

– **Knežević N**, Lukić B, Jovanović K, 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).

– **Knežević N**, Lukić N, Jovanović K, Petrič T, Žlajpah L, End-Effector Cartesian Stiffness Optimization: Sequential Quadrating Programming Approach. Proceedings of (Ic)ETRAN 2019 6th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering. ETRAN Society. Belgrade. Academic Mind. Belgrade. Srebrno Jezero. Srbija. Srebrno Jezero. Jun, (2019).

#### Категорија M63:

– Klasanović D, Jugović L, **Knežević N**, Realization and Model Identification of Variable Stiffness Actuator Based on Torsion Spring. Proceedings of the 10th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN 2017). Društvo za ETRAN. (2023).

– **Knežević, N**, Lukić, B, Jovanović K, Upravljanje Pasivnom Krutošću Završnog Uređaja Robota Oblikovanjem Elipsoida Krutosti. LXVI konferencija ETRAN. pp. 672-677. Društvo za ETRAN. Novi Pazar. Jun. (2022).

## 5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертације кандидата Николе Кнежевића под насловом „Управљање робота у физичкој интеракцији са околином и сарадњи са човеком засновано на техникама учења и оптимизације“ у целини је написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме и испуњава све суштинске и формалне услове предвиђене Законом о високом образовању, као и прописима Универзитета у Београду и Електротехничког факултета.


У предметној докторској дисертацији приказана су решења у оквиру Индустрије 5.0 која ставља човека у центар производног процеса. Приказана је архитектура неуроергономске радне са пет модула (процена физичког и менталног стања, физичка, нефизичка, и стратешка подршка) за повећање продуктивности уз смањење менталног оптерећења. Даља унапређења ефикасности и безбедности колаборативног рада робота и човека су приказана кроз новоразвијени алгоритам обликовања крутости завршног уређаја. Приказана је геометријска интерпретација у виду елипсоида крутости као интуитивнијег начина презентације и задавања матрице крутости од стране човека. Алгоритам је базиран на секвенцијалном квадратном програмирању погодном за нелинеарне проблеме. Како би развијене методе управљања интеракцијом биле применљиве и на најновију генерацију колаборативних робота са актуаторима променљиве крутости, предлаже се употреба


машинског учења са итеративним особинама за моделовање таквих актуатора. Коришћен је алгоритам заснован на регресији за учење модела уз присуство несиметрије и трења, док су особине инкременталног учења искоришћене за праћење параметра еластичног елемента услед експлоатације. Перформансе управљања робота погоњеног актуаторима променљиве крутости експериментално су верификоване на роботу са четири степена слободe и бидирекционим антагонистичким погонима у присуству случајно генерисаних пертурбација, где је за изазивање пертурбација коришћен колаборативни робот и сензор силе и момента.

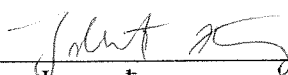
Докторска дисертација кандидата Николе Кнежевића представља резултат његовог вишегодишњег истраживачког рада у области роботике. Научне доприносе који представљају резултат истраживања у оквиру дисертације кандидат је публиковао у међународним часописима, међународним и домаћим конференцијама. На основу увида у докторску дисертацију и објављене радове, Комисија са задовољством предлаже Научно-наставном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да се докторска дисертација под називом „Управљање робота у физичкој интеракцији са околином и сарадњи са човеком засновано на техникама учења и оптимизације“ кандидата Николе Кнежевића прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.


У Београду 30.05.2024. године.


#### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

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

  
др Арсо Вукићевић, доцент  
Универзитет у Крагујевцу – Факултет инжењерских наука

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

  
др Александра Крстић, ванредни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

  
др Андреј Савић, виши научни сарадник  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет