

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата **Завише Гордића**

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета Универзитета у Београду бр. 1637 од 18.11.2022. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата **Завише Гордића** под насловом

„Detection of Interaction Forces in Industrial Robotics”

односно на српском:

„Детекција сила интеракције у индустријској роботизици”

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

Завиша Гордић је уписао докторске академске студије Електротехнике и рачунарства, модул Управљање системима и обрада сигнала, на Електротехничком факултету у Београду, школске 2013/2014. године. Све испите је успешно положио и испунио наставне обавезе, чиме је стекао право на подношење докторске дисертације на преглед и оцену.

На основу члана 101. Статута Универзитета у Београду, члана 74. Статута Универзитета у Београду – Електротехничког факултета и захтева студента (у даљем тексту Кандидата), одобрено је продужење рока за завршетак студија до истека троструког броја школских година потребних за реализацију уписаног студијског програма. Кандидат је имао статус мировања у школској 2019/2020 години.

Кандидат је 22.11.2021. године пријавио тему докторске дисертације.

Комисија за студије трећег степена је на седници одржаној 08.03.2022. године разматрала предлог теме за израду докторске дисертације и упутила Наставно-Научног већу предлог за именовање Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације.

Наставно-научно веће је на 871. Седници (одржаној 15.03.2022. године), одлуком бр. 5038/13-1 од 25.03.2022. године именовало Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације у саставу:

1. др Жељко Ђуровић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

2. др Александар Родић, научни саветник, Универзитет у Београду – Институт Михајло Пупин
3. др Ненад Јовичић, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет.

За ментора докторске дисертације именован је др Коста Јовановић, ванредни професор.

Завиша Гордић је полагао јавну усмену одбрану теме докторске дисертације 05.04.2022. године.

Наставно-научно веће је 17.05.2022. године усвојило Извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације.

Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду, на седници одржаној 06.06.2022. године, донело је одлуку којом се даје сагласност на предлог теме докторске дисертације Завише Гордића, под насловом „Detection of Interaction Forces in Industrial Robotics”, односно на српском „Детекција сила интеракције у индустријској роботизици” (Одлука бр. 61206-2/2-22 од 06.06.2022. године).

Кандидат Завиша Гордић је 27.10.2022. године предао докторску дисертацију на преглед и оцену.

Комисија за студије трећег степена је на седници одржаној 01.11.2022. године потврдила испуњеност потребних услова за подношење предлога Наставно-научном већу за формирање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације.

Наставно-научно веће Електротехничког факултета је на 879. Седници одржаној 08.11.2022. године именовало Комисију за преглед и оцену докторске дисертације (Одлука бр. 1637 од 18.11.2022. године) у саставу:

1. др Коста Јовановић, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
2. др Жељко Ђуровић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
3. др Александар Родић, научни саветник, Универзитет у Београду – Институт Михајло Пупин

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација припада научној области Електротехнике и рачунарства, ужој научној области Аутоматика за коју је матичан Електротехнички факултет Универзитета у Београду. У ужем смислу теме, дисертација припада области индустријска роботика.

Ментор докторске дисертације је др Коста Јовановић, ванредни професор. Ментор има вишегодишње истраживачко и наставно искуство везано за научне области којима припада докторска дисертација кандидата. Аутор је великог броја радова у истакнутим међународним часописима.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Завиша Гордић је рођен 3.8.1989. године у Ужицу. Основну школу и гимназију је завршио у Ужицу. На природно-математичком смеру у гимназији је изабран за ђака генерације. Основне академске студије уписао је 2008. године на Електротехничком факултету у Београду. На Одсеку за сигнале и системе дипломирао је 2012. године на тему „Примена метода четворостепене струјне комутације код матричног претварача” и просечном оценом 9,13. Мастер студије на Електротехничком факултету у Београду, на модулу Сигнали и системи, уписао је 2012. године, а 2013. одбранио мастер рад на тему „Моделирање и регулација система за аутоматско руковање возилима” са просечном оценом 10,00. Докторске академске студије уписао је 2013. године на Електротехничком факултету у

Београду на модулу Управљање системима и обрада сигнала. Све испите на докторским академским студијама завршио је са просечном оценом 10,00. Ужа област рада и истраживања Кандидата је везана за калибрацију индустријских робота и њихових алата, повећање безбедности у раду са роботима коришћењем алгоритама за детекцију судара, одређивања кинематичких параметара робота, као и области везане за сарадњу човека и индустријског робота у смислу олакшаног програмирања, управљања и коришћења.

Од 2014. године запослен је као истраживач приправник на Електротехничком факултету на пројекту Министарства просвете, науке и технолошког развоја под називом „Истраживање и развој амбијентално интелигентних сервисних робота антропоморфних карактеристика”. Кандидатак је 2015. године изабран за истраживача сарадника. Завршио је основну и напредну обуку за коришћење *Denso* индустријских робота 2015. године у Немачкој. У августу 2016. године учествовао је на летњој школи роботике „*IS3 HRC 2016: Italian-Serbian Summer School on Human-Robot Coworking – Master Classes on Human-Robot Coworking and Advanced Robot Grasping*”, одржане на Машинском факултету у Београду.

Током истраживачког ангажмана на Електротехничком факултету, радио је на више научних и развојних технолошких пројеката из области роботике на којима спроводи наведена истраживања, од којих се могу издвојити:

- *DIH² - A Pan European Network of Robotics DIHs for Agile Production* (H2020 од 2018.) – ангажован у својству *Local Evangelist in Robotics (LER)*, ментора и оцењивача интеграције нових роботизованих система и дигиталних платформи за ефикасније праћење података система на експериментима:
 - *Agile Robotized Processing (ARP)* – Србија,
 - *High Flexible Welding Cell (HWFlexCell)* – Данска/Литванија,
 - *Agile and Adaptable Cobic System (A2CS)* – Финска,
 - *Work-Whispers (W2)* – Белгија,
 - *From Job Shop towards Smart Factory (JS2SF)* – Белгија,
 - *Fiware Ready Quality Control for Packaging Systems in the Food Industry (FIREFIT)* – Португалија.
- *BOWI - Boosting Widening DIgital Innovation Hubs - for robotics and embedded systems* (H2020 од 2021.) – координатор и ментор при интеграцији нових технологија и иновативних решења у области дигитализације, вештачке интелигенције и роботике на експериментима:
 - *Beehold - Beekeepers digital assistant,*
 - *Strawbery energy - Strawberry Outdoor Sensors,*
 - *Bitgear Wireless Design Services - IO-Eye experiment,*
 - *Atfield Technologies – MONOLITH.*
- *BrainWatch for increased productivity with improved workers satisfaction -* (H2020 cascading - SHOP4CF project – 2021.-2022.);
- *Reconfigurable Assembly of Airport Signalization Lights* (H2020 – *ReconCell* – 2017.-2018.);
- *FS4SMIH - Feasibility Study for Serbian Manufacturing Innovation Hub* (H2020 – *ReconCell* – 2016.-2017.);
- Истраживање и развој амбијентално интелигентних сервисних робота антропоморфних карактеристика (Министарство просвете, науке и технолошког развоја – 2020.);

Добитник је следећих награда, признања и стипендија:

- 2017: Најбољи рад у секцији на конференцији ICETTRAN 2017 за рад „*Partial Pose Measurements for Identification of Denavit-Hartenberg Parameters of an Industrial Robot*”.
- 2015: Најбољи рад у секцији на конференцији ICETTRAN 2015 за рад „*Robot Tool Centre Point Calibration using Analysis of Images from Orthogonal Planes*”.
- 2013: Добитник стипендије програма немачке привреде „Др Зоран Ђинђић” са Одбором немачке привреде за источну Европу (ОА), Савезним Министарством за економску сарадњу и развој (BMZ) и Немачком развојном агенцијом (GIZ).
- 2012: Добитник праксе програма IAESTE (*International Association for the Exchange of Students for Technical Experience*).

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација по форми и структури потпуно одговара Упутству за обликовање докторске дисертације Универзитета у Београду. Писана је на енглеском језику и садржи укупно 101 страну, укључујући и странице које нису нумерисане. Делови/елементи дисертације су:

- Насловна страница на енглеском језику
- Насловна страница на српском језику
- Страница са информацијама о ментору и члановима комисије
- Захвалница
- Странице са подацима о докторској дисертацији на енглеском језику
- Странице са подацима о докторској дисертацији на српском језику
- Садржај
- Текст рада по поглављима
- Литература
- Биографија аутора
- Изјава о ауторству
- Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада
- Изјава о коришћењу.

Дисертација садржи 51 слику и 6 табела.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Дисертација је подељена у пет поглавља.

Прво поглавље служи као увод у тематику којом се бави истраживање представљено у дисертацији, описује мотивацију за истраживање у датој области као и преглед главних доприноса и структуру дисертације. У уводном делу је наведено да се, у складу са принципима Индустије 4.0, све чешће захтева дељење радног простора између човека и робота, као и да је неопходно омогућити праћење контекста рада робота. Запажено је да индустријски роботи нису својим дизајном прилагођени таквим захтевима, као и да колаборативни роботи, који су замишљени као одговор на захтеве за дељењем радног простора, у већини случајева нису оптимално решење по питању производних перформанси и ефикасности. Као мотивација за истраживање је наведена намера да се индустријским

роботима омогући детекција интеракције са њиховим окружењем током обављања контактних задатака, како би се омогућила њихова еволуција у складу са савременим производним трендовима. У том циљу, наведено је да је детекција интеракција са окружењем потребна ради повећања безбедности у раду са роботом путем детекције потенцијалних судара, али и да је детекција жељених интеракција од подједнаког значаја за разумевање контекста рада робота. Остваривање наведеног је пре свега усмерено на реализације на индустријским роботима са затвореном управљачком архитектуром. У оквиру првог поглавља описани су и доприноси дисертације који су подељени у две целине, од којих је једна везана за детекцију интеракције и безбедност у раду са роботом, а друга се односи на идентификацију кинематичких параметара робота, што је и поткрепљено прегледом релевантних радова. Поглавље се завршава описом структуре дисертације.

Друго поглавље се састоји из две целине. Прва од њих описује постојеће приступе у детекцији интеракције робота и њихову основну поделу на приступе засноване на моделу робота и приступе који не захтевају модел, уз навођење и треће категорије која подразумева комбинацију прве две категорије. Наведено је да су приступи засновани на моделу далеко заступљенији у научној заједници уз опис предности и недостатака таквих приступа. Описани су и приступи који нису засновани на моделу робота, као и предности и недостаци који су везани за њих. Опредељење за приступе који не захтевају модел робота је оправдано њиховом особином да укључују све чиниоце који указују на интеракцију са окружењем, као и њиховом далеко већом употребном вредношћу. Закључено је да би комбиновани приступ могао да надомести појединачне недостатке претходна два приступа, и наведено да ће његови домети такође бити испитани у оквиру дисертације. Друга целина представља анализу доступних мерних сигнала и испитује њихове особине које су употребљиве са становишта детекције интеракције. Наведено је да су, на основу статистичке обрада сигнала и разматрања везаних за њихову доступност, донесени закључци који ће се користити при развоју алгоритама за детекцију интеракције.

Треће поглавље је посвећено детекцији интеракције у задацима током којих се кретање робота понавља на истоветан начин у циклусима. Наведено је да се сви алгоритми детекције заснивају на поређењу референтних вредности снимљених током репрезентативног циклуса покрета са мерењима добијеним током рада у свим наредним циклусима. Први представљени алгоритам је намењен за интеграцију на самом контролеру робота како би се смањило време реакције на судар и како би се омогућила примена на старијим генерацијама робота. Наведени су и дискутовани експериментални резултати добијени са индустријског робота, као и предности и недостаци описаног алгоритма. Други представљени приступ детекцији интеракције, је алгоритам који је намењен за примену на рачунару повезаном са роботом. За потребе овог приступа развијена је модификација *Dynamic Time Warping* алгоритма (*mDTW*), која омогућава проналажење и поређење најсличнијих делова сигнала. Наведеном изменом је превазиђена главна препрека везана за детекцију која је узрокована неуједначеним узорковањем сигнала, и омогућена примена у реалном времену. За потребе детекције судара представљена су два правила одлучивања, од којих се једно заснива на апсолутној разлици узорака, а друго на анализи сопствених вредности упарених одбирака сигнала. Експериментални резултати добијени са две индустријска робота су представљени и дискутовани уз закључке о предностима и манам описаног приступа. У трећој целини трећег поглавља разматрана је употреба другог описаног алгоритма за детекцију жељених интеракција у комбинацији са методом која је заснована на моделу робота. Разматрани су експериментални резултати из репрезентативних примера манипулације теретом и контактних задатака везаних са различите врсте склапања, уз поређење са одступањима која настају као последица судара. Закључено је да је детекција жељне интеракције могућа за поједине врсте контактних задатака, као и да се применом овог приступа могу отклонити главни недостаци алгоритама везаних за модел робота.

Четврто поглавље описује истраживање и резултате усмерене на детекцију интеракције у задацима који подразумевају сличну врсту, а али не и истоветне покрете, чиме

се отклања највећи недостатак претходно представљених алгоритама. Ради постизања наведеног циља, закључено је да је неопходно укључивање параметара који описују просторне односе између зглобова робота, односно кинематичких параметара. Описан је принцип на основу кога се додавањем кинематичких параметара у претходно развијену модификацију *Dynamic Time Warping (mDTW)* алгорита омогућава поређење мерења из различитих покрета, а који је заснован на пројекцији сила интеракције на зглобове робота. Након описа принципа рада, најпре је описан алгоритам за идентификују кинематички параметара тела робота произвољне конфигурације праћењем позиција тачке од интереса на завршном уређају робота. Наведени алгоритам омогућава добијање *Denavit-Hartenberg (DH)* параметара на основу само три мерења позиције жељене тачке по зглобу и потпуно аутоматизовану имплементацију. У оквиру ове целине, наведени су израчунати кинематички параметри за робота који је коришћен током тестирања. Наредна целина описује идентификацију кинематичких параметара алата, односно завршног уређаја робота на основу анализе слика из две ортогоналне равни. Описана је процедура и формуле којима се компензује ремећење перспективе камере и на основу којих могу да се поуздано одреде жељени параметри. Описана је структура развијеног уређаја за одређивање параметара алата, као и процедура којом је могуће да се на аутоматизован начин добију параметри алата. Поред тога, описана је и процедура којом се током рада робота периодично проверава тачност кинематичких параметара алата, као и њихова реконструкција у случају судара. У наредној целини уведен је појам еквивалентног крака силе, уз опис његовог израчунавања на основу кинематичких параметара робота и алата. Описана је даља модификација *Dynamic Time Warping* која се заснива на увођењу крака силе у *mDTW*, чиме се добија кинематички побољшани алгоритам *Kinematically Augmented mDTW (KA-mDTW)*. Коришћењем *KA-mDTW* омогућено је поређење сигнала насталих при различитим просторним конфигурацијама зглобова робота, чиме је омогућена детекција интеракције при вршењу покрета сличне природе, чиме је проширено поље примене алгорита. Експериментални резултати добијени са робота су представљени и дискутовани уз закључке.

Пето поглавље представља сумиране резултате и закључке из претходних поглавља докторске дисертације.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Дисертација се бави развојем алгоритама за индустријске роботе намењених за детекцију интеракције, а којима се омогућује њихов даљи развој и олакшава интеграција у савремена и будућа производна окружења. Наведена тематика је у складу са најсавременијим трендовима у области флексибилне производње и постулата Индустрије 4.0 којима се захтева дељење радног простора робота и човека и којима се може остварити размена података намењена разумевању оперативног контекста рада робота и правременог откривања нежељених стања.

Алгоритмима за детекцију интеракције је пре свега повећана безбедност радника на основном нивоу заштите при раду у дељеном радном простору између човека и робота. Овај ниво заштите је неопходан корак при интеграцији виших нивоа заштите са циљем успостављања радног окружења у коме робот и човек могу да раде на истом задатку и у исто време. У том циљу, у дисертацији су предложени алгоритми за детекцију интеракције са више различитих приступа. Први приступ омогућава интеграцију на самом контролеру рачунара који има затворену управљачку архитектуру контролера, што је изузетно редак, ако не и јединствен пример успешне реализације која не подразумева познавање динамичког модела робота.

Други приказан алгоритам се ослања на развијени *mDTW* алгоритам који на оригиналан начин омогућава примену *Dynamic Time Warping (DTW)* принципа у реалном времену и то за секвенце сигнала које имају различиту садржину и дужину. Оваква измена изворног *DTW* алгоритма и његова примена на пољу детекције интеракције на индустријским роботима до сада није виђена и омогућава примену савремених критеријума детекције интеракција захваљујући иновативном приступу неуједначеног одабирања мерних сигнала. Имплементирана правила одлучивања су развијена за конкретне потребе детекције, али *mDTW* као платформа омогућава и примену других, савременијих и софистициранијих критеријума и правила детекције.

Приступ детекцији заснован на развијеном и описаном *KA-mDTW* алгоритму значајно проширује поље примене *mDTW* алгоритма кроз иновативно укључивање кинематичких параметара робота у матрицу на основу које се одређују оптимални парови одбирака поређених сигнала. Оригиналним увођењем величине еквивалентног крака силе којим се у *mDTW* уноси информација о пројекцијама сила интеракције на поједине зглобове у зависности од просторне конфигурације зглобова робота. Новодобијеним *KA-mDTW* алгоритмом је омогућена примена приступа детекцији која је у потпуности применљива на произвољној конфигурацији индустријског робота независно од генерације и произвођача, као и платформе на којој се имплементира.

Ради идентификације кинематичких *Denavit-Hartenberg (DH)* параметара робота и завршног уређаја развијена су два алгоритма. Први алгоритам се користи за идентификацију параметара тела робота од базе до прирубнице и даје могућност примене у веома рестриктивним окружењима јер на иновативан начин користи мерења само три тачке од интереса по зглобу. Други алгоритам користи иновативан приступ одређивању параметара завршног уређаја заснован на анализи слика из две ортогоналне равни. Принцип је у потпуности оригиналан и ослања се на иновативна инжењерска решења и геометријске трансформације како би компензовао изобличену перспективу слике и омогућио аутоматизовану процедуру за калибрацију, односно одређивање кинематичких параметара завршног уређаја робота. Додатно, иако су оба алгоритма осмишљена да идентификују параметре у *DH* нотацији, могуће их је прилагодити и другим нотацијама.

Свеукупна садржина дисертације може да се посматра и из угла осавремењавања индустријских робота и чињенице да је без измена на хардверу и додавања додатних уређаја на робота омогућен приступ многобројним корисним информацијама везаним за рад робота. Додатна оригинална вредност целокупне дисертације јесте да се правилним тумачењем информација добијених од новоразвијених алгоритма могу разумети услови под којима робот ради, задаци које обавља као и правилности њиховог извођења. Наведено је изузетно важно са становишта Индустрије 4.0 у којој је међусобна повезаност производних чинилаца и размена информација од кључног значаја за оптимизацију производње.

Опште запажање јесте да је дисертација у складу са савременим трендовима индустријске роботике и да садржи низ оригиналних решења која су експериментално верификована.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У дисертацији је анализирана обимна релевантна литература, почевши од полазних радова везаних за детекцију судара, безбедну интеракцију и моделовање робота, до најновијих резултата из поменутих области публикованих у престижним међународним часописима и зборницима радова са конференција. Сви кључни делови дисертације су поткрепљени референцама, што упућује на закључак да је кандидат детаљно проучио актуелна сазнања предметних области истраживања.

Наведено је укупно 75 библиографских референци. Преко 30% референци чине радови објављени у последњих пет година. Такође, преко 50% референци чине часописни радови.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У докторској дисертацији су коришћене актуелне инжењерске и научне методе, које укључују:

- Проучавање и анализу доступне литературе и научних радова који се тичу детекције судара и интеракције са окружењем.
- Проучавање и анализу доступне литературе и научних радова који се тичу одређивања параметара робота и завршног уређаја.
- Проучавање и анализу доступне литературе и научних радова који се тичу безбедности у раду са роботом.
- Коришћење индустријских робота за снимање релевантних сигнала ради *off-line* анализе.
- Употребу софтвера Матлаб за статистичку обраду и анализу снимљених сигнала са индустријског робота.
- Употребу софтвера Матлаб за одређивање правила одлучивања и постављања прагова детекције интеракције.
- Употребу софтвера Матлаб за имплементацију критеријума детекције интеракције за *hardware-in-loop* имплементацију са роботом.
- Примену развијених алгоритама за детекцију интеракције (заснованих на принципима *mDTW*, *KA-mDTW*) на индустријском роботу.
- Развој и имплементацију алгоритама за идентификацију кинематичких параметара тела индустријског робота у софтверу Матлаб.
- Развој и имплементацију алгоритама за компензацију изобличења перспективе и међусобно одређивање положаја робота и система за калибрацију завршног уређаја на индустријском рачунару.

3.4. Применљивост остварених резултата

Дисертација је посвећена развоју алгоритама намењених за примену на индустријским роботима ради омогућавања детекције интеракције са окружењем и повећања безбедности радника у њиховом окружењу. Као таква, посвећена је развоју алгоритама за детекцију интеракције и идентификацију кинематичких параметара робота и завршног уређаја и њиховој интеграцији на индустријским роботима са затвореном архитектуром контролера, што је веома актуална тема у савременој и будућој индустријској роботизици. Развијени и описани алгоритми су у складу са тежњама да се омогући дељење радног простора човека и робота, као и да се омогући флексибилна аутоматизација и међусобна повезаност елемената индустријског радног окружења.

Са становишта детекције интеракције, сви развијени алгоритми су од почетка разматрани са становишта применљивости и као такви су додатно практично тестирани на правим индустријским роботима различитих произвођача. Резултати тестирања указују на високу употребну вредност алгоритама за детекцију интеракције и њихову применљивост у производном окружењу, као и на различитим конфигурацијама индустријских робота. Поред тога, развијени алгоритми су употребљиви и за потребе откривања нежељених стања као и општег оперативног контекста робота што је веома пожељно и употребљиво са становишта постулата Индустрије 4.0 и 5.0. Развијени *mDTW* и *KA-mDTW* алгоритми представљају универзалну платформу на којој је омогућена реализација различитих критеријума детекције интеракције и остављају могућност за примену другачијих приступа детекцији интеракције. Алгоритми су применљиви на различитим платформама, што им омогућава да се прилагоде конкретним потребама окружења и робота за које су намењени, као да могу да се даље усавршавају и прате развој хардверских уређаја уз висок ниво аутоматизације ради лакше примене и интеграције.

Алгоритам за идентификацију кинематичких ДН параметара робота је у потпуности применљив на различитим конфигурацијама робота на начин који је описан у оквиру дисертације, али оставља и могућност интеграције са спољашњим мерним уређајима. Додатно, развијени алгоритам и калибрациони уређај који се користи за идентификацију кинематичких параметара алата већ је успешно тестиран у производњи. Алгоритам је аутоматизован у највећој могућој мери и може да се користи независно од свих осталих алгоритама. Развијена брза провера калибрираности завршног уређаја независно може да се користи као показатељ судара или неког другог нежељеног стања и тиме укаже на проблем у производњи и драстично смањи губитке у аутоматизованом окружењу.

Општи закључак је да су доприноси дисертације веома применљиви у савременим окружењима робота за које су намењени, али да имају и шире могућности примене у контексту савремених и будућих производних окружења.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Комисија је стекла увид у резултате досадашњег научно-истраживачког рада Завише Гордића и констатовала да је именовани:

- Положио све испите и завршио све обавезе предвиђене наставним планом и програмом докторских академских студија.
- Јавно одбранио тему докторске дисертације 05.04.2022. године пред Комисијом формираном од стране Наставно-научног већа Електротехничког факултета у Београду.
- Публиковао више значајних радова у међународним и домаћим научним часописима као и у зборницима међународних и домаћих научних скупова из области којима припада предложена тема докторске дисертације.
- Стекао вишегодишње искуство у истраживању области коју покрива тема докторске дисертације кроз интензиван ангажман на пројектима у области роботике Електротехничког факултета, али и директном сарадњом са индустријом.

На основу изнетог Комисија сматра да Завиша Гордић у сваком погледу испуњава услове, спреман је и способан за самосталан научни рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Научни доприноси који су резултат истраживања обухваћеног дисертацијом могу да се поделе у две главне категорије:

Прва категорија доприноса се односи на детекцију интеракције и безбедност при дељењу радног простора човека и робота. У оквиру ове категорије постоје две групе сродних доприноса:

1. Детекција интеракција заснована на принципима и модификацијама *Dynamic Time Warping* метода. Доприноси из ове групе су поткрепљени радовима у часописима и зборницима са научних скупова: [1], [2], [4], [5], [7];
2. Препознавање судара и мере безбедности примењене на индустријским роботима са затвореном управљачком архитектуром. Доприноси из ове групе су поткрепљени радовима у часописима и зборницима са научних скупова: [1], [2], [4], [5], [6], [7], [9];

Друга категорија доприноса се односи на идентификацију кинематичких параметара робота. У зависности од намене, ова категорија може да се подели на две групе доприноса:

3. Идентификација кинематичких параметара тела робота заснована на мерењима позиције тачке од интереса на завршном уређају робота. Доприноси из ове групе су поткрепљени радовима у часописима и зборницима са научних скупова: [8], [11];
4. Идентификација кинематичких параметара завршног уређаја робота заснована на анализи слика из две ортогоналне равни. Доприноси из ове групе су поткрепљени радовима у часописима и зборницима са научних скупова: [3], [10], [11], [12].

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Са становишта детекције интеракције робота са окружењем, представљени доприноси припадају реткој категорији приступа детекције који нису засновани на динамичком моделу робота. Имајући то у виду, доприноси који се заснивају на принципима *Dynamic Time Warping (DTW)* својим изменама омогућавају оригиналну и нову примену овог приступа на индустријским роботима. Модификације поменутог приступа у облику представљеног *mDTW* алгоритма омогућавају ефикасно превазилажење проблема са неуједначеном учестаношћу одабирања мерних сигнала захваљујући новоразвијеној могућности поређења сигнала различите садржине. Овај приступ је карактеристичан по томе што омогућава да се један сигнал пореди са најсличнијим делом другог сигнала, што за разлику од других доступних алгорита заснованих на *DTW* принципу омогућава примену у области детекције интеракције. *KA-mDTW*, као даље унапређење развијеног алгоритма засновано на увођењу кинематичких параметара у матрицу на основу које се рачунају оптимално упарени парови поређених сигнала омогућава примену принципа *mDTW*-а у другачијим просторним конфигурацијама зглобова и сегмената робота. Овим доприносом је далеко проширено поље примене наведеног *mDTW* алгоритма, и тиме је на веома иновативан и оригиналан начин омогућена ефикасна и поуздана детекција интеракције приликом вршења исте врсте покрета.

Остали доприноси из категорије детекције интеракције дају нови увид у утицај немоделоване динамике на квалитет детекције, и предлажу иновативне приступе за превазилажење њиховог негативног утицаја на поузданост. Поред тога, развијени су и алгоритми који на ефикасан и практичан начин омогућавају превазилажење проблема са неуједначеним узорковањем мерних сигнала и имплементацију на контролеру индустријског робота.

Додатно, у дисертацији су на иновативан начин разматране и могућности развијања хибридног приступа детекцији, у коме би се користили и принципи детекције засноване на моделу, чиме би се превазишли главни недостаци овог приступа.

Са становишта идентификације кинематичких параметара тела робота, предложен је иновативан приступ рачунању параметара коришћењем само три мерења позиције тачке од интереса по зглобу робота. Овај приступ представља значајно унапређење у погледу применљивости у стварном окружењу робота и универзалности мерних уређаја.

Алгоритам за идентификацију параметара завршног уређаја се ослања на потпуно нов приступ рачунању параметара, и даје оригиналне доприносе на пољу компензације изобличења перспективе, као и практичне доприносе везане за аутоматизацију целокупне процедуре.

4.3. Верификација научних доприноса

Резултати научног рада и истраживања верификовани су у следећим научним часописима и зборницима са научних скупова:

Категорија M21 – Рад у врхунском међународном часопису:

1. **Z. Gordić, K. Jovanović:** A Framework for Inclusion of Unmodelled Contact Tasks Dynamics in Industrial Robotics, *Sensors (ISSN: 1424-8220)*, Vol. 22, No. 19, pp. 1-19, Nov, 2022., doi: 10.3390/s22197650 (ИФ2021= 3.847)

Категорија М23 – Рад у међународном часопису:

2. **Z. Gordić**, K. Jovanović: Collision Detection on Industrial Robots in Repetitive Tasks Using Modified Dynamic Time Warping, *Robotica (ISSN: 0263-5747)*, Vol. 38, No. 10, pp. 1717-1736, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1017/S0263574719001425> (ИФ2020= 2.088)

Категорија М52 – Рад у истакнутом часопису националног значаја:

3. **Z. Gordić**, C. Ongaro: Calibration of robot tool centre point using camera-based system, *Serbian Journal of Electrical Engineering*, Vol. 13, No. 1, pp. 9-20, 2016, <https://doi.org/10.2298/SJEE1601009G>

Категорија М33 – Саопштење са међународног скупа штампано у целини:

4. **Z. Gordić**, K. Jovanović: Identifying Unmodelled Dynamics in Contact Tasks in Industrial Robotics, *Proceedings of the 7th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering, IcETRAN 2020*, pp. 695 - 700, Jun, 2020
5. **Z. Gordić**, K. Jovanović: Influence of Unmodelled External Forces on the Quality of Collision Detection, *Advances in Service and Industrial Robotics - Proceedings of the 28th International Conference on Robotics in Alpe-Adria Danube Region (RAAD 2018)*, pp. 319-328, Springer, Kaiserslautern, Germany, 2019, DOI: 10.1007/978-3-030-19648-6_37
6. **Z. Gordić**, K. Jovanović: Fully Integrated Torque-Based Collision Detection in Periodic Tasks for Industrial Robots with Closed Control Architecture, *Advances in Service and Industrial Robotics Proceedings of the 27th International Conference on Robotics in Alpe-Adria Danube Region (RAAD 2018)*, pp. 71-81, Springer, Greece, Jun, 2018, DOI: 10.1007/978-3-030-00232-9_8
7. **Z. Gordić**, K. Jovanović: Collision Detection on Industrial Robot using Dynamic Time Warping, *Proceedings of the 5th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN 2018)*, pp. 1039-1043, Društvo ETRAN, Serbia, Jun, 2018.
8. **Z. Gordić**, K. Jovanović: Partial Pose Measurements for Identification of Denavit-Hartenberg Parameters of an Industrial Robot, *Proceedings of the 4th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN 2017)*, pp. ROI1.6.1-ROI1.6.4, Društvo ETRAN, Kladovo, Serbia, Jun, 2017.
9. N. Knežević, K. Jovanović, **Z. Gordić**, V. Potkonjak, M. Majstorović: Hazard Identification, Risk Assessment and Safety Integration for Flexible Robotic Cell, *Proceedings of the 4th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN 2017)*, Društvo ETRAN, Jun, 2017.
10. **Z. Gordić**, C. Ongaro: Development and Implementation of Orthogonal Planes Images Method, *Advances in Intelligent Systems and Computing. Proc. 25th IFTOMM/IEEE International Conference on Robotics in Alpe-Adria- Danube Region – RAAD 2016*, pp. 105-115, Springer, Serbia, 2017, https://doi.org/10.1007/978-3-319-49058-8_12
11. **Z. Gordić**, V. Potkonjak: Overview of Methods for Robotic Manipulators Calibration, *Proceedings of the 3rd International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN 2016)*, pp. ROI2.6.1-ROI2.6.4, Društvo ETRAN, Serbia, 2016
12. **Z. Gordić**, C. Ongaro: Robot Tool Centre Point Calibration using Analysis of Images from Orthogonal Planes, *Proceedings of 2nd International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering - IcETRAN 2015*, pp. ROI4.6.1-ROI4.6.5, Jun, 2015.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

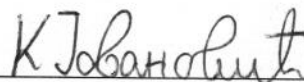
На основу изложеног, Комисија сматра да докторска дисертација кандидата Завише Гордића, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, испуњава све суштинске и формалне услове предвиђене Законом о високом образовању, као и прописима Универзитета у Београду и Електротехничког факултета.

Текст дисертације је написан на енглеском језику и адекватно организован у одговарајућа поглавља. Садржај дисертације је изложен на јасан и разумљив начин. Тема дисертације је савремена и актуелна, а представљени резултати омогућавају еволуцију индустријских робота и њихову примену у савременом производном окружењу које подразумева безбедно дељење радног простора са радницима и разумевање радног контекста робота.

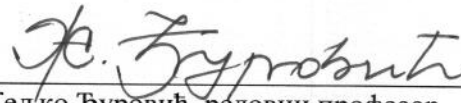
Научни доприноси дисертације се односе на детекцију судара и жељене интеракције индустријских робота са окружењем, поовећање безбедности човека у раду са роботом, као и развој и побољшања алгоритама за аутоматизовану идентификацију кинематичких параметара робота. Резултати истраживања су проверени опсежним тестирањем на индустријским роботима са затвореном архитектуром контролера, али и детаљним анализама у Матлабу и симулационим софтверима индустријских робота. Научни доприноси су потврђени радовима публикованим у међународним научним часописима (два са импакт фактором) и осталим публикацијама на међународном нивоу, који су до тренутка писања овог Реферата цитирани више десетина пута.

Узимајући у обзир све претходно наведено, Комисија са задовољством предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета да се докторска дисертација под називом „**Detection of Interaction Forces in Industrial Robotics**”, односно на српском „**Детекција сила интеракције у индустријској роботизи**” кандидата Завише Гордића прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



др Коста Јовановић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



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



др Александар Родић, научни саветник
Универзитет у Београду – Институт Михајло Пупин