

Универзитет у Београду,
Електротехнички факултет

Наставно-научном већу Електротехничког факултета у Београду

Предмет: Подобност теме и кандидата Завише Гордића за израду докторске дисертације

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета бр. 5038/13-1 од. 25. марта 2022. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата Завише Гордића за израду докторске дисертације и научне заснованости теме под називом:

„Детекција и класификација сила интеракције у индустријској роботизи“,

односно на енглеском:

„Detection and Classification of Interaction Forces in Industrial Robotics“.

Комисија је уз консултацију са кандидатом, предложила промену наслова тема, те се предлаже следећи наслов:

„Детекција сила интеракције у индустријској роботизи“

односно на енглеском:

„Detection of Interaction Forces in Industrial Robotics“.

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1 Биографски подаци

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 Одсеку за сигнале и системе, 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 Одсеку за управљање системима и обраду сигнала. Све испите на докторским академским студијама завршио је са просечном оценом 10,00. Ужа област рада и истраживања 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”. Године 2015. изабран је за истраживача сарадника на истом пројекту. Завршио је основну и напредну обуку за коришћење Denso индустријских робота 2015. године у Немачкој. Током истраживачког ангажмана, радио је на више развојних технолошких пројеката из области роботике. Године 2016. ангажован је на H2020 каскадном финансирању у оквиру пројекта ReconCell на пројекту „Feasibility Study for Serbian Manufacturing Innovation Hub (FS4SMIH)”. Током 2018. године ангажован је у оквиру пројекта ReconCell на пројекту „Reconfigurable Assembly of Airport Signalization Lights”. Године 2019. ангажован је на H2020 пројекту „DIH² - A Pan-European Network of Robotics DIHs for Agile Production” као LER (Local Evangelist in Robotics). Током 2020. и 2021. године у оквиру истог пројекта, као технолошки ментор и оцењивач, учествовао је на укупно пет технолошких експеримената који су за циљ имали развој и увођење напредних решења из области роботике и паметних фабрика у производна предузећа. У својству технолошког ментора у области роботике учествовао је на два експеримента: „Agile and Adaptable Cobic System (A2CS)” пројекта из Финске и данско-литванског пројекта „High Flexible Welding Cell - HWFlexCell”. Као технолошки оцењивач, учествовао је на три технолошка експеримента: белгијским пројектима „Work-Whispers (W2)” и „From Job Shop towards Smart Factory (JS2SF)”, као и „Fiware Ready Quality Control for Packaging Systems in the Food Industry (FIREFIT)” из Португалије. Током Године 2021. ангажован је на H2020 пројекту „BOWI - Boosting Widening Digital Innovation Hubs” као и на технолошком експерименту „BrainWatch for increased productivity with improved workers satisfaction” у оквиру H2020 пројекта „SHOP4CF - Smart Human Oriented Platform for Connected Factories”.

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 студирања добио је следеће награде, признања и стипендије:

- 2017 Најбољи рад у секцији на конференцији ICETRAN 2017 за рад „Partial Pose Measurements for Identification of Denavit-Hartenberg Parameters of an Industrial Robot”

- 2015 Најбољи рад у секцији на конференцији ICETRAN 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)

Био је ангажован као рецензент за радове у следећим часописима и конференцијама:

- Robotica, Cambridge University Press – септембар 2021
- Robotica, Cambridge University Press – јун 2021
- Measurement and Control, SAGE Journals – март 2021
- International Conference On Robotics In Alpe-Adria-Danube Region – RAAD 2019
- International Conference On Robotics In Alpe-Adria-Danube Region – RAAD 2018
- International Conference On Robotics In Alpe-Adria-Danube Region – RAAD 2016

Аутор је 15 конференцијских радова и два часописна рада.

1.2 Стечено научно-истраживачко искуство

Кандидат Завиша Гордић је уписао докторске студије на Електротехничком факултету у Београду школске 2013./2014. године на модулу „Управљање системима и обрада сигнала”. Током докторских студија испунио је све обавезе и положио све испите предвиђене наставним планом и програмом.

р. бр.	Назив предмета	Оцена	ЕСПБ	Датум
1	Теорија роботских система	10	9	18.09.2014.
2	Специјални роботски системи	10	9	13.06.2014.
3	Пројектовање наменских рачунарских система	10	9	21.09.2014.
4	Праћење покретних циљева	10	9	19.09.2014.
5	Аутоматско вођење објеката у простору	10	9	19.09.2014.
6	Увод у научни рад	10	6	13.02.2015.
7	Наменске сензорске мреже	10	9	13.09.2015.
8	Неуралне мреже	10	9	16.08.2015.
9	Аутономни роботски системи без људске посаде	10	9	10.09.2015.
10	Вештачка интелигенција	10	9	12.09.2015.
р. бр.	Назив обавезе	Оцена	ЕСПБ	
	Научно стручни рад	/	3	/
	Студијски истраживачки рад I	/	15	/
	Студијски истраживачки рад II	/	15	/
	Укупно остварено:		120	

Кандидат је аутор 15 конференцијских радова и два часописна рада. Редослед радова у наставку је дат у складу са важећом категоризацијом.

M23 – Рад у међународном часопису:

1. **Z. Gordić**, K. Jovanović, Collision Detection on Industrial Robots in Repetitive Tasks Using Modified Dynamic Time Warping, *Robotica*, pp. 1-20, 2019

M51 – Рад у водећем часопису националног значаја:

2. **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

M33 – Саопштење са међународног скупа штампано у целини:

3. **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
4. **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.
5. M. Majstorović, **Z. Gordić**, K. Jovanović, Robot Task Extraction and Replication from Raw Video Using Reinforcement Learning, *Proceedings of the 6th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN 2019)*, pp. 726-729, Društvo ETRAN, Srebrno jezero, Jun, 2019.
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.
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.

11. **Z. Gordić**, V. Potkonjak, Overview of Methods for Robotic Manipulators Calibration, Proceedings of the 3rd International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETAN 2016), pp. ROI2.6.1-ROI2.6.4, Društvo ETAN, 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, pp. ROI4.6.1-ROI4.6.5, Jun, 2015.
13. V. Potkonjak, B. Lukić, **Z. Gordić**, P. Milosavljević, Development of experimental platform for research in robots having compliant joints, 1st International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering - IcETAN 2014, pp. ROI1.1.1-ROI1.1.4, Društvo ETAN, Jun, 2014.
14. **Z. Gordić**, K. Jovanović, Modeling and Control of Car Handling Box System, 1st International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering - IcETAN 2014, pp. ROI3.4.1-ROI3.4.6, Društvo ETAN, Jun, 2014.

M63 – Саопштење са скупа националног значаја штампано у целини:

15. Н. Лукић, Ј. Драгојевић, **З. Гордић**, Регулација температурног процеса идентификованог модификованим релејним експериментом, Регулација температурног процеса идентификованог модификованим релејним експериментом, INFOTEN-Jahorina, pp. 791-794, Mar, 2016.
16. М. Лазаревић, **З. Гордић**, Б. Лукић, Примена нумеричких метода инверзне Лапласове трансформације у решавању једне класе парцијалних диференцијалних једначина физичких процеса, INFOTEN-Jahorina, pp. 1191-1195, Mar, 2013.
17. **З. Гордић**, Б. Лукић, М. Лазаревић, Примена модификованог релејног експеримента на систему са два резервоара у циљу његове карактеризације и пројектовање оптималног PID регулатора, INFOTEN-Jahorina, pp. 1187-1191, Mar, 2013.

Током истраживачког ангажмана, радио је на више развојних технолошких пројеката из области роботике:

- Током 2016. године - H2020 ReconCell на пројекту „Feasibility Study for Serbian Manufacturing Innovation Hub (FS4SMIH)“.
- Током 2018. године - H2020 ReconCell на пројекту „Reconfigurable Assembly of Airport Signalization Lights“.
- Почевши 2019. године - H2020 „DIH² - A Pan-European Network of Robotics DIHs for Agile Production“ започео рад на пројекту у својству LER (Local Evangelist in Robotics).
- Током 2020. - 2021. године - H2020 „DIH² - A Pan-European Network of Robotics DIHs for Agile Production“, технолошки ментор у области роботике на два експеримента: „Agile and Adaptable Cobotic System (A2CS)“ пројекта из Финске и данско-литванског пројекта „High Flexible Welding Cell - HWFlexCell“.
- Током 2020. - 2021. године - H2020 „DIH² - A Pan-European Network of Robotics DIHs for Agile Production“, технолошки оцењивач, на три технолошка експеримента: белгијским пројектима „Work-Whispers (W2)“ и „From Job Shop towards Smart Factory“.

(JS2SF)”, као и „Fiware Ready Quality Control for Packaging Systems in the Food Industry (FIREFIT)” из Португалије.

- Почевши од 2021. године - H2020 „BOWI - Boosting Widening Digital Innovation Hubs”
- Почевши од 2021. године - H2020 „SHOP4CF - Smart Human Oriented Platform for Connected Factories” на технолошком експерименту „BrainWatch for increased productivity with improved workers satisfaction”.

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.

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Дана 05.04.2022. године на Електротехничком факултету у Београду, Завиша Гордић је имао јавни усмени испит о подобности теме и кандидата пред комисијом у саставу:

1. др Жељко Ђуровић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет (председник комисије)
2. др Александар Родић, научни саветник, Универзитет у Београду – Институт Михајло Пупин (члан комисије који није запослен на ЕТФ-у)
3. др Ненад Јовичић, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

Комисија је једногласно закључила да кандидат испуњава услове за рад на предложеној теми докторске дисертације и оценила испит оценом - **задовољно**.

На основу претходног приказаног резултата досадашњег рада и активности Завише Гордића и узимајући у обзир претходно наведене чињенице, Комисија је стекла увид у способности и научно-истраживачки рад кандидата, те констатује да је кандидат:

- Положио све испите и завршио све обавезе предвиђене наставним планом и програмом и тиме остварио 120 ЕСПБ бодова.
- 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 и на међународним научним скуповима из области којима припада предложена тема докторске дисертације.
- Има вишегодишње искуство у области коју покрива тема докторске дисертације.

Комисија закључује да кандидат Завиша Гордић у сваком погледу испуњава услове за рад на предложеној теми.

2. Предмет, циљ и значај истраживања:

Индустријски роботи данашњице су широко распрострањене и високоперформантне машине које омогућавају флексибилну аутоматизацију широког спектра производних задатака ^[1]. Одликују их пре свега велика брзина и изузетна поновљивост покрета која је постигнута захваљујући прецизној изради и механичкој крутости. Наведене особине их чине изузетно погодним за рад у структурираном радном окружењу где, захваљујући поновљивости и предвидљивости њиховог простора које су унапред обезбеђене и дефинисане, њихове перформансе могу највише да дођу до изражаја. Са друге стране, управо велика брзина кретања, снага и механичка крутост, индустријске роботе чине опасним по човека који се налази у њиховом радном простору. Досадашње решење за постизање предуслова за ефикасан рад робота уз безбедност радника је било раздвајање радних простора човека и робота. За већину досадашњих области примене индустријских робота, где су производне серије велике и где су задаци монотони, тешки или опасни по човека, такво решење никако не губи на смислу ни значају.

Данашњи и будући производни захтеви и потребе тржишта постепено отварају нове области примене робота, где је кључна брза прилагодљивост и где се у малим или средњим серијама, производе сродни, али различити производи ^[1,2]. За таква производна окружења, намеће се потреба за заједничким радом човека и робота у дељеном радном простору, где би се њихове добре особине употпуњавале ради достизања жељеног учинка. Иако може да доведе до изузетно повољних исхода по питању ефикасности и прилагодљивости производње, дељење радног простора у било којој топологији ^[3], макар и повремено, отвара два кључна питања – безбедност радника и могуће нарушавање структурираности радног простора робота ^[3-10].

Циљ докторске дисертације је да за оба наведена питања одговор пружи кроз алгоритме који омогућавају индустријском роботу да препозна спољашње силе које на њега утичу током интеракције са окружењем. Како би развијена решења била што примењивија, додатни захтев при њиховом развоју биће једноставност, јер она повлачи за собом поузданост, која је основ за предвидљивост, док је предвидљивост предуслов за безбедност. У том циљу, истраживање ће се вршити у два правца.

Први правац истраживања бавиће се предметом препознавања утицаја спољашњих сила које потичу од судара робота са окружењем. Већина данашњих колаборативних робота користи мерења јачине струје или напона мотора у зглобовима, или у рејим случајевима, наменски постављених сензора момента силе како би уз додатно познавање динамичког модела робота могли да препознају сударе, што је уједно и принцип на који се ослања и већина досадашњих истраживања из ове области ^[4], ^[11-16]. Ипак, већина индустријских робота има контролере са затвореном архитектуром ^[17-21], и њихови динамички модели нису познати без сложених и често врло захтевних алгоритама за процену ^[15], ^[22-24] динамичких параметара робота, које често није могуће извести у реалним радним условима. Додатно, алгоритми који се заснивају на динамичком моделу робота (енг. *model-based*) због своје сложености и обимности често уносе додатно кашњење при реакцији на судар, што је нарочито неповољно при судару са човеком ^[4-5]. Из наведених разлога, планирано је да истраживање буде усмерено на развој алгоритама који се не ослањају на познавање динамичког модела робота (енг. *non model-based*) ^[17-18], ^[24]. Замисао је да се за потребе препознавања судара са окружењем, користе сигнали који су доступни на индустријским роботима ради успостављања управљачких петљи унутар контролера робота, без икаквих

спољашњих уређаја или сензора. У циљу развијања алгорита, предмет истраживања биће испитивање различитих могућности за препознавање судара поређењем мерених вредности добијених током рада робота са претходно снимљеним референтним вредностима. Како би се превазишли проблеми са неуједначеним узорковањем мерних сигнала, предмет истраживања биће различити алгоритми за мерење сличности сигнала ^[26-30] који су прилагодљиви по временској димензији, као и њихово прилагођавање за рад на индустријском роботу. Предност оваквог приступа у односу на алгоритме који се заснивају на динамичком моделу је што овакав приступ у себи обједињује целокупну динамику роботског система, који поред самог робота укључује и динамику његових завршних уређаја, као и радњи које обавља.

Други правац истраживања се може посматрати као допуна на први, јер за циљ има не само да препознаје сударе индустријског робота са окружењем, већ и да препозна жељена одступања мерног сигнала од референтних вредности ^[31-33]. Повезано, предмет истраживања биће и омогућавање препознавања жељених одступања за покрете и положаје који се разликују од покрета и положаја за који су снимљене референтне вредности одступања. Тиме би се отклонило главно ограничење првог дела истраживања, које се односи на препознавање судара само за један покрет приликом кога су референтне вредности мерног сигнала снимљене. Додатно, истраживање у овом делу биће усмерено и на превазилажење проблема немоделоване динамике код алгоритама заснованих на динамичком моделу ^[31]. Значај овог предмета истраживања је у омогућавању било ког алгорита за детекцију судара да обједини немоделовану динамику која потиче од немоделованих завршних уређаја, терета или сила током задатака које робот врши, и да је укључи у процес детекције судара. У том циљу, предмет истраживања биће и алгоритми за процену кинематичких параметара робота ^[34-35], како би се на основу просторне конфигурације робота процењивао утицај конфигурације робота на профил одступања мерења од референтних вредности. Како би се употпунио сет кинематичких параметара, биће истражене и могућности за бесконтактно одређивање параметара врха алата (енг. *tool centre point* - *TCP*) на основу обраде слика из ортогоналних равни ^[36-38].

Обједињени значај предложених предмета истраживања се огледа и у томе да би могли да омогуће увођење индустријских робота у нова радна окружења, где би им природа радног задатка уз њихове перформансе омогућила да буду боља решења од данашњих колаборативних робота, и то без додатних сензора. Ту се пре свега мисли на задатке где човек само повремено дели радни простор са роботом, па би у осталим случајевима робот мога да ради са знатно већом брзином, или на пословима где носивост, дохват или прецизност колаборативних робота није довољна.

- [1] International Federation of Robotics, "World Robotics 2021 - Industrial Robots", International Federation of Robotics Frankfurt, Germany, September 2021.
- [2] Perzylo, M. Rickert, B. Kahl, N. Somani, C. Lehmann, A. Kuss, S. Profanter, A. B. Beck, M. Haage, M. R. Hansen, M. T. Nibe, M. A. Roa, O. Sörnmo, S. G. Robertz, U. Thomas, G. Veiga, E. A. Topp, I. Kessler, and M. Danzer, "SMERobotics: Smart Robots for Flexible Manufacturing," in *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 26, no. 1, pp. 78-90, March 2019
- [3] N. Pedrocchi, F. Vicentini, M. Matteo, L.M. Tosatti, "Safe Human-Robot Cooperation in an Industrial Environment", *International Journal of Advanced Robotic Systems*. January 2013
- [4] S. Haddadin, A. Albu-Schäffer, A. D. Luca and G. Hirzinger, "Evaluation of Collision Detection and Reaction for a Human-Friendly Robot on Biological Tissues," *IARP International Workshop on Technical Challenges and for Dependable Robots in Human Environments*, Los Angeles, CA, USA (2008).
- [5] S. Haddadin, A. Albu-Schäffer and G. Hirzinger, "Safety evaluation of physical human-robot interaction via crash-testing," In: *Robotics: Science and Systems* (MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 2007) pp. 217– 224.
- [6] S. Haddadin, A. Albu-Schäffer and G. Hirzinger, "Safe Physical Human-Robot Interaction: Measurements, Analysis and New Insights," In: *Robotics Research, Springer Tracts in Advanced Robotics* (M. Kaneko and Y. Nakamura, eds.), vol. 66 (Springer, Berlin, Heidelberg, 2010) pp. 395–407.

- [7] J. Heinzmann and A. Zelinsky, "Quantitative safety guarantees for physical human-robot interaction," *Int. J. Robot. Res.* 22(7–8), 479–504 (2003).
- [8] S. Haddadin, A. Albu-Schäffer, A. De Luca and G. Hirzinger, "Collision Detection and Reaction: A Contribution to Safe Physical Human Robot Interaction," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems – IROS*, Nice, France (2008) pp. 3356–3363.
- [9] Y. Yamada, Y. Hirasawa, S. Huand and Y. Umetani, "Fail-Safe Human/Robot Contact in the Safety Space," *IEEE International Workshop on Robot and Human Communication – RO-MAN*, Tsukuba, Ibaraki, Japan (1996) pp. 59–64.
- [10] A. De Santis, B. Siciliano, A. De Luca, A. Bicchi, "An atlas of physical human-robot interaction", *Mechanism and Machine Theory*. 2008, 43, 253-270.
- [11] A. De Luca, A. Albu-Schäffer, S. Haddadin and G. Hirzinger, "Collision Detection And Safe Reaction With The DLR-III Lightweight Manipulator Arm," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems – IROS*, Beijing, China (2006) pp. 1623–1630.
- [12] A. De Luca and F. Flacco, "Integrated Control for pHRI: Collision Avoidance, Detection, Reaction and Collaboration," *IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics – BioRob*, Roma, Italy (2012) pp. 288–295.
- [13] F. Dimeas, L. Avendaño-Valencia and N. Aspragathos, "Human – robot collision detection and identification based on fuzzy and time series modelling," *Robotica* 33(9), 1886–1898 (2015).
- [14] P. Pastor, L. Righetti, M. Kalakrishnan and S. Schaal, "Online Movement Adaptation Based on Previous Sensor Experiences," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems – IROS*, San Francisco, CA, USA (2011) pp. 365–371.
- [15] F. Flacco and A. De Luca, "Safe Physical Human-Robot Collaboration," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems – IROS*, Tokyo, Japan (2013) p. 2072.
- [16] E. Magrini, F. Flacco and A. De Luca, "Control of Generalized Contact Motion and Force in Physical Human-Robot Interaction," *IEEE International Conference on Robotics and Automation – ICRA*, Seattle, Washington, USA (2015) pp. 2298–2304.
- [17] Z. Gordić and K. Jovanović, "Fully Integrated Torque-Based Collision Detection in Periodic Tasks for Industrial Robots with Closed Control Architecture," *International Conference on Robotics in Alpe-Adria Danube Region – RAAD*, Patras, Greece (2018).
- [18] Z. Gordić, K. Jovanović, Calibration Collision Detection on Industrial Robots in Repetitive Tasks Using Modified Dynamic Time Warping, *Robotica*, pp. 1-20, 2019
- [19] A. De Luca and R. Mattone, "Sensorless Robot Collision Detection and Hybrid Force/Motion Control," *IEEE International Conference on Robotics and Automation – ICRA*, Edmonton, Alberta, Canada (2005) pp. 1011–1016.
- [20] M. Geravand, F. Flacco and A. De Luca, "Human-Robot Physical Interaction and Collaboration Using an Industrial Robot With a Closed Control Architecture," *IEEE International Conference on Robotics and Automation – ICRA*, Karlsruhe, Germany (2013) pp. 4000–4007.
- [21] E. Mariotti, E. Magrini, A. De Luca, "Admittance Control for Human-Robot Interaction Using an Industrial Robot Equipped with a F/T Sensor", *IEEE 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* - Montreal, QC, Canada, pp. 6130–6136.
- [22] V. Bargsten, P. Zometta and R. Findeisen, "Modeling, parameter identification and model-based control of a lightweight robotic manipulator," *2013 IEEE International Conference on Control Applications (CCA)*, 2013, pp. 134-139,
- [23] W. Khalil and F. Bennis. "Symbolic Calculation of the Base Inertial Parameters of Closed-Loop Robots." *The International Journal of Robotics Research* 14 (1995): 112 - 128.
- [24] M. Erden and T. Tomiyama, "Human-intent detection and physically interactive control of a robot without force sensors," *IEEE Trans. Robot.* 26(2), 370–382 (2010).
- [25] A.-N. Sharkawy, P. Koustoumpardis and N. Aspragathos, "Manipulator Collision Detection and Collided Link Identification based on Neural Networks," *International Conference on Robotics in Alpe-Adria Danube Region – RAAD*, Patras, Greece (2018).
- [26] M. Müller, "Chapter 4: Dynamic Time Warping," In: *Information Retrieval for Music and Motion* (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007) pp. 69–84.
- [27] I. Oregi, A. Pérez, J. Del Ser and J. A. Lozano, "On-Line Dynamic Time Warping for Streaming Time Series," *Joint European Conference on Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases – ECML/PKDD*, Skopje, Macedonia (2017) pp. 591–605.
- [28] I. Oregi, A. Pérez, J. Del Ser and J. A. Lozano, "On-line elastic similarity measures for time series," *Pattern Recog.* 88, 506–517 (2019).
- [29] L. J. Latecki, V. Megalooikonomou, Q. Wang, R. Lakaemper, C. A. Ratanamahatana and E. Keogh, "Partial Elastic Matching of Time Series," *IEEE International Conference on Data Mining – ICDM*, Houston, Texas, USA (2005) pp. 577–584.
- [30] D. Sart, A. Mueen, W. A. Najjar, E. J. Keogh and V. Niennattrakul, "Accelerating Dynamic Time Warping Subsequence Search with GPUs and FPGAs," *IEEE International Conference on Data Mining – ICDM*, Sydney, Australia (2010) pp. 1001–1006.
- [31] C. Pengfei, Y. Gan and X. Dai. "Model-based sensorless robot collision detection under model uncertainties with a fast dynamics identification." *International Journal of Advanced Robotic Systems* 16 (2019)
- [32] Chang-Nho Cho, Joon-Hong Kim, Young-Loul Kim, Jae-Bok Song & Jin-Ho Kyung Collision Detection Algorithm to Distinguish Between Intended Contact and Unexpected Collision, *Advanced Robotics*, 26:16, 1825-1840 (2012)
- [33] Gordić, Z., Jovanović K. (2020) Influence of Unmodelled External Forces on the Quality of Collision Detection. In: Berns K., Görges D. (eds) *Advances in Service and Industrial Robotics. RAAD 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 980. Springer Cham
- [34] 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.
- [35] 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
- [36] 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
- [37] 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.
- [38] 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*, pp. ROI4.6.1-ROI4.6.5, Jun, 2015.

3. Полазне хипотезе:

Полазне хипотезе докторске дисертације су:

- Услед перформанси које поседују, индустријски роботи ће, поред уобичајених области у којима се користе, проширити област примене у окружења која су због безбедности била намењена искључиво колаборативним роботима.
- Будућност индустријске производње заснива се на новом приступу који је усмерен на човека радника, где роботи и остале машине треба са њим да сарађују на ефикасан и безбедан начин чиме се процена мера интеракције робота ставља у први план будућих истраживања у науци и пракси.
- Доступна мерења јачине струја, напона или момената силе у зглобовима индустријског робота су довољно квалитетна и поновљива да се поређењем мерних сигнала који потичу од истоветних покрета робота може поуздано препознати дејство спољашње силе на зглобу на који се утицај те силе пренео.
- Процењене вредности момента силе у зглобу робота, су приближно линеарно сразмерне јачини струје у мотору зглоба на основу које су процењене.
- Уз одређене измене *Dynamic Time Warping (DTW)* алгоритма, могуће је поредити сигнале снимљене различитим учестаностима одабирања насталим услед недостатка могућности за паралелну обраду података и извршавање паралелних процеса у оквиру контролера робота.
- Уколико су познати кинематички параметри робота, на основу снимљеног одступања од референтних вредности мерног сигнала узрокованог појавом спољашње силе при вршењу одређеног покрета или при одређеном положају робота, могуће је предвидети вредности одступања настале усред деловања исте спољашње силе током вршења другачијег покрета, или при другачијем положају робота.
- Одређивање параметара врха алата (енг. *tool centre point - TCP*), код крајњих уређаја цилиндричног или симетричног профила, могуће је извршити бесконтактно на основу анализе слика врха алата из две узајамно нормалне равни.
- Одређивање кинематичких параметара робота који се састоји из ротационих и линеарних зглобова произвољне конфигурације могуће је извршити на основу праћења само положаја (енг. *partial pose*), односно координата у правоуглом Декартовом координатном систему, тачке од интереса на завршном уређају робота.

4. Методе истраживања:

Методологија која ће се користити током истраживања почиње систематском анализом доступних алгоритама за препознавање судара и његово разликовање од намерне интеракције са окружењем.

У оквиру првог правца истраживања, у коме ће се радити на развоју алгоритма за препознавање судара при радњама које се понављају у циклусима на истоветан начин, што је оправдано ограничење имајући у виду да већина роботских задатака одговара датом опису. Детекција судара ће се заснивати на препознавању разлика између секвенце мерења снимљене током извршавања задатка са референтном секвенцом која је претходно снимљена, а током које није било судара. На почетку, пажња ће бити усмерена на развој алгоритма који може да се имплементира на самом контролеру индустријског робота. Биће

истражена природа сигнала који су доступни за препознавање судара, њихова динамика, и поновљивост за исте покрете. Поред тога, биће анализирана и природа показатеља који указују на судар, њихова поновљивост и заједничке особине. Такође биће разматрани и различити типови сигнала, по питању њихове распрострањености на роботима различитих произвођача, али и по питању погодности за тумачење и могуће другачије уочљивости указатеља на судар. Структура и брзина процесора су такође од велике важности за имплементацију алгоритма за препознавање судара јер би он по природи требало да се извршава паралелно са главним програмом. У процесорима са једним језгром, дељење процесорских ресурса може да доведе до неуједначених учестаности одабирања, па ће се у наредној фази истраживања посветити пажња алгоритмима за одређивање сличности сигнала који могу да компензују разлике у одабирању. Од посебног значаја биће измена која би таквим алгоритмима омогућила рад у реалном времену (енг. *on-line*), и то са секвенцама мерења различите дужине и садржине. Приликом развоја алгоритма, додатна пажња биће усмерена на брзину реакције у контексту задатка који се обавља, јер је она директно повезана са озбиљношћу могућих повреда. Због сложености алгоритама за одређивање сличности сигнала, алгоритам за детекцију ће у овој фази бити имплементиран на рачунару који ће бити повезан са роботом од кога ће примати узорке сигнала и коме ће слати сигнал уколико је судар детектован. Имплементација на рачунару омогућиће и испитивање других критеријума за детекцију судара заснованих на анализи сопствених вредности (енг. *Eigen values*) упарених секвенци сигнала.

У оквиру другог правца истраживања, биће разматрана могућност надоградње алгоритма за детекцију судара како би могао да се користи и за препознавање жељених одступања од референтних вредности, и како би могао да се користи током покрета који се разликују од оних током којих је снимљен референтни сигнал. За постизање овог циља најпре ће бити развијен алгоритам за одређивање кинематичких параметара робота на основу мерења позиције тачке од интереса на завршном уређају. Како би добијање кинематичких параметара обухватило и завршни уређај, биће развијен и додатни алгоритам за одређивање положаја врха алата у односу на прирубницу робота. У том циљу, истраживање ће бити усмерено на могућност да се анализом слика из две ортогоналне равни одреде параметри од интереса за алат цилиндричног или симетричног облика. У завршној фази, кинематички параметри ће бити искоришћени како би се омогућило алгоритму да преко крака силе може да предвиди профиле одступања насталих као последица жељене интеракције робота или немоделоване динамике. У овој фази додатни изазов ће бити да се што раније направи разлика између судара и одступања услед жељене интеракције. Како би се пружила додатна помоћ, у процес одлучивања је планирано да се уведе и информација добијена неком од метода *soft-computing*-а, попут вештачких неуронских мрежа, фази логике или вештачке интелигенције.

5. Очекивани научни доприноси:

Очекивани научни доприноси докторске дисертације су:

- Систематичан преглед литературе у области препознавања судара и жељених контаката са роботом, безбедности у раду са роботом, поређења сигнала, одређивања кинематичких параметара и калибрације алата.

- Развијен алгоритам за детекцију судара на основу мерења у зглобовима који може да се имплементира на индустријском роботу са затвореном архитектуром контролера
- Алгоритам за *on-line* одређивање сличности сигнала различите дужине, садржине и учестаности одабирања, развијен на основу измена *DTW* алгоритма.
- Употреба кинематичких параметара за процену сигнала жељених одступања од референтних вредности за покрете и положаје који се разликују од покрета и положаја при којима су снимљене референтне вредности сигнала жељених одступања.
- Употреба неке од метода *soft computing*-а за процену вероватноће жељене интеракције са окружењем као помоћ при класификацији сигнала.
- Развијен и доказан алгоритам за аутоматско одређивање кинематичких параметара робота произвољне конфигурације.
- Развијен и доказан алгоритам за аутоматско одређивање TCP параметара за алате са осном симетријом на основу анализе слика из две међусобно нормалне равни.

6. План истраживања:

Истраживање ће се започети радом на развоју алгоритма за препознавање судара на индустријском роботу са затвореном архитектуром контролера. За ову сврху, изабран је робот *Denso VP-6242* као типичан представник породице малих индустријских робота. У првој фази, пажња ће бити усмерена на анализу особина експериментално снимљених сигнала на основу којих може да се препозна судар, као и на анализу кључних показатеља на основу којих би судар могао да буде препознат. Додатна пажња биће усмерена и на могућности за имплементацију алгоритма на самом контролеру робота, као и изазове које таква имплементација подразумева. Ту се, пре свега, мисли на ограничену меморију контролера, величину секвенци које могу да буду снимљене, време обраде података, и чињеницу да процесори индустријских робота имају једно процесорско језгро.

Друга фаза намењена је истраживању могућности за имплементацију алгоритма за детекцију судара на рачунару који је повезан са роботом путем неког од стандардних и широко распрострањених комуникационих протокола. У овој фази биће истражени сложенији алгоритми који би могли да доведу до веће поузданости у раду захваљујући већој процесорској моћи рачунара. У том циљу, биће испитани алгоритми за одређивање сличности сигнала који су прилагодљиви по временској оси, како би се превазишле разлике у узорковању. Такође, биће испитани и нови критеријуми одлучивања о појави судара. Како би се испитала могућност интеграције са различитим произвођачима робота, поред *Denso VP-6242*, биће тестиран и на роботу *ABB IRB 120*.

Трећа фаза истраживања ће бити посвећена развоју алгоритама који су неопходни за процену кинематичких параметара робота. У оквиру ове фазе, биће развијен алгоритам који на основу мерења позиција тачке од интереса на завршном уређају може да изврши процену свих кинематичких параметара робота произвољне конфигурације. За развој алгоритма биће коришћен симулациони софтвер *Wincaps III*, са могућношћу да буде експериментално тестиран на неком од индустријских робота. У овој фази биће развијен и алгоритам за процену координата врха алата (енг. *tool centre point - TCP*), на основу анализе слика из међусобно ортогоналних равни, који ће бити тестиран на посебно развијеном уређају за калибрацију и индустријском роботу *Denso VS 068*.

Током четврте фазе истраживања, алгоритам развијен у другој фази ће бити допуњен информацијама о кинематичким параметрима робота и бити тестиран на основу мерења са робота *Denso VP-6242*. Тиме ће се омогућити даљи развој алгоритма који ће имати могућност да детектује и класификује сударе и жељену, али немоделовану динамику током вршења покрета који се разликују од покрета при којима су снимљене референтне вредности мерног сигнала.

Текст докторске дисертације биће написан на енглеском језику.

7. Закључак и предлог

На основу приложене документације и непосредног увида у досадашњи рад кандидата Завише Гордића, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, Комисија закључује следеће:

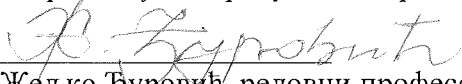
1. Кандидат испуњава све формалне и суштинске услове прописане Законом о високом образовању, Статутом Универзитета у Београду и Статутом Електротехничког факултета у Београду за израду докторске дисертације.
2. Предложена тема „**Детекција сила интеракције у индустријској роботисти**”, односно на енглеском: „**Detection of Interaction Forces in Industrial Robotics**”, је научно заснована, а резултати теме ће представљати значајан и оригиналан допринос. Тема припада ужој научној области “Управљање системима и обрада сигнала”.

На основу претходно изложеног, Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета у Београду да кандидату Завиши Гордићу одобри израду докторске дисертације под називом „**Детекција сила интеракције у индустријској роботисти**”, односно на енглеском: „**Detection of Interaction Forces in Industrial Robotics**”, а под менторством др Косте Јовановића, ванредног професора.

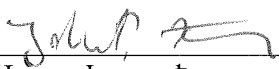
У Београду, 07.04.2022.

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


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

