

ВЕЋУ ДОКТОРСКИХ СТУДИЈА

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Николе Лукића

Одлуком Наставно-научног већа број 432/2 од 14.04.2022. године именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Николе Лукића, мастер инжењер машинства (маст. инж. маш.), под насловом:

**АДАПТИВНО СПАЈАЊЕ ДЕЛОВА У ТЕХНОЛОГИЈИ РОБОТИЗОВАНЕ МОНТАЖЕ
ПРИМЕНОМ КИНЕМАТСКИ РЕДУНДАНТНИХ РОБОТА**

После детаљног прегледа достављене докторске дисертације и других пратећих материјала, као и разговора са кандидатом, Комисија подноси следећи

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације:

Кандидат Никола Лукић, мастер инжењер машинства, уписао је прву годину докторских студија на Машинском факултету Универзитета у Београду школске 2010 / 2011. године, број индекса Д24/10. Током студија испунио је све обавезе предвиђене планом и програмом докторских академских студија.

Кандидат је Већу за докторске студије поднео захтев за давање сагласности на предлог теме докторске дисертације заведен под бројем 1729/1 од 15.09.2014. године. Кандидат је за потенцијалног ментора предложио Професора Петар Петровића, редовног професора Машинског факултета Универзитета у Београду.

Наставно-научно веће Машинског факултета Универзитета у Београду, донело је Одлуку бр. 1797/2 од 02.10.2014. године којом је прихваћена тема докторске дисертације под насловом „Адаптивно спајање делова у технологији роботизоване монтаже применом кинематски редундантних робота“, именује ментор проф. др Петар Петровић и именује Комисију за подношење извештаја о прихватању теме у саставу: проф. др Петар Петровић, ментор, проф. др Бојан Бабић, проф. др Љубодраг Тановић, доц. др Живана Јаковљевић и проф. др Стеван Станковски, ФТН Нови Сад.

Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду на својој седници одржаној 24. 11. 2014. године донело је одлуку којом се даје сагласност на предлог теме докторске дисертације кандидата Николе Лукића, мастер инжењер машинства. На основу

Захтева кандидата, Одлуке Научно-наставног већа Машинског факултета о испуњености услова кандидата за израду докторске дисертације и о именовану ментора, а на основу Одлуке о сагласности Већа научних области техничких наука, Декан Машинског факултета у Београду, проф. Милорад Милованчевић, је донео Закључак број 3101/1 од 27.11.2014. године којим се кандидату Николи Лукићу, мастер инжењер машинства, одобрава рад на теми докторске дисертације 'Адаптивно спајање делова у технологији роботизоване монтаже применом кинематски редундантних робота', а за ментора је именован проф. др Петар Б. Петровић.

На основу информација које је Комисија добила од Студентске службе Машинског факултета, у току студирања кандидат је био у статусу мировања или продужетка статуса студента у складу са следећим хронолошким низом одлука:

1. 2014/2015, статус мировања, Одобрење број 9/13273 од 21.09.2015;
2. 2017/2018, продужетак статуса студента, Одобрење број 2343/1 од 06.10.2017;
3. 2018/2019, продужетак статуса студента, Одобрење број 9/13873 од 28.09.2018;
4. 2019/2020, статус мировања, Одобрење број 1398/107 од 30.09.2020;
5. 2020/2021, статус мировања, Одобрење број 9/16664 од 23.09.2021;
6. 2021/2022, продужетак статуса студента, Одобрење број 9/16664 од 23.09.2021.

Напомена 1: последње две ставке у наведеној листи статуса студента докторских студија су донете под истим бројем одлуке и истог датума.

Напомена 2: све школске године ван ове листе су биле са статусом уписа нове године студија - школска 2010/11, 2011/12 и 2012/13 година, или регуларне обнове школске године – школска 2013/14, 2015/16 и 2016/17 година.

На основу претходног, констатује се да је кандидат провео 6 школских година у статусу редовног студента докторских студија, 3 године у статусу продужетка статуса студента и 3 године у статусу мировања, односно укупно 12 година, од чега 9 година у статусу активног студента, што је у складу са чланом 109. важећег закона о високом образовању, којим се регулише престанак статуса студента.

У складу са претходним, ментор проф. др Петар Б. Петровић је 10.03.2022. обавестио Катедру за производно машинство о завршетку докторске дисертације. На предлог Катедре Научно наставно веће Машинског факултета је на седници одржаној 14.04.2022. донело Одлуку бр. 432/2 о именовану Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације у саставу:

др Петар Б. Петровић, редовни професор, ментор

др Бојан Бабић, редовни професор,

др Никола Славковић, ванредни професор

др Александар Родић, научни саветник, Институт Михајло Пупин, Београд

др Стеван Станковски, редовни професор, Факултет техничких наука, Нови Сад

1.2. Научна област дисертације:

Докторска дисертација Николе Лукића под насловом „Адаптивно спајање делова у технологији роботизоване монтаже применом кинематски редундантних робота“, припада области техничких наука – машинство, ужа научна област производно машинство, за коју је матичан Машински факултет Универзитета у Београду.

Ментор проф. др Петар Б. Петровић је редовни професор на Машинском факултету Универзитета у Београду и ради на Катедри за производно машинство од 1984. године, у континуитету. Као аутор или коаутор, публикувао је 21 рад у часописима са SCI листе, 14 радова у часописима националног значаја, 58 радова на међународним скуповима, и 80 радова на скуповима од националног значаја, све из области производног машинства и производних технологија.

1.3. Биографски подаци о кандидату:

Никола Лукић је 2001. године завршио основну школу „Љуба Ненадовић“ и уписао Техничку школу „Радоје Дакић“, у Београду. Године 2005. завршава средњу школу и уписује Машински факултет Универзитета у Београду. Основне академске студије (B.Sc.) је завршио 2008., са просечном оценом 7.93, и одбраном завршног рада под називом „Примена савремених CAD/CAM система на примеру обраде делова алата за пробијање“. Мастер академске студије (M.Sc.) је завршио 2010. године на Катедри за производно машинство, са просечном оценом 9.6 и одбраном завршног рада под називом „CNC обрадни систем за резање челичних плоча плазмом – синтеза и симулација управљачког система отворене архитектуре“. По завршетку мастер студија, у новембру 2010. године уписује Докторске академске студије, а од 01. јануара 2011. до 30. септембра 2021. године запослен је на Машинском факултету Универзитета у Београду. Током овог периода ангажован је као истраживач-сарадник на пројекту технолошког развоја TP35007, под називом "Интелигентни роботски системи за екстремно диверзификовану производњу", који финансира Министарство за просвету, науку и технолошки развој Републике Србије. Члан је Лабораторије за кибернетику и мехатронске системе (CMSysLab), а, ангажован је и као сарадник у настави на четири предмета у оквиру Мастер академских студија Катедре за производно машинство, и то: Пројектовање обрадних система, Технологија Монтаже, Мехатронски системи и Компјутерско управљање и надзор у аутоматизацији производње. Након испуњавања свих обавеза предвиђених планом студијског програма, уз просечну оцену 10, докторска дисертација под називом: “Адаптивно спајање делова у технологији роботизоване монтаже применом кинематски редувантних робота” је одобрена у новембру 2014. године, а за ментора именован проф. др Петар Б. Петровић. Његове научноистраживачке и професионалне активности усмерене су ка следећим областима: пројектовање обрадних система, адаптивна роботска монтажа, управљање кинематски редувантним роботима, физичка и когнитивна интеракција човека и робота, примена виртуелне и аугментоване реалности у производним технологијама. Аутор је више од 20 радова саопштених на домаћим и интернационалним конференцијама, 1 рада објављеног у међународном часопису са СЦИ листе, 2 рада објављена у домаћим часописима, 1 поглавља у међународној монографији и више од 10 техничких решења. Са групом коаутора добио је награде за најбољи рад Секције за роботiku на ETRAN конференцији 2013., и на IcETAN конференцији 2014. године. У Лабораторији за вештачку интелигенцију Универзитета у Цириху 2013. године учествовао је у раду летње школе под називом „I eSMCs Robotics Summer School on Embodiment and Morphological Computation“, у трајању од 5 дана. Учествовао је у организацији и у активном раду у летње школе „IS3 HRC: Italian-Serbian Summer School on Human-Robot Co-Working“ која се одржавала у CMSysLab, у трајању од 5 дана, у периоду од 2016-2018. године, као члан пројектног тима у оквиру Италијанско-Српског пројекта „Human-Robot Co-Working as a Key Enabling Technology for the Factories of Future“. Као члан пројектног тима учествовао је и у оквиру билатералне сарадње Србије и Кине, у пројекту под називом „Next Generation Technology for Ubiquitous Collaborative Robotics – UbiCbot“, у периоду 2018-2021. У оквиру EPACMUS+ програма Европске Уније био је члан пројектног тима пројекта под називом „Advanced Virtual and Augmented Reality Toolkit for Learning – AVATAR“ током 2021. године. У период од 2011-2021. године активно

је учествовао у више пројеката сарадње Машинског факултета и CMSysLab са индустријом Србије. Активно се служи енглеским и познаје руски језик.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације:

Докторска дисертација Николе Лукића, маг. инж. маш., под насловом „Адаптивно спајање делова у технологији роботизоване монтаже применом кинематски редундантних робота“ написана је на српском језику и садржи укупно 293 странице А4 формата, од чега 219 страна основног дела текста дисертације, 53 страница су прилози и 22 странице уводне формалности и садржај дисертације. Дисертација садржи 80 слика и дијаграма у основном делу текста дисертације и 12 слика и дијаграма у прилозима, затим 4 табеле у основном делу текста тезе и 1 табелу у прилогу, као и 229 нумерисаних израза у основном делу текста и 28 у прилозима.

Основни део текста дисертације организован је у 6 поглавља:

1. Уводна разматрања,
2. Процес спајања делова у технологији роботизоване монтаже,
3. Конфигурациони простор нуле и инверзно пресликавање,
4. Хијерархијско организовање и координација технолошког задатка роботизованог спајања,
5. Експериментална верификација,
6. Закључак.

Осим наведеног, дисертација садржи резиме на српском и енглеском језику, садржај, литературу, као и биографију аутора, Изјаву о ауторству, Изјаву о истовестности штампане и електронске верзије докторског рада и Изјаву о коришћењу, као и 5 прилога већег обима: Прилог П1 – Геометријски модел редундантне роботске руке SIA10F, Прилог П2 – Кинематски модел редундантне роботске руке SIA10F, Прилог П3 – Аналитички модел MRR-R23 и подалгоритамске структуре, Прилог П4 – Експериментална верификација .- програмски кодови, Прилог П5: Технички детаљи експерименталне платформе.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Прво поглавље започиње прегледом актуелног стања технологије монтаже, уз ограничење разматрања оних садржаја који су директно или индиректно високорелевантни за тематско одређење дисертације. Конкретно, прво се обрађује општи контекст роботских производних технологија, не само из технолошког угла, већ шире, узимајући у обзир укупни друштвени и економски контекст, посебно последице које су настале променом производне парадигме. Затим се прелази на идентификацију кључних истраживачких трендова и праваца развоја у области технологије роботизоване монтаже, где се као нови појам уводи конструкт индустријског хуманоида, ослоњен на један шири техничко-технолошки конструкт кибернетско-физичких производних система. Овај аспект се конкретизује навођењем релевантних научно-истраживачких пројеката, где се као носиоци истраживачких тема издвајају две кључне речи: безбедност, у контексту колаборативне роботике и блиске физичке интеракције човека и робота и адаптивност (имплицитно флексибилност!), као генеричко својство за рад робота у недовољно структурираном окружењу, наметнутом доминантно новом производном парадигмом кастомизоване производње, којом се обим производних серија драматично редукује, са јасним трендом свођења на појединачну, или чак уникатну производњу. Са овим се даље повезују

стратешке иницијативе на ЕУ простору, Индустрија 4.0 и Индустрија 5.0. Као сумарни, односно синтетички резултат разраде по основу безбедности и адаптивности, кандидат препознаје и експлицитно наводи шест кључних пројектних захтева (он то тако назива, везујући се доминантно за инжењерски угао гледања, мада се у суштини ради о кључним истраживачким правцима), који су доминантно техничке природе, мада у шестом захтеву кандидат експлицитно наводи и психолошке аспекте, као пројектни захтев који очигледно излази изван оквира технике и технологије. У циљу потврде исправности оваквог разумевања данашњег стања у области индустријске роботике, кандидат у посебном подпоглављу обрађује рефлексiju горе наведених трендова на стање на савременом тржишту индустријских робота, наводећи конкретне примере и успостављајући везе између њихових техничких особености и препознатих истраживачких праваца. Даље се ова врста прегледне анализе фокусира на стање истраживања у националним оквирима. Кандидат затим допуњује претходно сужавањем области коју анализира на домен технологије роботског спајања делова, са оштрим уласком у домен еластомеханичких својстава роботске руке, посебно на њена својства крутости, која се експлицитно препознаје као кључна технолошка променљива. Крутост се овим доводи у исту раван као и кретање роботске руке, што одмах доводи до препознавања суштинског технолошког изазова који се односи на неконфликтно извршавање два задатка: (прецизно) управљање кретањем врха робота и (прецизно) управљање крутошћу врха робота. Кандидат као решење овог изазова препознаје простор кинематске редунадансе и експлицитно наводи како ће се из тог разлога истраживачко тежиште усмерити у ту област, посебно на проблем приоритизације. Затим се тема кинематске редунадансе детаљно истражује кроз анализу обимне публиковане литературе из те области. Прво поглавље се завршава: а) поставком 4 хипотезе, као полазног оквира за омеђење истраживачког простора дисертације и кроз њихово формално-консеквентно доказивање, продуковање кључних научних доприноса дисертације, и б) експлицитним дефинисањем методолошког инструментаријума који ће бити коришћен у истраживачкој обради постављеног скупа хипотеза.

У другом поглављу се обрађује процес спајања делова, као основни процес технологије монтаже.

Друго поглавље дисертације приказује резултате теоријских истраживања процеса спајања, са посебним фокусом на његову физичку реализацију у оквиру технологије роботизоване монтаже. Прво се наводе онтолошки аспекти система за роботизовано спајање, где се кроз приступ базиран на (а)аналогији са мануелном монтажом, односно човеком као биолошком еквиваленту (обухватају се биомеханичка, сензитивна и когнитивна својства, одакле следи екстремна вишеслојна комплексност таквог технолошког ентитета) и (б)опште теорије система и унутар тога формализам одређене теоријом агената кроз који се поставља генеричка структура агента за технолошки процес монтаже са припадајућим скупом атрибута (атрибуиране апстракције унутрашњег физичко-когнитивних садржаја и функција, и комуникационих садржаја за процесну интеракцију у локалном и ширем смислу), препознају се карактеристични облици процеса монтаже. Њиховим декомпозицијом дефинише се базни градивни блок из којег се даље могу градити сви облици технолошког система роботизованог спајања, где се посебно, као карактеристичне, препознају биагентна дворучна, дегенерисана једноручна, и сложена полиагентна структура, добијена слободном мултипликацијом базног градивног агента. Оваквим формализмом се на формално конзистентан начин, а кроз кибернетско-физички оквир, ствара подлога за даље истраживање формалних аспеката колаборативне функције, односно сложених интеракција скупа агената у физичком и когнитивном простору унутар роботског система за монтажу / спајање. То истраживање се, следећи тематско ограничење дисертације, даље своди на истраживање кинетостатичких својстава, којим се обухватају основна питања поставке општих аналитичких модела генерализоване крутости и са тим

повезаних варијантних концепата управљања својствима генерализоване крутости роботске руке, посматрајући генерализовану крутост као кључну процесну величину система роботског спајања. Посебно је битно да се нагласи да је применом одговарајућег математичког инструментаријума, генерализована крутост роботске руке репрезентована врло општим математичким конструктом сопственог система матрице генерализоване крутости (сопствене вредности и сопствени вектори), при чему се конгруентном пресликавању крутости из простора радног задатка у конфигурациони простор роботске руке додаје дуализам концепта крутости садржан у тесној повезаности између силе и помераја (чиме се матрица генерализоване крутости повезује са њеним физичким еквивалентом матрице генерализоване мобилности). У делу који се бави питањем управљања генерализованом крутошћу препознају се и анализирају варијантни концепти, где се експлицитно анализирају концепти базирани на кинематској и актуационој редуванси, као и концепт актуатора са управљивом крутошћу.

Треће поглавље је посвећено приказу резултата истраживања у области конфигурационог простора нуле и са тим у вези, инверзних пресликавања. У оквиру овог поглавља се заправо обликује аналитички инструментаријум који се касније примењује за формулисање одговора на питање координације паралелног извршавања више од два процесна задатка (примарног и скупа такозваних секундарних задатака) у оквиру технолошког система за монтажу, односно процеса спајања делова, применом кинематски редувантних робота. У овом смислу се истражују три конкретна питања: а) питање математичког моделирања извршавања сложених задатака (задаци координације симултаног неконфликтног извршавања више од једног циља), б) питање капацитета и довољности расположивог конфигурационог простора нуле и в) питање изградње формалног методолошког оквира за анализу и синтезу конфигурационог простора нуле кинематски редувантних робота, укључујући и контекст кинематске хиперредувансе. Као основа за проналажење одговора на постављена питања користи се оквир линеарне алгебре, примењене на Јакобијанову матрицу роботске руке и у оквиру тога, моделирање директних и инверзних линеарних пресликавања функционално повезаних простора. Посебно се разматрају математички приступи базирани на методи проширења Јакобијанове матрице и методи комплементарних пројектора. Ограничавајући се на методу решавања проблема кинематске редувансе на бази пројектора, у овом поглављу се детаљно истражује и формулише потребан и довољан математички апарат за карактеризацију и синтезу конфигурационог простора нуле. У оквиру тога се за аналитичку формулацију конфигурационог простора детаљно разрађују поступци (а) редуковане степенасте форме и (б) декомпозиције сопственог система. Даље се, на бази аналитичке формулације четири фундаментална подпростора (посебно, простор слике и простор нуле) и кореспондентних линеарних пресликавања Јакобијанове матрице дефинише аналитичка формулација за синтезу простора нуле. На бази тога се, даље разрађује општи модел инверзног линеарног пресликавања Јакобијанове матрице кинематски редувантне роботске руке кроз различите облике псеудоинверзије правоугаоних форми и формулишу различити облици комплементарних пројектора.

Четврто поглавље обрађује проблем хијерархијске природе технолошког задатка монтаже, где се систематичном анализом показује да је задатак монтаже увек композит два или више процесних примитива са различитим степеном транспарентности у односу на обсервера, при чему се процесни примитив посматра као уређени скуп активности са јединственим индивидуалним циљем, при чему његова даља декомпозиција није могућа. Користећи методолошки оквир хијерархијски организованих вишенивојских система, као и општи кибернетски оквир, у овој глави се нуди прецизно систематизован онтолошки оквир кибернетске репрезентације технолошког задатка спајања, и у оквиру тога, посебно значајан за тематски оквир докторске дисертације, концепт координације. Концепт координације се прецизно онтолошки одређује кроз увођење два битна појма, појам

контрадикције и појам конфликта, из угла остваривања партикуларних циљева технолошких примитива, одакле се даље уводи појам координабилности, односно могућности управљачког система да генерише одговарајући скуп координационих параметара којима се скуп процесних примитива за извршавање технолошког задатка спајања преводи из потенцијално конфликтног у еквивалентно компромисно стање, али по цену остваривања глобалног циља на подооптимални начин. Претходно наведено укључује и конкретна решења, исказана у предложеним колоралијумима за ослобађање од физичких контрадикција унутар скупа индивидуалних процесних примитива, повезивањем тог питања са конфигурационим простором нуле кинематски редувантне роботске руке, односно ортогоналном партицијом конфигурационог простора кинематски редувантне роботске руке (кинематска редуванса је овде методолошки императив). После поставке општег формалног оквира, у оквиру овог поглавља се разрађује питање примарних и секундарних процесних примитива унутар простора технолошког задатка спајања и спроводи синтеза варијантних функција индивидуалних технолошких процесних примитива. Функције циља се у овом контексту ослањају на претходно разрађени концепт генерализоване матрице крутости и њој припадајућег сопственог система, обрађено у оквиру трећег поглавља, као и на формализам процесног агента, који је обрађен у оквиру другог поглавља. Овим приступом је на формално конзистентан и на аналитичком инструментаријуму заснованој методологији на свеобухватан начин сагледана процесна природа роботизованог спајања делова у технологији монтаже, одакле се непосредно стиче увид у изузетну комплексност процеса спајања и потребу за симултано извршавање великог броја процесних и системских задатака. Одатле је, у даљем тексту овог поглавља, обрађено питање функције координације, којом су обухваћена следећа питања: а)ограничења и захтеви остваривања функције координације, б)ограничења капацитета конфигурационог простора, в)конфликтност процесних примитива, и г)спрезање процесних примитива. Одатле је даље понуђен одговор на питање формалног инструментаријума, кроз дефинисање (а)примене пројектора као инструмента координације, (б)увођење такозваних парцијалних пројектора, (в)испитивање својства адитивности парцијалних пројектора, уз осврт на (г)питање повратне спреге координације за конфигурациони простор нуле и (д)потреба за увођење метахеуристике и машинског учења, али уз ограничење примене у реалном времену. Ово обимно, а за докторску дисертацију посебно вредно поглавље се завршава приказом синтезе варијантних алгоритама функције координације за технолошки задатак спајања, где се наводе конкретни алгоритми који су базирани на интегралним, интегралним и релативним, и парцијалним пројекторима и варијантним облицима функције циља. У смислу конкретних излаза из ове докторске дисертације, ово поглавље има највећу научну и практичну вредност.

Пето поглавље је посвећено је експерименталној потврди концепта управљања попустљивошћу редувантне роботске руке применом приступа и теоријских модела развијених у оквиру ове докторске дисертације. Експериментална верификација је спроведена кроз симулационе експерименте и експерименте са физичким роботом. У циљу трактабилности (редукција евидентне аналитичке комплексности) и у циљу минимизације утицаја поремећаја (трење, зазори и поремећаји који долазе од управљачког система) код експеримента са физичком руком, експерименти су спроведени са роботима минималне кинематске конфигурације, односно работа чији је простор радног задатка једнодимензионалан и дводимензионалан. Симулациони експерименти су изведени на Матлаб софтверској платформи, развојем сопствених симулационих кодова, за варијантне алгоритме симултане реализације примарног и секундарних задатака. Добијени резултати су у потпуности потврдили способност развијених алгоритама да координирају извршење конфликтних циљеве примарног и секундарних процесних примитива на очекивани начин. У најкраћем, примењени комплементарни пројектори су функционисали савршено –

прецизно (без пресликавања између комплементарних подпростора) и конвергентно. Ова тврдња је јасно визуелизована графичким путем. Експериментална верификација применом физичког робота је изазов за себе, јер конвенционални индустријски роботи имају управљачки систем затворене архитектуре који не дозвољава имплементацију алтернативних управљачких алгоритама. Постојећа роботска платформа базирана на Yaskawa SIA10F роботској руци са 7 степени слободе (редундантна антропоморфна рука), Yaskawa FS100 роботски управљачки систем опремљен развојним окружењем MotoPlus SDK (Software Development Kit) и два ортогонална мерна система за идентификацију помераја ТЦП робота на бази примене ласерске оптичке завесе велике резолуције Micro-Epsilon ODC-2520, представљала су суштину експерименталне платформе, на којој су примењени синтетисани алгоритми за симултано неконфликтно извођење примарног и секундарног задатка, са посебним фокусом на управљање сопственим системом матрице генерализоване крутости ТЦП роботске руке, односно управљање елипсоидом крутости. Као и у случају симулационих експеримената, физички експерименти су такође изведени за роботску конфигурацију са минималном аналитичком комплексношћу, свођењем просторне кинематски редундантне роботске руке на редундантну раванску роботску руку са 3 степена слободе, односно MRR-R23 планарну структуру са једним редундантним степеном слободе. Компарацијом симулационих резултата који су директно изведени из развијених алгоритама и резултата са физичким роботом потврђене су две кључне чињенице: (а) да се кинематском редундансом и припадајућим конфигурационим простором нуле може ефективно да управља матрицом генерализоване крутости ТЦП роботске руке и (б) да је постигнута корелација симулационих и експериментално добијених резултата довољно висока да се може тврдити да су разлике последица искључиво немоделираних ефеката.

Шесто поглавље се односи на анализу остварених резултата истраживања и извођење закључака о одрживости постављених истраживачких хипотеза. За сваку од четири хипотезе кандидат наводи детаљну аргументацију и сумарни експлицитни закључак о њеној одрживости.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Докторска дисертација Николе Лукића, маг. инж. маш., под насловом „Адаптивно спајање делова у технологији роботизоване монтаже применом кинематски редундантних робота“ је по свом тематском одређењу у истраживачком и научном смислу (инжењерске науке) високорелевантна за област производних технологија. Савремени роботски системи за монтажу, посебно у контексту нове производне парадигме кастомизоване и персонализоване производње, суштински зависе од решавања фундаментално битних проблема роботике у 21. веку, подједнако оних који се односе на механику робота, његове актуационе и сензорске системе, као и оних који се односе на когнитивне аспекте робота, почев од обраде сензорских сигнала (визуелних, тактилних, ...), па до напредних управљачких концепата који стварају нужне предуслове за постизање високог степена аутономије робота у његовој интеракцији са недовољно структурираним окружењем, односно, висок степен флексибилности / прилагодљивости, драматично виших перформанси у поређењу са оним које носи традиционално одређење појма флексибилности. Претходном треба додати и истраживачки готово неисцрпну област интеракције човека и робота, односно потребу за осмишљавање, теоријску разраду и практичну имплементацију битно напреднијих концепата двосмерне комуникације између човека и робота (виртуелна или проширена реалност, на пример), посебно узимајући у обзир концепт колаборативне роботике, односно директне физичко-когнитивне

интеракције човека и робота у извршавању радних задатака унутар такозваних хибридних производних система (производни системи са мешовитом и процесно преплетеном популацијом људи и робота). Претходно наведено има посебно велики значај за домен технологије монтаже, која по својој процесној природи представља најзахтевнију област примене индустријских робота. Степен удаљености од коначног исхода у развоју индустријских робота специјализованих за технологију монтаже, односно наше способности за изградњу индустријских хуманоида за област технологије монтаже, најсликовитије може да се сагледа кроз поређење технолошких перформанси савременог индустријског робота и човека у извршавању типичног задатака монтаже, а посебно задатка спајања делова. Насупрот чињеници да је роботска монтажа деценијама у фокусу истраживачких напора истраживачке заједнице која делује у области индустријске роботике, јаз је евидентан и он је велики. Стварна достигнућа, наша знања и способност да осмислимо и произведемо индустријске роботе који су упоредиви са технолошким перформансама човека, иако импресивна и сваким даном све већа, и даље битно заостају за оним што је неопходно да би се споменути јаз свео на прихватљиве размере. Овакво стање у области која је предмет ове дисертације је последица екстремних перформанси моторичког, сензорског и когнитивног система човека. Посматрано из истраживачког угла, битне су две чињенице. Прва је да узор постоји, и да он јасно одређује правце неопходних истраживања. Друга је да тај узор, својим перформансама одређује жељене и потребне домете тих истраживања, као и сигурност да су такви домети могући. Дакле, свако истраживање у области технологије индустријских хуманоида за домен технологије монтаже, које потенцијално води ка померању граница постојећег стање науке у области роботике и технологије роботске монтаже, нужно се мора сматрати актуелним и потребним. У прилог претходно наведеној квалификацији стоји низ чињеница које кандидат наводи и детаљно образлаже у првом поглављу, конкретно тачка 1.1 до 1.3 дисертације. Ту се, између осталог наводе и високорелевантни примери актуелних пројеката који се финансирају на простору Европске уније у оквиру такозваних ФП пројекта, односно петогодишњих стратешких програма за финансирање науке ЕУ.

Тематски фокус дисертације дефинисан је поставком четири истраживачке хипотезе, које су изведене из постављеног општег научног циљ докторске дисертације који је усмерен на допринос стварању новог генеричког теоријског знања и практичних искустава, неопходних за изградњу нове генерације роботских система за монтажу, применљивих у условима високоваријантне малосеријске и појединачне производње, у контексту који одређује нова производна парадигма масовне кастомизације. Поред општег, ова докторска дисертација има два посебна научна циља: 1) стварање нових генеричких знања неопходних за ефективно коришћење конфигурационог простора нуле кинематски редундантног робота за управљање својствима генерализоване крутости као технолошке величине која је конзистентна са процесом спајања, а коју робот остварује као секундарни (неконфликтни) управљачки задатак, и 2) допринос редефинисању постојећег концепта индустријског робота у смислу његове трансформације у концепт индустријских хуманоидних робота, специјализованих за домен технологије монтаже, а по својим перформансама, пре свега у понашању, способних да се приближе физичким и когнитивним перформансама човека у извођењу задатака спајања делова у технолошким системима за монтажу. Овако изабрани циљеви истраживања имају велики степен истраживачке и практичне актуелности, а по коришћеној методологији и продукованим резултатима садрже висок степен научно-истраживачке оригиналности.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Списак коришћених литературних извора кандидат наводи у посебном поглављу. Сви литературни извори су коректно наведени користећи препоручени стандард за цитирање, и обухватају репозиторијум од 274 радова из часописа и зборника конференцијских радова,

књига уско релевантних за област истраживања, као и релевантних стратешких развојних докумената. Овакав обим литературне базе указује на систематичност и студиозност у истраживачком приступу, свеобухватност, али такође представља и вредан допринос кандидата истраживаној области, јер наводи обухватају врло широк временски период, практично од седамдесетих година двадесетог века, до најновијих резултата објављених током 2021. године (још један показатељ актуелности истраживачке теме докторске дисертација. Све литературне јединце су коректно позиване у тексту дисертације, у одговарајућем контексту, коректно цитирајући ставове или чињенице које се у литературном извору наводе. Сходно Правилнику о поступку провере оригиналности докторских дисертација које се бране на Универзитету у Београду и налаза у извештају из програма iThenticate којим је извршена провера оригиналности докторске дисертације: „Адаптивно спајање делова у технологији роботизоване монтаже применом кинематски редувантних робота“, кандидата Николе Лукића, утврђено подударане текста износи до 1%, што најдиректније указује на коректност цитирања коришћене литературне базе и оригиналности спроведених истраживања.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У циљу доказивања или одбацивања полазних хипотеза, кандидат је применио следећи методолошки оквир квантитативне анализе феномена повезаних са предметом истраживања:

1. Аналитичке методе линеарне алгебре и општа теорија линеарних простора за анализу и синтезу: (а) сопственог система односно сопственог простора матрице генерализоване крутости манипулационог система, и (б) подпростора конфигурационог простора кинематски редувантног антропоморфног робота са припадајућим комплементарним операторима псеудоинверзије и пројектора – аналитичка инферентна машина за суперпозицију вишеструких управљачких захтева коришћењем конфигурационог простора нуле;
2. Општа теорија система и кибернетски концепт вишенивојских система управљања за примену кинематски редувантних антропоморфних робота у извршавању задатка спајања унутар технолошког система за монтажу – стратификација, хијерархијска организација и координација за дефинисање структуре задатка и решавање проблема симултаног неконфликтног испуњавања скупа процесних примитива;
3. Методе математичке оптимизације за проналажење оптималних или подоптималних (компромисних) решења вишекритеријумског модела технолошког задатка спајања дефинисаног као скуп процесних примитива са припадајућим функцијама циљева и ограничењима типа једнакости и неједнакости;
4. Методе дискретне компјутерске симулације за верификацију развијених управљачких алгоритама сопственог система матрице генерализоване крутости у конфигурационом простору нуле и за координацију кретања кинематски редувантног антропоморфног робота у симултаном неконфликтном извршавању скупа процесних примитива у технолошком задатку спајања делова;
5. Емпиријске методе истраживања и експерименталне верификације у циљу провере развијених теоријских модела и тестирања полазних хипотеза у реалним условима кроз спровођење одговарајућих експеримената под контролисаним лабораторијским условима;
6. Аналитичке методе нумеричке обраде сигнала (филтрација, спектар и спектрална анализа) за обраду сензорске информације о сили побуде и одзиву врха кинематски

редундантног робота са посебним фокусом на идентификацију оствареног елипсоида генерализоване крутости: (а) краткотрајна Фуријеова трансформација – СТФТ, и (б) дискретна вејвлет трансформација – DWT;

7. Метод реверзног инжењерства примењен на истраживање понашања човека у извршавању задатака монтаже – биомиметички приступ за пројектовање робота као кључног технолошког ентитета у системима за роботизовану монтажу;
8. Онтолошки приступ за изградњу знања у области технологије роботизоване монтаже, кроз фундаментална и конститутивна одређења скупа појмова и њихових релација на бази формалних репрезентација дефиниција, теорема и короларијума.

Примењене научне методе су адекватне тематском оквиру дисертације и у потпуности обезбеђују остваривање очекиваних научних доприноса, валидацију резултата експерименталних потврда развијеног теоријског оквира и такође, показују могућност њихове практичне, инжењерске примене кроз даљу разраду.

3.4. Применљивост остварених резултата

Пре свега, постављени истраживачки оквир дефинисан темом докторске дисертације и усвојеним скупом полазних истраживачких хипотеза, усмерен је на решавање конкретних практичних проблема повезаних са развојем нове генерације роботских система за домен нове генерације производних технологија дефинисан захтевима нове производне парадигме кастомизоване производње. Конкретно кандидат је истраживао питање управљања извршавањем задатка спајања у технологији роботске монтаже применом кинематски редундантних робота, и за такав истраживачки оквир изградио аналитички инструментаријум који омогућава да се поред управљања кретањем врха роботске руке дуж трајекторије спајања симултано управља својствима крутости, што је од суштинског значаја за успешан ток процеса спајања. Овај аналитички инструментаријум, базиран на примени линеарне алгебре, омогућава синтезу конкретних управљачких алгоритама који су практично применљиви, а њихову применљивост и практичну вредност кандидат је показао кроз експериментална истраживања која су поред симулационих компјутерских експеримената обухватила и лабораторијске експерименте на физичком редундантном роботу са системом управљања отворене архитектуре. Физички експерименти су показали пуну практичну изводљивост (применљивост на реални роботски систем) и, подједнако битно, потврдили реалну физичку валидност развијене теорије и нових управљачких алгоритама који су из ње формулисани. Кључно је да се констатује да ти алгоритми омогућавају паралелно и неконфликтно извршавање примарног задатка – кретање роботске руке по задатој трајекторији и извршавање секундарних задатака, пре свега задатка управљања својствима генерализоване крутости врхом робота као нове, и за процес спајања, фундаментално значајне процесне променљиве. Практична примена оваквих алгоритама је квалитативно нови продор у праксу индустријских робота и према сазнањима комисије и ментора, представљају потпуно оригиналан допринос, на основу којег је могућ даљи инжењерски рад на развоју нове генерације робота за монтажу, односно индустријских хуманоида за монтажу за примену у реалним условима индустријске производње. У овом контексту, посебно је вредно нагласити да је кандидат експерименталним потврдама истовремено потврдио и применљивост концепта крутости конфигурационог простора нуле кинематски редундантних робота и математичког инструментаријума синтезе комплементарних пројектора као физички употребљивог конструкта, велике практичне вредности.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

На основу увида у достављени текст докторске дисертације, чланови Комисије су уверени да је кандидат Никола Лукић током израде докторске дисертације показао способност да

самостално препозна и систематски истражује и решава инжењерске и научне проблеме, да ефективно препознаје и користи литературне и друге релевантне изворе и примењује савремене научне методе и технике планирања и спровођења експерименталних истраживања. Остварени резултати несумњиво показују способност кандидата за самосталан и успешан научно-истраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Темељна и опсежна истраживања у овој докторској дисертацији, као и резултати који су унутар тих активности проистекли, изведена су кроз оквир провере и доказивања постављене четири полазне хипотезе. Теоријска истраживања и остварени резултати постигнути су применом усвојеног методолошког оквира дефинисаног са осам методолошких приступа, а кључни резултати верификовани су експериментално, (а) виртуелно компјутерском симулацијом и (б) физички, на лабораторијској платформи коју су чинили кинематски редундантни индустријски робот Yaskawa SIA10F са управљачким системом FS100, софтверска платформа отворене архитектуре MotoPlus SDK и припадајућим API окружењем, уз примену ласерског микрометра високе прецизности Micro-Epsilon ODC2520-46 за квантитативну идентификацију кључних облика понашања роботске руке спроведеним експерименталним радњама. Конкретно, кроз ову докторску дисертацију остварени су следећи кључни резултати за које се, према процени Комисије, може основано тврдити да представљају оригиналне доприносе кандидата научној области производног машинства/инжењерства.

Основни научни допринос:

Поставка аналитичке базе којом се доказује да конфигурациони простор нуле кинематски редундантног антропоморфног манипулационог робота садржи најмање једну конфигурацију која до тачности произвољног скаларног множиоца генерише произвољни сопствени систем матрице генерализоване крутости придружене произвољно изабраној тачки врха робота, уз очување кинематске конзистентности примарног задатка манипулације роботског система за монтажу.

Овај научни допринос је саопштен јавности кроз публикувани рад у часопису категорије M22: Lukic, N. and Petrovic, P. (2019), "Complementary projector for null-space stiffness control of redundant assembly robot arm", Assembly Automation, Vol. 39 No. 4, pp. 696-714, Emerald Insight, ISSN: 0144-5154, <https://doi.org/10.1108/AA-10-2018-0163> чиме је кандидат испунио законски услов по овом основу.

Остали научни доприноси:

Доприноси садржани у тексту дисертације који нису публикувани у часописима категорије M2x, а несумњиво садрже конкретне, оригиналне и значајне резултате за област технологије роботске монтаже, па сходно томе представљају допринос научној мисли:

1. Аналитички модел сопственог система матрице генерализоване крутости којим се потпуно и једнозначно одређују кинетостатичка својства хипотетичког манипулационог система, конзистентног са успешном реализацијом произвољног нетривијалног случаја процеса квази-статичког спајања пара конформних недеформабилних објеката.
2. Поставка и разрада опште методологије за интерпретацију роботског система за монтажу којом се доказује и демонстрира да је кибернетски концепт хијерархијског организовања и координације вишенивојских стратификованих система довољан формални оквир за: (а) моделирање и анализу, (б) синтезу закона управљања симултаног

неконфликтног извршавања произвољног скупа међусобно спрегнутих процесних примитива у оквиру технолошког система за роботску монтажу.

3. Поставка и разрада аналитичког инструментаријума којим се формално-консеквентно показује да неконфликтно управљање сопственим системом матрице генерализоване крутости кинематски редувантних антропоморфних манипулационих робота у контексту који је дефинисан претходно наведеним кључним резултатима дисертације од 1 до 3, а за категорички услов применљивости у реалном времену, намеће императив екстензије аналитичких оптимизационих метода ка простору метахеуристике и машинског учења.
4. Поставка, разрада и примена методологије за експерименталну верификацију (симулациону и физичку) наведених кључних резултатима дисертације од 1 до 3.

Резултати од 1 до 5 су синтетички и обухватају низ подрезултата (аналитички модели, дефиниције, докази, алгоритамске структуре и слично) који су њихови базни градивни блокови, а по себи већина од њих представља оригинални допринос кандидата предмету истраживања.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Референцирајући се на релевантне садржаје у тексту доктората, даље се наводи критичка анализа претходно побројаних остварених резултата истраживања.

Основни научни допринос – Истраживање конфигурационог простора нуле је такође тема која је у истраживачком смислу повезана са настанком роботике као научне дисциплине. Међутим, стање ствари по том питању је далеко од тога да је та теме истраживачки исцрпљена. Напротив, она је и даље актуелна и добија на додатној актуелности са појавом нове генерације колаборативних робота, који теже ка кинематски и актуационо редувантним решењима. Научни допринос кандидата по овом питању је у поставци и примени аналитичке базе којом се доказује да конфигурациони простор нуле кинематски редувантног антропоморфног манипулационог робота садржи најмање једну конфигурацију која до тачности произвољног скаларног множиоца генерише произвољни сопствени систем матрице генерализоване крутости придружене произвољно изабраној тачки врха робота, уз очување кинематске конзистентности примарног задатка манипулације роботског система за монтажу. То је изузетно вредан научно-теоријски допринос! Он формално консеквентно нуди аргументацију тврдњи да работи нове генерације, специјализованих за задатке монтаже, нужно морају да буду кинематски редувантни, у мери у којој је и људска рука кинематски редувантна, или хипер-редувантна, такође, како би се задовољили захтеви за капацитетом конфигурационог простора нуле. Кроз теоријска истраживања, представљена доминантно у трећој глави, остварени су следећи партикуларни резултати и доприноси:

- 1) Анализа фундаменталних приступа и алтернативних метода за решавање кинематске преодређености, подпоглавља 3.1.1 и 3.1.2., одакле је као функционално конзистентан оквир одабран модел комплементарних кретања, (3.9), са партикуларном и хомогеном компонентом, δqP и δqN ;
- 2) Синтеза комплементарних подпростора слике, $R(J^T)$, KPS , и нуле, $N(J)$, KPN , укупног KPR , као аналитичка основа за примену одабраног модела комплементарних кретања и моделирање инверзног линеарног пресликавања. Синтеза је изведена применом метода редуковане степенасте форме, подпоглавље 3.2.1, (3.19) до (3.22) и применом метода декомпозиције Јакобијан матрице на компоненте сопственог система, подпоглавље 3.2.2, (3.23) до (3.29).
- 3) Моделирање инверзног линеарног пресликавања, изведено на бази екстензивног инструментаријума линеарне алгебре: а) псеудоинверзија $J(q)$, кореспондентна партикуларној компоненти, подпоглавље 3.3.1, изрази (3.30) до (3.50); и

б) комплементарни пројектор, који је кореспондентан хомогеној компоненти модела комплементарних кретања, подпоглавље 3.3.2, изрази (3.51) до (3.59).

- 4) Формулација улоге комплементарног пројектора за управљање кинетостатичким својствима кинематски редундантног манипулационог система, односно за избор ортогоналног комплемента унутар KPN кореспондентног произвољном сопственом систему Kx .

Посебно је значајно да се истакне да је овај научни допринос експериментално потврђен, при чему су експерименталне провере ове врсте, према најбољим сазнањима Комисије јединствена, јер их је врло тешко експериментално спровести. Користећи опрему која је расположива у Лабораторији за кибернетику и мехатронске системе (CMSysLab), Катедре за производно машинство Машинског факултета Универзитета у Београду, кандидат је изградњом сложеног софтверског апарата успешно остварио продор у ову врсту мерења, а затим и кроз добијене експерименталне резултате показао да се добијена понашања физичког роботског система (механика и управљачки систем робота) понашају у складу са постављеним математичким моделима. Експериментална истраживања ове врсте су посебан научни допринос, по себи.

Остали научни доприноси:

Допринос 1 – Тема генерализоване крутости манипулационог система у контексту роботизованог спајања је предмет вишедеценијских истраживања која се у континуитету спроводе до данашњих дана, са циљем свеобухватног разумевања еластомеханичког својства манипулационог система које је од фундаменталног значаја за роботизацију процеса спајања. Научни допринос кандидата је у примени модерног аналитичког приступа базираног на теорији линеарне алгебре, којим се у ову област уводи врло генерални, али теоретски најсадржајнији концепт сопственог система матрице, у овом конкретном случају матрице генерализоване крутости, којим се формално консеквентно долази до оних својства крутости хипотетичког манипулационог система која су конзистентна са успешном реализацијом произвољног нетривијалног случаја процеса квази-статичког спајања пара конформних недеформабилних објеката. Овакав формални приступ је потпуна новост, и зато се нужно мора посматрати као вредан научни допринос. Други научни допринос кандидата повезан са овим је у поставци једног комплетног модела, који као такав до сада није био изведен. Тај модел је базиран на следећим градивним блоковима:

1. Анализа и генерализација кинетостатичких својстава хипотетичког манипулационог система, представљаних матрицом генерализоване крутости, Kx , која је у општем просторном случају формулисана као физички нехомогена композитна блок матрица, са спрегнутим поддоменима;
2. Математичко моделирање матрице Kx изведено на бази инверзне конгруентне трансформације (2.15), као функција матрице актуационе крутости и псеудоинверзије Јакобијанове матрице кинематски редундантне роботске руке, односно функција крутости зглобова и конфигурације;
3. Формулација Kx на бази њеног сопственог система, (2.16) и (2.17), и припадајућих елипсоида крутости који у потпуности репрезентују својства крутости кинематски редундантне роботске руке, слика 2.13;
4. Формулација угла кодирекционалности вектора силе побуде и одзива TCP , φ , (2.19), и формулација угла ротације елипсоида Kx у односу на простор TZ , θ , (2.17). Углови φ и θ представљају кинетостатичка својства која посредно репрезентују спрезање сопственог система матрице Kx ;
5. Анализа генерализоване крутости као процесне величине у задатку спајања на примеру RCC , слика 2.15, идентификација својстава конзистентних са успешном реализацијом произвољног нетривијалног случаја процеса спајања, матрица $KRCC$,

(2.22), која је дијагоналне форме, и идентификован је њен сопствени систем репрезентован припадајућим елипсоидима транслаторне и ротационе крутости, који су квази-изотропног облика, слика 2.16.

Посебно је значајно да се истакне да је кандидат експериментално верификовао да матрица генерализоване крутости, која је моделирана инверзном конгруентном трансформацијом, односно њен припадајући сопствени систем репрезентован елипсоидом крутости, потпуно једнозначно одређује кинетостатичка својства манипулационог антропоморфног кинематски редувантног роботског система, и последично у једнозначну корелацију доводи силу побуде врха роботске руке са кореспондентним одзивом у форми помераја и припадајућим углом кодирекционалности.

Допринос 2 – Овај допринос кандидата састоји се у потпуно оригиналаном приступу дефинисања теоријских основа технолошког процеса роботизоване монтаже, којим се роботски систем за монтажу описује као кибернетски конструкт базиран на концепту хијерархијски организованог и координираног вишенивојског / стратификованог система. Оваквим формалним оквиром уређује се у општем смислу укупни истраживачки простор одређен тематским оквирима дисертације и тиме поставља општа основа за моделирање и анализу, и посебно битно, синтезу закона управљања симултаног неконфликтног извршавања произвољног скупа међусобно спрегнутих процесних примитива у оквиру технолошког система за роботску монтажу. Овај допринос је детаљно образложен у оквиру четвртог поглавља. Његовом применом се обједињују аналитички модели продуктовани у научном доприносу 1 и 2, а такође отвара простор да се даљом разрадом изведу резултати збирно обухваћени научним доприносом 4. Партикуларни резултати у оквиру овог научног доприноса су следећи:

- 1) Кибернетска формализације разматраног феномена, где је технолошки задатак препознат и дефинисан као комплексна хијерархијска структура, обухваћен је у поглављу 4.1 уз формализацију и моделирање следећих градивних блокова: а)технолошки задатак, TZ , као скуп процесних примитива (Дефиниција 4.1), б)процесни примитив (Дефиниција 4.2), в)транспарентност TZ као мера информационе пропустљивости (Дефиниција 4.3), г)кибернетска репрезентација комплексног TZ , д)стратификација и препознавање TZ као инхерентно вишециљне, паралелне структуре, слика 4.4, њ)интеракција, спрезање, конфликти и контрадикција $OP\#x$, е)координација (Дефиниција 4.4), модел функције координације, слика 4.5 и појам координабилности TZ (Дефиниција 4.5); На основу претходног успостављени су следећи формални конструкти: а)општи формализам хијерархијске организације технолошког задатка роботизованог спајања, TZS ; б)математичка формулација глобалног циља TZS , израз (4.1); в)К-функција TZS , фокусирана на симултано извршавање скупа $OP\#x$ применом кинематски редувантних робота (Теорема 4.1 и Короларијуми 4.1 и 4.2); г)Моделирање хијерархијске структуре TZS за изабрани скуп процесних примитива, слика 4.6, укључујући примарни и секундарни хијерархијски ниво.
- 2) Математичка формулација процесних примитива примарног и секундарног хијерархијског нивоа, кроз припадајуће функције циљева и њихове градијенте, садржана је у поглављу 4.2, што је обухватило следеће: а)примарни процесни примитив манипулације објеката који се спајају унутар простора TZS , $OP\#P$, подпоглавље 4.2.1, изрази (4.3) до (4.7), укључујући формулацију простора TZS и математичко моделирање припадајућег структурно сложеног пресликавања, (4.8) до (4.10), слика 4.9; б)синтеза варијантних функција циљева технолошког процесног примитива, $OP\#T$, подпоглавље 4.2.2, где су обухваћени интегрални и партикуларни приступи, изрази (4.17) до (4.25); г)Синтеза функција циљева системских процесних примитива, $OP\#S$, поглавље 4.2.3: 1)избегавање граница радног простора, $OP\#S_1$,

(4.26) до (4.33), 2)избегавање сингуларних конфигурација, $OP\#S_2$, (4.34) до (4.45); 3)избегавање колизионих стања, $OP\#S_3$, (4.46) до (4.50); 4)компензација гравитационе силе, $OP\#S_4$, (4.51) до (4.54); 5)динамичка стабилност, $OP\#S_5$, где су обухваћена три алтернативна модела, изрази (4.55) до (4.58), уз графичку интерпретацију, слика 4.14.

- 3) Доказ довољности формалног оквира кибернетског концепта координације за синтезу закона управљања представљен у поглављу 4.3, где су унутар подпоглавља 4.3.1 и 4.3.2, формализована следећа питања: а)ограниченост капацитета простора интеракције, изражено коефицијентом Ψ , (4.59) до (4.61); б)конфликтност процесних примитива укључујући испитивање и квантификовање њиховог релативног односа, слика 4.15, Ω -функција, изрази (4.62) до (4.65); в)спрезање између хијерархијских нивоа TZS , посебно у контексту KPR и простора TZS , (4.66), слика 4.16; г)инструментаријум за остваривање K -функције, примена интегралних и релативних пројектора, (4.67) до (4.70); д)аналитичка партиција KPN , синтеза парцијалних пројектора (Дефиниција 4.5), изрази (4.71) до (4.73), укључујући концепт контекстно сензитивне приоритизације (Дефиниција 4.6), одакле даље следи утемељење симултаног неконфликтног извршавања скупа $OP\#x TZS$ (Теорема 4.2 и Короларијум 4.3); д)адитивност парцијалних пројектора, израз (4.74), која је присутна само у случају постојања вишеструке кинематске редундансе робота (Теорема 4.3); њ)инструмент повратне спреге K -функције за случај аналитичке партиције KPN , ΩN -функција, (4.75) и (4.76);
- 4) Алгоритми координације односно закона управљања; Синтеза извршена у подпоглављу 4.3.3 и то на основу претходних утемељења (1)-(3). Варијантни алгоритми координације, који су у општем случају базирани на методолошком оквиру вишекритеријумске оптимизације са ограничењима типа једнакости и неједнакости, у функционалном смислу су засновани на инструментаријуму пројектора, а суштински се односе на израчунавање хомогене компоненте у моделу комплементарних кретања.

Синтетисана су три варијантна алгоритма, уз подалгоритамске структуре за фузију компонената кретања, остваривање хармоније и компромисних решења индивидуалних циљева процесних примитива: а) $K_TZS\#1$, секција 4.3.3.1, заснован је само на интегралном пројектору, универзално је применљив независно од расположивог капацитета KPN , најједноставнији је са аспекта рачунске комплексности, међутим не узима у обзир разрешавање питања конфликтности на експлицитан начин, већ у имплицитном облику врши приоритизацију и транзицију активности скупа $OP\#x TZS$; б) $K_TZS\#2$, секција 4.3.3.2, заснован је на интегралном и релативним пројекторима, на експлицитан начин разрешава питања конфликтности кроз приоритизацију и одређивање релативног односа градијената процесних примитива, али је посебно изражена структурна сложеност и последично рачунска комплексност; в) $K_TZS\#3$, секција 4.3.3.3, заснован је на парцијалним пројектора, његова примена је ограничена на случајеве вишеструке кинематске редундансе робота, а комплексност овог алгоритма посебно је изражена у сложености аналитичког модела, што се неизоставно рефлектује и на рачунску комплексност.

Допринос 3 – Овај допринос је имплицитно садржан у научним доприносима 1 до 3, и изводи се додатном метриком над теоријским аналитичким формулацијама, из којих производе сазнања о обиму потребних израчунавања за антропоморфне кинематски редундантне роботе и одатле извођење закључка да су неопходни метахеуристички приступи и приступи базирани на машинском учењу како би се развијени модели применили у условима рада физичког роботског система у реалном времену.

Допринос 4 – Овај допринос је детаљно приказан у поглављу 5, а по себи представља јединствени пример експерименталног истраживања конфигурационог простора нуле, којим је обухваћен развој наменске експерименталне платформе и експериментална методологија за верификацију основног научног доприноса дисертације и осталих доприноса наведених под тачком 1 и 2 овог извештаја.

4.3. Верификација научних доприноса

Резултати остварени у оквиру докторске дисертације кандидата Николе Лукића су објављени у следећим радовима, публикованим у мултиауторским монографским књигама, часописима и зборницима са научних конференција:

M14 Poglavlje u knjizi M12 (monografija međunarodnog značaja)

1. Rodic, A., Pislá, D., Bleuler, H. (Eds.), "New Trends in Medical and Service Robots", Chapter 3: Petrović, P.B., **Lukić, N.**, Danilov, I., "Robot-Assisted 3D Medical Sonography", Challenges and Solutions, Series: Mechanisms and Machine Science, Vol. 20, Springer, 2014., ISBN 978-3-319-05430-8, DOI: 10.1007/978-3-319-05431-5_4

M22 Radovi u istaknutim međunarodnim časopisima

2. **Lukić, N.** and Petrović, P. (2019), "Complementary projector for null-space stiffness control of redundant assembly robot arm", Assembly Automation, Vol. 39 No. 4, pp. 696-714, Emerald Insight, ISSN: 0144-5154, <https://doi.org/10.1108/AA-10-2018-0163>

M24 Radovi u nacionalnim časopisima međunarodnog značaja

3. Petrović, P.B., **Lukić, N.**, "Configuration-based Compliance Control of Kinematically Redundant Robot Arm, Part I - Theoretical framework", FME Transactions, 2017, Vol. 45, No.4, pp: 468-474, ISSN 1451-2092(print), 2406-128X(online), DOI:10.5937/fmet1704468P.

M33 Saopštenja sa međunarodnog skupa štampano u celini (na engleskom)

4. Petrović, P.B., **Lukić, N.**, Danilov, I., Miković, V., "Canonisation of actuation stiffness matrix in kinematically redundant industrial humanoid robots", 11th INTERNATIONAL Scientific Conference MMA 2012 - Advanced Production Technologies, Automatic flexible technological systems, CAx and CIM procedures and systems, Novi Sad, September 2012, page: 281.-284., ISBN 978-86-7892-419-4, COBISS.SR-ID 273838087.
5. **Lukić, N.**, Petrović, P.B., Danilov, I., "Variable stiffness actuator design for intrinsically compliant and backdrivable industrial humanoid robot", Proceedings, 35th International Conference on Production Engineering, Faculty of Mechanical and Civil Engineering in Kraljevo, University of Kragujevac, September, 25-28. 2013.
6. Petar B. Petrović, **Nikola Lukić** and Ivan Danilov, Compliant behavior of redundant robot arm - experiments with null-space, Proceedings of 1st International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering, IcEtran 2014, Vrnjačka Banja, Serbia, June 2.– 5., 2014., pp. ROI1.2. 1-6, ISBN 978-86-80509-70-9.

(Organizator IcETRAN konferencije je ovaj rad nagradio kao najbolji rad u sekciji za robotiku za 2014. godinu – Best paper award in robotics for 2014)

7. Petrović, P., **Lukić, N.**, Danilov, I.: Configuration Based Compliance Control of Industrial Humanoids, Proceedings of the 17th International Multiconference, INFORMATION SOCIETY – IS 2014, Volume F ROBOTICS, October 2014, Ljubljana, Slovenia, pp. 25-29.
8. **Nikola Lukić**, Petar B. Petrović, Aron Alba, Ivan Danilov, "Real-Time Adaptation of Robot Constrained Motion Based on Discrete Tactile Feedback Guidance", Proceedings of 2nd International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering, IcEtran 2015, Silver Lake, Serbia, June 8 – 11., 2015., pp. ROI2.6 1-6, ISBN 978-86-80509-71-6.
9. F. Sorgini, G. A. Farulla, **N. Lukić**, I. Danilov, L. Roveda, M. Milivojević, T. B. Pulikottil, M. C. Carrozza, P. Prinetto, T. Tolio, C. M. Oddo, P. B. Petrović, B. Bojovic, Tactile sensing with gesture-controlled collaborative robot, Proceedings of 2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT (MetroInd4.0&IoT), ISBN: 978-1-7281-4891-5, pp.364-368 online 3-5. June 2020. DOI: [10.1109/MetroInd4.0IoT48571.2020.9138183](https://doi.org/10.1109/MetroInd4.0IoT48571.2020.9138183)

M52 Rad u časopisu nacionalnog značaja

10. Petrović, P.B., **Lukić, N.**, Danilov, I., Miković, V., "Canonisation of actuation stiffness matrix in kinematically redundant industrial humanoid robots", Journal of Production Engineering, Vol. 16, No.1, pp: 43-46, Novi Sad, 2013, ISSN 1821-4932.
11. Petrović, P.B., **Lukić, N.**, Danilov, I., "Compliant Behaviour of Redundant Robot Arm - Experiments with Null-Space", Serbian Journal of Electrical Engineering, Vol. 12, No.1, pp: 81-98, February 2015., ISSN 1451-4869, COBISS.SR-ID 111412236.

M63 Saopštenja sa skupa nacionalnog značaja štampano u celini

12. **Lukić, N.**, Petrović, P., Danilov, I., "Optimizacija senzora sile mekog zgloba industrijskog humanoidnog robota sa upravljanim popustljivošću za zadatke robotizovanog spajanja delova", Zbornik radova 38. JUPITER konferencija, 34. simpozijum NU-ROBOTI-FTS, Beograd 2012, str. 3.118-3.125, ISBN: 978-86-7083-757-7
13. Petrović, P., **Lukić, N.**, Danilov, I., "Industrijski humanoidi - novi koncept robota za kolaborativni rad čovek-mašina u sistemima za robotsku montažu", Zbornik radova 38. JUPITER konferencija, 34. simpozijum NU-ROBOTI-FTS, Beograd 2012, str. 3.126-3.139, ISBN: 978-86-7083-757-7
14. Danilov, I., Petrović, P., **Lukić, N.**, "Eksperimentalna instalacija za ultra brzu optičku triangulaciju struktuirane svetlosti u robotizovanoj montaži", Zbornik radova 38. JUPITER konferencija, 34. simpozijum NU-ROBOTI-FTS, Beograd 2012, str. 3.140-3.148, ISBN: 978-86-7083-757-7.
15. Petrović, P., **Lukić, N.**, Danilov, I., Miković, V., "Pseudoinverzija Jakobijana dijagonalizacijom aktuacione matrice krutosti kinematski redundantnog industrijskog humanoida", Zbornik radova 56. Konferencije za ETRAN, Zlatibor, 11-14. juna 2012., RO1.5, str. 1-4.
16. Petrović, P., **Lukić, N.**, Danilov, I., "Eksperimenti sa mekim zglobovima industrijskog humanoida", Zbornik radova 57. Konferencije za ETRAN, Zlatibor, 3-6. juna 2013., RO1.2, str. 1-6. ISBN: 978-86-80509-68-6.

(Organizator ETRAN konferencije je ovaj rad nagradio kao najbolji rad u sekciji za robotiku za 2013. godinu)

17. **Lukić, N.**, Petrović, P.B., Danilov, I., "Aktuator promeljive krutosti", Zbornik radova 39. JUPITER konferencija, 35. simpozijum NU-ROBOTI-FTS, Beograd 2014, str. 3.83-3.90, ISBN: 978-86-7083-838-3.
18. **Lukić, N.**, Petrović, P.B., Matijašević, L., "Konceptualni aspekti krutosti konfiguracionog prostora nule relevantni za proces robotizovanog spajanja", Zbornik radova 42. JUPITER konferencije, 38. simpozijum NU-ROBOTI-FTS, Beograd, Oktobar 2020, ISBN 978-86-6060-055-6, str. 3.94-3.99
19. Matijašević, L., Petrović, P., **Lukić, N.** "Podaktuirani sistemi za robotsko hvatanje i manipulaciju objektima u tehnologiji robotske montaže – Razvoj CMSysLab robotske šake", Zbornik radova 42. JUPITER konferencije, 38. simpozijum NU-ROBOTI-FTS, Beograd, Oktobar 2020, ISBN 978-86-6060-055-6, str. 3.100-3.105

Поред претходно наведених резултата, кандидат је кроз практичну примену у лабораторијским условима остварио 9 техничких категорије М85.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу детаљног прегледа докторске дисертације, Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације констатује да је докторска дисертација под називом „**Адаптивно спајање делова у технологији роботизоване монтаже применом кинематски редундантних робота**“ кандидата **Никола Лукић**, маг. инж. маш., урађена према свим стандардима у научно-истраживачком раду, као и да **испуњава све услове предвиђене Законом о високом образовању** и да је у складу са Статутом и Правилником о докторским студијама Машинског факултета Универзитета у Београду. На основу резултата и закључака приказаних у докторској дисертацији, Комисија констатује да је кандидат Никола Лукић, маг. инж. маш., успешно завршио докторску дисертацију у складу са предвиђеним предметом и постављеним циљевима истраживања и да докторска

дисертација представља оригинални научни рад са научним доприносима у научној области Машинско инжењерство, ужа научна област Производно машинство. Кандидат је кроз спроведена истраживања дошао до оригиналних научних резултата који су успешно експериментално верификовани и који се могу применити у инжењерској пракси.

Имајући у виду све наведено, Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације предлаже Наставно-научном већу да се докторска дисертација под називом „**Адаптивно спајање делова у технологији роботизоване монтаже применом кинематски редувантних робота**“ кандидата **Николе Лукића**, студента Докторских студија, прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

У Београду, 23.05.2022, године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....
Проф. др Петар Б. Петровић,
Универзитет у Београду, Машински факултет

.....
Проф. др Бојан Бабић,
Универзитет у Београду, Машински факултет

.....
Проф. др Никола Славковић,
Универзитет у Београду, Машински факултет

.....
Др Александар Родић, научни саветник,
Институт Михајло Пупин, Београд

.....
Проф. др Стеван Станковски,
Факултет техничких наука, Нови Сад