

Факултет МАШИНСКИ

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

Образац 1.

1797/4
(Број захтева)

Већу научних области техничких наука
(Назив стручног већа коме се захтев упућује, сагласно
Члану 6. и чл. 7 став 1. овог Правилника)

30.10.2014.
(Датум)

ЗАХТЕВ
за давање сагласности на предлог теме докторске дисертације

Молимо да сходно чл. 46. ст.5. тач.3. Статута Универзитета у Београду („Гласник Универзитета“, број 131/06), дате сагласност на предлог теме докторске дисертације

АДАПТИВНО СПАЈАЊЕ ДЕЛОВА У ТЕХНОЛОГИЈИ РОБОТИЗОВАНЕ МОНТАЖЕ
ПРИМЕНОМ КИНЕМАТСКИ РЕДУНДАНТНИХ РОБОТА

(пун назив предложене теме докторске дисертације)

НАУЧНА ОБЛАСТ Производно машинство

ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ:

1. Име, име једног родитеља и презиме кандидата: НИКОЛЕ (АЛЕКСАНДАР) ЛУКИЋА

2. Назив и седиште Факултета на коме је стекао високо образовање: Машински факултет Београд

3. Година дипломирања: 2010.

4. Назив магистарске тезе кандидата: /

5. Назив Факултета на коме је магистарска теза одбрањена: /

6. Година одбране магистарске тезе: /

7. Назив Факултета на коме је кандидат уписао докторске студије: Машински факултет Београд

Одсек, смер или група: /

Година уписа докторских студија: 2010.

Обавештавамо Вас да је Наставно-научно веће Факултета
(назив надлежног тела Факултета)

на седници одржаној 30.10.2014
размотрило предложену тему и закључило да је тема подобна за израду докторске дисертације.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Проф.др Милорад Милованчевић

Прилог:

1. Предлог теме докторске дисертације са образложењем.

2. Акт надлежног тела факултета о подобности теме за израду докторске дисертације.

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ -

Број: 1797/4

Датум: 30.10.2014. године

Београд, Краљице Марије 16

На захтев **Николе Лукића, дипл.инж.маш.-мастер**, бр. 1729/1 од 15.09.2014. године, извештаја Комисије у саставу: проф.др Петар Петровић, проф.др Бојан Бабић, проф.др Љубодраг Тановић, доц.др Живана Јаковљевић и проф.др Стеван Станковски, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, број 1797/3 од 28.10.2014. године, а на основу чл. 30 Закона о високом образовању и чл. 30 Правилника о докторским студијама Машинског факултета Универзитета у Београду, Наставно-научно веће Машинског факултета у Београду на седници од 30.10.2014. године, донело је следећу

ОДЛУКУ

Прихвата се предлог о испуњености услова и о научној заснованости теме докторске дисертације **«АДАПТИВНО СПАЈАЊЕ ДЕЛОВА У ТЕХНОЛОГИЈИ РОБОТИЗОВАНЕ МОНТАЖЕ ПРИМЕНОМ КИНЕМАТСКИ РЕДУНДАНТНИХ РОБОТА»** докторанта **НИКОЛЕ ЛУКИЋА, дипл.инж.маш.-мастер**

За ментора докторанту Николи Лукићу, именује се **проф.др Петар Петровић**.

Одлуку доставити: Већу Научних области техничких наука Универзитета у Београду на сагласност, ментору и архиви.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Проф.др Милорад Милованчевић

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

Машински факултет

ВЕЋУ ДОКТОРСКИХ СТУДИЈА

Предмет: Подобност теме и кандидата студента докторских студија **Николе Лукића**,
дипл. маш. инж. - мастер за израду докторске дисертације

На основу пријаве за израду докторске дисертације студента докторских студија Николе Лукића, дипл.маш.инж. - мастер број 1729/1 од 15.09.2014. године, сагласности Катедре за производно машинство број 1797/1 од 26.09.2014. године и одлуке Наставно-научног већа Машинског факултета Универзитета у Београду број 1797/2 од 02.10.2014. године именовани смо за чланове Комисије за подношење извештаја о прихватању теме докторске дисертације докторанта студента докторских студија Николе Лукића, дипл.маш.инж. - мастер.

На основу увида у документацију коју је студент докторских студија Никола Лукић, дипл.маш.инж. - мастер, приложио уз свој Захтев за израду докторске дисертације, Комисија подноси следећи

РЕФЕРАТ

о прихватању теме докторске дисертације под насловом:

Адаптивно спајање делова у технологији роботизоване монтаже применом кинематски редундантних робота

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Име и презиме: Никола А. Лукић
Датум рођења: 22. мај 1986.
Место рођења: Београд, Савски венац
Адреса становања: Репишка 58/1, Чукарица, Београд
Контакт телефон: 062/225-999
Електронска пошта: nlukic@mas.bg.ac.rs
lukic2205@yahoo.com

Образовање:

- 2001 – 2005. Машинска школа "Радоје Дакић", Београд, Смер: Машинство и обрада метала – техничар нумерички управљаних машина алатки.
- 2005 – 2008. Основне академске студије, Машински факултет Универзитета у Београду, Производно машинство (просечна оцена током студирања 7,93). Завршни рад одбранио са оценом 10.
- 2008 – 2010. Мастер академске студије, Машински факултет Универзитета у Београду, Производно машинство (просечна оцена током студирања 9,60).
2010. – Дипломирани инжењер машинства. Дипломирао 07. октобра са оценом 10 и укупном просечном оценом током студирања 8,76. Тема дипломског (мастер) рада: CNC обрадни систем за резање челичних плоча плазмом - синтеза и симулација управљачког система отворене архитектуре.
2010. – Уписао 05. новембра докторске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду, број индекса Д24/10.

Од 01. јануара 2011. године запослен на Машинском факултету Универзитета у Београду као сарадник на пројекту технолошког развоја под називом: "Интелигентни роботски системи за екстремно диверзификовану производњу", који финансира Министарство за просвету, науку и технолошки развој Републике Србије. Руководилац пројекта проф. др Петар Б. Петровић, идентификациони број TP35007.

Одлуком Наставно-научног већа Машинског факултета Универзитета у Београду, од 20. јуна 2014., изабран у звање "истраживач сарадник".

Усавршавање на Техничком Универзитету у Цириху, септембар 2013. године, у области когнитивне роботике, у организацији европског пројекта "Extending Sensorimotor Contingencies to Cognition" (eSMCs), под називом "eSMCs Summer School on Embodiment and Morphological Computation".

1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Студент докторских студија Никола Лукић је активно учествовао у свим истраживачко-развојним активностима реализације пројекта TP35007 – "Интелигентни роботски системи за екстремно диверзификовану производњу", који финансира ресорно министарство за науку и технолошки развој за период 2011 до 2015. године, на којем је кандидат ангажован млади докторант. Поред дела заједничких послова, ангажовање кандидата је било посебно фокусирано на тематски оквир његове докторске тезе, а то су нови концепти робота за аутоматску монтажу базирани на кооперативном и тимском раду човек-робот на производним линијама нове генерације.

Никола Лукић је активно учествовао у делу конципирања, пројектовања, физичке реализације и спровођења експеримената на реализацији управљивог попустљивог зглоба, као основног модула за грађење индустријских хуманоида. У реализацији ових задатака Никола Лукић је користио савремене инжењерске алате (CAx) и различите развојне платформе за програмирање микроконтролера који су изабрани за хардверску основу на којој су спроведена истраживања лабораторијског типа са циљем практичне демонстрације постављених хипотеза и развијених теоријских модела. Спроведене активности су у свему имале високу техничку и научну комплексност и мултидисциплинарност, која је захтевала практичну примену различитих инжењерских техника, од машинског конструисања, па до физичке реализације управљачког система базираног на микроконтролерима и развоја различитих софтверских модула за обраду сензорских информација у реалном времену. Експериментални прототип управљивог попустљивог зглоба је у свему мехатронски систем

високог степена техничке сложености и у потпуности је резултат самоградње и сопствених знања кандидата Николе Лукића и тима истраживача на пројекту TP35007.

Студент докторских студија Никола Лукић је такође активно радио на задацима везаним за интеракцију са индустријом и то: 1) активности пројектовања CNC система за плазма резање за потребе компаније ИКАРБУС (партиципант на пројекту TP35007), 2) реализација микро електромеханичког сензорског система за аквизицију понашања човека у извођењу операције спајања у оквиру технологије монтаже, 3) развој и реализација интелигентног мултифункционалног човек-робот интерфејса – CyberFABRICATOR платформа, и 4) развој система за адаптивно управљање процесом плазма резања

Током четворогодишњег ангажовања на истраживачким активностима, кандидат је дао значајан допринос у конципирању, разради и имплементацији 6 техничких решења (деталји се наводе у листи резултата које се наводи као посебно поглавље овог реферета у тексту који следи).

Поред претходног, значајно је да се посебно нагласи да је студент докторских студија Никола Лукић успео да се успешно квалификује и учествује у раду летње школе посвећене низу високореlevantних тема за когнитивну роботiku. Ова летња школа организована је на Универзитету у Цириху, Лабораторија за вештачку интелигенцију (Artificial Intelligence Laboratory), а све у контексту FP7 европског пројекта: eSMCs: Extending Sensorimotor Contingencies to Cognition. Даље се наводе основне информације:

eSMCs Robotics Summer School on Embodiment and Morphological Computation

22-28 sept. 2013, University of Zurich, Suisse.

Content: The five-day school will be structured around the following themes:

1. embodiment and morphology
2. active perception and sensorimotor contingencies
3. information theory
4. neuroscience of motor cognition
5. embodiment and awareness

The school will comprise keynote lectures in the mornings and workshops in the afternoons, which serve for in-depth discussions of topics from the keynote lectures. The workshops will feature hands-on tutorials where students will have the opportunity to build their own robots using the robotic toolkit EmbedIT (embed-it.ch/) to study the impact of morphology on locomotion behavior. Speakers:

1. Auke Ijspeert, EPFL Lausanne, Switzerland.
2. Josh Bongard, University of Vermont, USA
3. Fumiya Ida, ETH Zurich, Switzerland
4. Marek McGann, Mary Immaculate College, Limerick, Ireland
5. Wolfgang Prinz, University of Münster, Germany
6. Daniel Polani, University of Hertfordshire, UK
7. Rajesh Rao, University of Washington, USA
8. Ricarda Schubotz, University of Münster, Germany
9. Angelo Maravita, University of Milano-Bicocca, Italy
10. Catherine Tallon-Baudry, École Normale Supérieure, Paris, France
11. Herbert Peremans, University of Antwerp, Belgium
12. Rolf Pfeifer, University of Zurich, Switzerland
13. Helmut Hauser, University of Zurich, Switzerland

Кандидат је непосредно по дипломирању, 05. новембра 2010. године, уписао докторске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду, број индекса Д24/10.

Агилним ангажовањем у извршавању наставних обавеза кандидат је положио у року све испите предвиђене наставним планом и програмом докторских студија и програмом усавршавања који је усвојила Катедра за производно машинство: укупно 9 (45 ЕСПБ) + 4 (53 ЕСПБ) = 13 испита са укупно 98 ЕСПБ, што је документовано одговарајућом Потврдом Студентског одсека за докторске студије Машинског факултета у Београду. Даље се наводи листа положених испита, име професора код којег је испит полагао и добијена оцена:

- | | | |
|-----|--------|--|
| 1. | 1.1.5 | Виши курс математике, Проф. др Душан Георгијевић и Проф. др Стојан Раденовић, оцена 10 |
| 2. | 1.2.5 | Нумеричке методе, Проф. др Миодраг Спалевић и Проф. др Александар Цветковић, оцена 10 |
| 3. | 1.3.5 | ОМНИР и комуникација, Проф. др Милош Недељковић, оцена 10 |
| 4. | 1.4.5 | Аквизиција и обрада експерименталних података, Проф. др Милош Главоњић, оцена 10 |
| 5. | 1.5.10 | Истраживање и публикување - I, Проф. др Петар Б. Петровић, оцена 10 |
| 6. | 2.1.5 | Одабрана поглавља из механике, Проф. др Вукман Човић, оцена 10 |
| 7. | 2.2.5 | Интелигентна аутоматизација, Проф. др Петар Б. Петровић, оцена 10 |
| 8. | 2.3.5 | Посебни алгоритми мехатронике, Проф. др Часлав Митровић, оцена 10 |
| 9. | 2.4.15 | Истраживање и публикување - II, Проф. др Петар Б. Петровић, оцена 10 |
| 10. | 3.1.5 | Испитивање и оптимизација обрадног система, Проф. др Милош Главоњић, оцена 10 |
| 11. | 3.2.5 | Мехатронски системи и адаптроника, Проф. др Петар Б. Петровић, оцена 10 |
| 12. | 3.3.20 | Истраживање и публикување - III, Проф. др Петар Б. Петровић, оцена 10 |
| 13. | 4.1.8 | Истраживање и публикување - IV, Проф. др Петар Б. Петровић, оцена 10 |

У складу са планом и програмом извођења докторских студија кандидат је одбранио Пројекат идеје докторске дисертације (22 ЕСПБ) пред комисијом коју су, поред предложеног ментора ове докторске дисертације, чинили следећи наставници са Катедре за производно машинство: доцент др Живана Јакољевић и доцент др Бранко Кокотовић. Кандидат је саопштио преглед области истраживања, резултате систематизације кључних налаза са тим у вези, и на основу тога предложио комисији област, тематски оквир и очекиване резултате истраживања за своју докторску дисертацију.

У складу са планом и програмом извођења докторских студија кандидат је, радећи на истраживачким активностима, првенствено кроз оквир пројекта ТР35007, активно учествовао у публикувању 19 научних радова и у изради 6 техничких решења, који су тесно повезани са тематским оквиром дисертације. Даље се наводи списак објављених радова и других релевантних резултата и активности које опредељују афинитет кандидата за рад на предложеној теми, разврстани у 7 група према категоризацији ресорног министарства за науку и технолошки развој:

1. Поглавље у монографија међународног значаја (M14):
 1. Petrovic, P.B., Lukic, N., Danilov, I., "Robot-Assisted 3D Medical Sonography", Challenges and Solutions, Chapter 3 in: Rodic, A., Pisla, D., Bleuler, H. (Eds.), "New

Trends in Medical and Service Robots", Series: Mechanisms and Machine Science, Vol. 20, Springer, 2014., ISBN 978-3-319-05430-8, DOI 10.1007/978-3-319-05431-5.

2. Саопштење са међународног скупа штампано у целини (M33):

2. Pilipović, M., Danilov, I., Lukić, N., Petrović, P.B., "Virtual Manufacturing - Advanced Manufacturing Examples", Proceedings, 34th International Conference on Production Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, University of Nis, 2011, pp. 217-220, ISBN: 978-86-6055-019-6.
3. 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.
4. Lukić, N., Petrović, P.B., Danilov, I., "Variable stiffness actuator design for intrinsically compliant and backdrivable industrial humanoid robot", Proceedings, 35th International Conference of Production Engineering, Faculty of Mechanical and Civil Engineering in Kraljevo, University of Kragujevac, September, 25-28. 2013, page: 209.-214., ISBN 978-86-82631-69-9, COBISS.SR-ID 204080908.
5. Danilov, I., Petrović, P.B., Lukić, N., "Coded structured light triangulation for agile robot - environment interaction in arc welding", Proceedings, 35th International Conference of Production Engineering, Faculty of Mechanical and Civil Engineering in Kraljevo, University of Kragujevac, September, 25-28. 2013., page: 215.-219., ISBN 978-86-82631-69-9, COBISS.SR-ID 204080908.
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 (Организатор IcETRAN 2014 конференције је овај рад наградио као најбољи рад у секцији за роботiku за 2014. годину).
7. Petrovic, P., Lukic, 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. ISBN 978-961-264-076-7.

3. Рад у часопису националног значаја (M52):

8. 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.

4. Саопштење са скупа националног значаја штампано у целини (M63):

9. Petrović, P. B., Hodolić, J., Danilov, I., Lukić, N., Vukelić, Đ., "Robotski asistirana 3D ultrazvučna medicinska dijagnostika - Novi Co-x konceptualni okvir za lekar-robot-pacijent kolaborativni rad", Proceeding / International Scientific Conference "Metrology and Quality in Production Engineering and Environmental Protection", ETIKUM 2013, Novi Sad, 12-13. Jun 2013., str. 87-96., ISBN: 978-86-7892-512-2.
10. Petrović, M., Lukić, N., Vuković, N., Miljković, Z., "Mobilni robot u unutrašnjem transportu materijala inteligentnog tehnološkog sistema – edukacija i razvoj", 36. JUPITER Konferencija, 32. simpozijum NU-ROBOTI-FTS, Zbornik radova - CD, str. 3.85-3.90, Beograd, 11-12. maj 2010. ISBN: 978-86-7083-696-9.

11. Petrović, M., Danilov, I., Lukić, N., Glavonjić, M., Kokotović, B., "Mehanistička identifikacija modela sile pri ortogonalnom rezanju", 37. JUPITER Konferencija, 33. simpozijum NU-ROBOTI-FTS, Zbornik radova - CD, str. 3.93-3.102, Beograd, 10-11. maj 2011. ISBN: 978-86-7083-724-9.
 12. Petrović, P.B., Danilov, I., Lukić, N., "Novi pristupi u projektovanju ekstremno varijantnih proizvoda", 37. JUPITER Konferencija, 33. Simpozijum NU-ROBOTI-FTS, Beograd 2011, str. 3.26-3.35, ISBN: 978-86-7083-724-9.
 13. 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
 14. 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
 15. 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.
 16. 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.
 17. 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.
- Организатор ЕТРАН конференције је овај рад наградио као најбољи рад у секцији за роботiku за 2013. годину.
18. Petrović, P., Danilov, I., Lukić, N., "Brza prostorna digitalizacija okruženja primenom triangulacije struktuirane svetlosti u robotskom zavarivanju", Zbornik radova 57. Konferencije za ETRAN, Zlatibor, 3-6. juna 2013., RO3.1, str. 1-6. ISBN: 978-86-80509-68-6.
 19. Petrović, P. B., Hodolić, J., Budak, I., Danilov, I., Lukić, N., "Senzorski sistemi bazirani na optičkoj triangulaciji i njihova primena u tehnologiji robotskog zavarivanja", Proceeding / International Scientific Conference "Metrology and Quality in Production Engineering and Environmental Protection", ETIKUM 2013, Novi Sad, 12-13. Jun 2013., str. 15-22., ISBN: 978-86-7892-512-2.

5. Техничка решења (M85):

1. Petrović, P. B., Danilov, I., Lukić, N., Miković, V., "Eksperimentalni sistem za optičku triangulaciju struktuirane svetlosti", Novorazvijana oprema (prototip) u okviru projekta TR35007, 2012.
2. Petrović, P. B., Lukić, N., Danilov, I., "Sistem za eksperimentalno ispitivanje koncepta servo-upravljanog robotskog zgloba sa varijabilnom krutošću", Novorazvijana oprema (prototip) u okviru projekta TR35007, 2012.
3. Jakovljević, Ž., Petrović, P. B., Miković, V., Lukić, N., Danilov, I., "Metoda za prepoznavanje kontaktnih stanja u robotizovanoj montaži", Nova metoda razvijena u okviru projekta TR35007, 2012.

4. Petrović, P. B., Danilov, I., Lukić, N., Nikić, D., "Inteligentni mikro-elektromehanički senzorski sistem za merenje ugaonih koordinata položaja prostornih objekata u realnom vremenu", Novorazvijana oprema (prototip) u okviru projekta TR35007, 2013.
5. Petrović, P. B., Danilov, I., Lukić, N., Nikić, D., "Sistem za adaptivno upravljanje procesom plazma rezanja", Novorazvijana oprema (prototip) u okviru projekta TR35007, 2013.
6. Petrović, P. B., Danilov, I., Lukić, N., Nikić, D., "CyberFABRICATOR inteligentni interaktivni interfejs za sisteme adaptivnog robotskog zavarivanja", Novorazvijana oprema (prototip) u okviru projekta TR35007, 2013.
6. Учесће у домаћим научно-истраживачким пројектима:
 1. Интелигентни роботски системи за екстремно диверзификовану производњу, Пројекат финансиран од стране Министарства просвете и науке, ТР 35007, 2011.-2014., Руководилац пројекта: др Петар Б. Петровић дипл.инг.
7. Учесће у домаћим стручним пројектима:
 2. Флексибилни технолошки систем за завршну монтажу и роботизовано заваривање склопа папуче багера, Пројекат финансиран од стране компаније Колубара Метал из Вреоца, Уговор број МФБ 347/1 од 28.02.2011. године, односно КМ 1900 од 10.02.2011. године, Руководилац пројекта Проф. др Петар Б. Петровић.

Током свог усавршавања, у континуитету, почев од 2011. године па до дана пријаве докторске дисертације, кандидат је активно учествовао у извођењу наставе на мастер студијама Машинског факултета, на следећим предметима Катедре за производно машинство:

- Пројектовање обрадних система,
- Технологија монтаже,
- Мехатронски системи, и
- Компјутерско управљање и надзор у аутоматизацији производње.

Ангажовање кандидата је обухватило аудиторна вежбања, лабораторијска вежбања и вођење израде студентских пројеката из претходно наведених предмета.

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

На основу биографских података, научних и стручних активности, објављених радова и спроведених експерименталних истраживања, Комисија сматра да постигнути резултати показују да је кандидат, студент докторских студија Никола Лукић, испунио све формалне услове дефинисане наставним планом и програмом докторских студија на Машинском факултету у Београду и да поседује респективне предиспозиције, афинитет, истрајност и јаку мотивацију за самосталан, ефикасан и креативан научно-истраживачки рад, подједнако у теоријском као и у експерименталном домену.

Детаљним увидом у садржај објављених радова, као и ангажовању кандидата у истраживачким, образовним и другим научно-стручним активностима, Комисија закључује да су резултати које је кандидат остварио у свом професионалном раду у сагласности са истраживачким оквиром на предложеној теми докторске дисертације, и да се на основу тога може закључити да ће кандидат самостално, креативно и на агилан начин спровести предложена истраживања из којих ће проистећи респективан научно-истраживачки резултат, са мерљивим доприносом научној области којој предложена тема припада.

2. Предмет и циљ истраживања

Научна област машинског инжењерства у којој се спроводе истраживања у оквиру ове докторске дисертације односи се на производне технологије, са посебним фокусом на теоретске и апликативне аспекте интелигентних технолошких система за монтажу индустријских производа, базираних на масовној примени интелигентних индустријских робота, способних да се адаптирају геометријским несавршеностима склопова који се спајају на бази активног управљања импедансом у простору радног задатка.

Даље се дефинишу: 1) Општи контекст који шире одређује предмет истраживања у области производних технологија и 2) Садржај планираних истраживања.

2.1. Општи контекст и осврт на релевантне истраживачке изворе и остварене резултате

Актуелни трендови развоја производних технологија, доминантно одређени друштвеним процесима, глобализацијом економије и убрзаним технолошким развојем, посебно у домену информационих и комуникационих технологија, постепено трансформишу парадигму масовне производње која је доминирала читавим двадесетим веком у нови концептуални оквир, парадигму масовне кастомизације. Масовна кастомизација подразумева масовну персонализацију производа, са производњом која је доминантно вођена захтевима познатог купца, а у техничком смислу екстремно варијантна. Трансформациони процеси ове врсте из основа мењају основе на којима почива индустријска производња, постављајући пред истраживаче изазов развоја нове генерације производних технологија, које су ефективно применљиве у условима одређеним серијама врло малог обима, укључујући појединачну и уникатну производњу, уз истовремено остваривање таквих економских перформанси које су еквивалентне оним које се остварују кроз оквир масовне производње (контрадикција која се овде назива је привидна!). Производни систем, конзистентан са захтевима производне парадигме масовне кастомизације, по својим својствима флексибилности, односно, способности прилагођавања променама (планираним и непланираним), мора да се приближи и чак изједначи са својствима мануелних система, што обухвата: 1) способност да се брзо прилагоди честим и наглим променама производних задатака, укључујући и реаговање у реалном времену на широк спектар неодређености и поремећаја; 2) способност самоорганизације / реконфигурације на свим организационим нивоима и подсистемима, 3) својство потпуне информационе интеграције функционалних подструктура, укључујући и човека (несметано преплитање биолошких и инжењерских система), и 4) способност екстензивне интерактивности са окружењем и висока аутономност у когнитивном простору која обухвата: способност фузије сензорских информација, препознавање облика, антиципацију, закључивање и доношење одлука, и учења кроз генерализацију понашања, са инхерентним способностима за пренос знања и вештина са човека на машину. Производни систем ове врсте као своје основно обележје има адаптивност која се остварује кроз екстензивне когнитивне процесе, и зато је концептуални оквир парадигме масовне кастомизације у суштини концепт интелигентних производних система екстремне флексибилност, а његова практична вредност доминантно одређена мером којом су својства адаптивности, интелигенције и когниције уграђена у производни систем у целини и/или његове компоненте. Овакав производни систем се посматра као кибернетско-физички систем са производним процесом као основном активношћу.

Са аспекта технологије монтаже, екстремна варијантност производа чини практично безвредном технологију која је деценијама развијана за извођење процеса спајања делова у оквиру концепта масовне производње. Процес спајања делова је основни процес у технологији монтаже. Спајање делова подразумева успостављање одговарајућих тополошких релација између два или више делова са циљем изградње једне комплексне тополошке структуре, односно склопа. Поред чисто геометријских, процес спајања захвата и широк корпус маханичких аспеката, које се простиру од квазистатичког до динамичког домена, са

присутним и израженим феноменима трења и колизије/судара. Овакав физички оквир чини процес спајања екстремно комплексним. Зато су конвенционални системи били базирани на такозваном тривијалном случају монтаже, односно одвијању процеса спајања под идеалним условима, чиме се његова комплексност претвара у тривијални проблем. Крути, а и добар део програмабилних/флексибилних система за монтажу, у основи почивају на процесу спајања који је одговарајућим технолошким решењима сведен на његов тривијални случај. Оваква технологија је неприменљива у условима малосеријске производње диктиране новом парадигмом масовне кастомизације. То практично значи да се процес спајања у системима за монтажу нове генерације, по својим технолошким својствима мора да приближи својствима и стратегијама које користи човек. Човек не користи стратегије које процес спајања своди на тривијални случај, већ стратегије које дозвољавају присуство геометријских несавршености, и које поседују такве механизме адаптивног понашања, да обезбеђују врло високу ефективност у његовом извршавању. Зато је један од основних истраживачких задатака у домену технологије монтаже изградња нове генерације индустријских робота који ће по свом понашању у извођењу процеса спајања бити вештачки еквивалент човека (монтера), односно индустријски хуманоид, способан да коришћењем стратегије адаптивног понашања на ефикасан начин компензује геометријске грешке, независно од комплексности склопа који се монтира (уз ограничење да се ради о склоповима мале масе) и величине серије.

У истраживачком и апликативном смислу ова област поседује висок степен актуелности. Ограничавајући са само на истраживачки простор Европске уније, највиши степен истраживачке релевантности за ову докторску дисертацију може се пронаћи у програму Фабрике будућности (*Factories of Future – FoF*) који је Европска комисија, као посебан тематски приоритет сместила у FP7 и H2020 оквирне програме, у делу који се односи на информационе и комуникационе технологије. Временска оса истраживања на програму фабрика будућности захвата период од преко једне деценије, при чему су дефинисана три основна стратешка подпрограма који се директно односе на производне технологије: Програм Паметне фабрике (*Smart Factories*), Програм Виртуелне фабрике (*Virtual Factories*) и Програм Дигиталне фабрике (*Digital Factories*). У оквиру H2020 истраживачког циклуса, тематски оквири FoF програма се додатно проширују новим истраживачким доменом кибернетско-физичких система (*Cyber-Physical Systems*), којим се истраживања посебно усмеравају на област роботике, мехатронике и когнитивних система. Само за област истраживања која се односе на когнитивну роботiku Европска комисија је за петогодишњи период 2007. – 2012. године, определила буџет од 536 милиона ЕУР, препознајући роботiku као кључни садржај за јачања конкурентности европске индустрије. У циљу ближе илустрације садржаја истраживачких активности у претходно наведеном корпусу стратешких програма за развој производних технологија, даље се наводе два интегрисана пројекта чији су тематски оквири и истраживачки садржаји високорелевантни за ову докторску дисертацију.

Пројекат SMERobot је FP6 пројекат под називом: *The European Robot Initiative for Strengthening the Competitiveness of SMEs in Manufacturing*, финансиран у периоду 2005. до 2009. године, координатор Fraunhofer IPA, буџет пројекта 14.9 милиона ЕУР, са паневропским конзорцијумом од 22 институције, укључујући и 14 индустријских компанија. Овај пројекат је имао за циљ да истражи један врло деликатан простор у коме индустријски хуманоиди носе велики потенцијал, а то је масовна примена робота у оквиру малих и средњих предузећа и примена у производњи изразито диверзификованог садржаја, малих серија и кратког тржишног века. Истраживања на овом пројекту су фокусирана у три домена са циљем да се изграде теоретска и практична знања за три основна резултата: 1) Робот способан да разуме инструкције у форми које користи човек у међусобној комуникацији (говор, гестикулација и графика); 2) Безбедан и продуктивни робот свестан човековог присуства у заједничком радном простору (кооперативан, без ограда); 3) Инсталисање и конфигурисање роботског система у року од три дана (модуларан систем са *plug-and-produce*

компонентама). Пројекат је генерисао низ иновативних садржаја повезаних са комплексним приступом у оквиру кооперативног рада човек-робот, управљиве попустљивости роботске руке имплементираних на конвенционалним (тржишно расположивим) роботима и иновативним хуманоидним роботима: 1) *Programming by demonstration*, где је искоришћен вектор генерализоване силе за изградњу интерфејса човек-машина и пренос вештине/знања човека на робота, и додатно обогаћивање овог интерфејса гласовним командама, 2) *The SME Worker's Third Hand*, где је решење тражено у оквиру примене роботског хуманоида са управљивом крутошћу у простору радног задатка.

Пројекат ROSETTA је FP7 пројекат под називом: *RObot control for Skilled ExecuTion of Tasks in natural interaction with humans; based on Autonomy cumulative knowledge and learning*, који се финансира у периоду 2009 до 2013. године, са буџетом од 10 милиона ЕУР (large-scale integrated project, Challenge 2: Cognitive systems, Interaction, Robotics) и паневропским конзорцијумом од 8 институција, укључујући и 3 индустријске компаније, координатор пројекта компанија ABB Robotics. ROSETTA пројекат је први пројекат из роботике који је на најдиректнији начин усмерен ка изградњи индустријских хуманоидних робота који ће бити инхерентно погодни за колаборативни рад са човеком, у индустријским условима, на линијама за монтажу. У истраживачком смислу, ROSETTA пројекат је имао четири основна циља: 1)Обезбедити применљивост робота за извршавање комплексних задатка са високом флексибилношћу и робусношћу; 2)Поједноставити активности на прилагођавању робота за прелазак са једног на други радни задатак (производ); 3)Стварање система за лако програмирање ROSETTA роботских функционалности без потребе за високоверзираним програмерима; 4)Развој нових сензорских и управљачких метода за безбедну интеракцију човека и робота у реалном индустријском окружењу. Поред доприноса у теоретском домену, основни практични излаз овог пројекта је концепт робот у облику дворуког индустријског хуманоида са 14 степени слободе, под називом FRIDA, који је у складу са постављеним циљевима и истраживачким резултатима конзорцијма пројекта, развијен од стране компаније ABB Robotics. FRIDA робот је посебно специјализован за извршавање задатака спајања и манипулације деловима у оквиру система за монтажу, при чему је симултани рад две руке радикално изменио постојеће фундаменте технологије монтаже. Екстремно редундантна, кинематски разграната структура, са колаборативним приступом у извршавању радног задатка спајања делова драстично је повећала перформансе флексибилности и адаптивности.

Поред претходно наведених, од посебног значаја је и корпус истраживачких активности који је смештен у оквиру LWR (Light Weight Robot) пројекта. LWR је вишедеценијски развојни пројекат реализован у оквиру Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt – DLR (German Aerospace Center), Institute for Robotics and Mechatronics, чије је исходиште широк комплекс развојних активности на изградњи специјалних манипулационих система за истраживање свемира, укључујући и Space Shuttle програм америчке свемирске агенције NASA (почетне активности током 1993. године, ROTEX мисија, *Light Weight Robot*). Различити роботи развијани у оквиру овог програма одликовали су се читавим низом специфичности које су се показале врло корисним за изградњу индустријског хуманоида специјализованих за технологију монтаже и процес роботизованог спајања делова. Пре свега, то је ригорозно ограничење масе, затим специфичности у раду у бестежинском стању и сензорика којом је омогућена телеоперација, односно природни кооперативни рад човека и робота на задацима који нису могли да буду до краја унапред планирани и у средини која поседује инхерентну неструктурираност. Ова истраживања су на крају довела до успостављања једне сасвим нове класе манипулационих робота и нове истраживачке области – *soft robotics*. То су роботи који су инхерентно попустљиве структуре, укључујући и пасивну попустљивост, са екстремно повољним односом масе и носивости, који код најновије генерације ових робота достиже перформансе које су приближне перформансама људске руке 1:1 (робот укупне масе 14 килограма може да у моду редуковане брзине оствари носивост 14 кг, док у моду максималних динамичких перформанси може да оперише са масом од 7 кг!). Истовремено,

овај концепт робот поседује 7 степени слободе са врло оригиналним и специфичним конструкционим решењима. Основна специфичност огледа се у томе што је комплетан зглоб решен са интегрисаним механичким, управљачким и сензорским хардвером. Управљачки систем делује у простору стања четвртог реда, комбинујући управљање по позицији и управљање по сили, уз могућност потпуне активне компензације гравитационе компоненте зглобне руке (левитација), управљање крутошћу и управљање пригушењем – управљање актуационог система сваког зглоба остварује се кроз управљање његовом механичком импедансом, уз могућност варирања свих параметара импедансе.

У националним оквирима, истраживања која ће бити спроведена у оквиру ове докторске дисертације биће смештена у контекст пројекта TP35007: Интелигентни роботски системи за екстремно диверзификовану производњу, који финансира Министарство просвете и науке за период 2011-2014, као пројекат националног значаја за област технолошког развоја индустрије Србије. Пројекат TP 35007 се реализује у оквиру Лабораторије за Кибернетику и Мехатронске системе (CMSysLab), Машинског факултета Универзитета у Београду. Кандидат, Никола Лукић, је члан пројектног тима пројекта TP35007 и његов рад на овом пројекту је финансиран је од стране Министарства просвете и науке, са статусом младог истраживача докторских студија.

Даље се наводи преглед научних публикација релевантних за претходно разматран општи контекст и иницирање истраживања која се спроводе у оквирима ове докторске дисертације:

- [1] Aschhoff, B., Crass, D., Cremers, K., Grimpe, C., and Rammer, C.: European Competitiveness in Key Enabling Technologies - FINAL REPORT, Centre for European Economic Research (ZEW), Mannheim, Germany, 2010.
- [2] European commission, Directorate-general for research, Directorate G – Industrial technologies: FACTORIES OF THE FUTURE - PPP Strategic Multi-annual Roadmap, 2010, ISBN 978-92-79-15227-6.
- [3] Jovane, F., Westkämper, E., and Williams, D., THE MANUFUTURE ROAD - Towards Competitive and Sustainable High-Adding-Value Manufacturing, 2009, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-540-77011-4.
- [4] European commission: Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL establishing Horizon 2020 - The Framework Programme for Research and Innovation (2014-2020), Brussels, COM(2011) 809 final, 2011/0401 (COD).
- [5] Jovane, F., Koren, Y., Boër, C.R., "Present and Future of Flexible Automation - Towards NewParadigms", CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 52, Issue 2, 2003, Pages 543–560, DOI 10.1016/S0007-8506(07)60203-0.
- [6] Westkämper, E.: Towards The Re-Industrialization of Europe – A Concept for Manufacturing for 2030, Springer Verlag, Berlin–Heidelberg 2014, ISBN 978-3-642-38501-8, DOI 10.1007/978-3-642-38502-5.
- [7] Davies, S.: Future Perfect, Addison Wesley Publishing Company, 1987, ISBN: 0-201-59045-X.
- [8] Pine II, Joseph B. Mass Customization: The New Frontier in Business Competition, Harvard Business School Press (January 1999), ISBN-10: 0875849466.
- [9] A. Albu-Schäffer, O. Eiberger, M. Grebenstein, S. Haddadin, C. Ott, T. Wimböck, S. Wolf, G. Hirzinger, "Soft robotics - From torque feedback controlled light-weight robots to intrinsically compliant systems", IEEE Robotics and Automation Magazine, vol. 15, no. 3, pp. 20-30 (September 2008).
- [10] A. De Luca, F. Flacco, R. Schiavi, A. Bicchi, "Nonlinear decoupled motion-stiffness control and collision detection/reaction for the VSA-II variable stiffness device", 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Saint Louis, MO, USA (October 2009).
- [11] Pires, J.N., Veiga, G., Araujo, R., "Programming-by-demonstration in the coworker scenario for SMEs", Industrial Robot: An International Journal, Vol. 36 Iss: 1, 2009, pp.73-83.
- [12] Petrović P., "Model aktivnog adaptivnog upravljanja procesom spajanja delova u montaži primenom redundantnih robota", Doktorska disertacija, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, Oktobar 1996.
- [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] Albu-Schaffer, A., et al.: Soft robotics: What Cartesian Stiffness Can We Obtain With Passively Compliant, Uncoupled Joints? IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 3295–3301 (2004).
- [15] Baillieul, J., Hollerbach, J., and Brockett, R.W.: Programming and Control of Kinematically Redundant Manipulators, 23-rd IEEE Conf. on Decision and Control, Las Vegas. USA, pp. 768-774 (1984).

- [16] Baerlocher, P, Boulic, R.: An Inverse Kinematic Architecture Enforcing an Arbitrary Number of Strict Priority Levels. *The Visual Computer*, Vol. 20(6), pp. 402-417 (2004).
- [17] Chen, S.F., Kao, I.: Geometric Approach to the Conservative Congruence Transformation (CCT) for Robotic Stiffness Control. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 544-549 (2002).
- [18] Choi, H.R., Chung, W.K., and Youm, Y.: Stiffness Analysis and Control of Redundant Manipulators. *IEEE Int. Conference on Robotics and Automation*, pp. 689-695 (1994).
- [19] Hogan, N.: Impedance Control: An Approach to Manipulation, Part I, II and III. *ASME Transactions, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 107, pp. 1-24 (1985).
- [20] Khatib, O.: An Unified Approach to Motion and Force Control of Robot Manipulators: The Operational Space Formulation. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. 3, No. 1, pp: 42-53 (1987).
- [21] Khatib, O.: Motion/Force Redundancy of Manipulators, Japan-U.S.A. Symposium on Flexible Automation, pp: 337-342 (1990).
- [22] Kim, J.O., Khosla, P.K., and Chung, W.K.: Static Modeling and Control of Redundant Manipulators. *Robotic & Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 9, No. 2, pp.145-157, (1992).
- [23] Liegeois, A.: Automatic supervisory control of the configuration and behavior of multibody mechanisms. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 7(12), pp: 868-871 (1977).
- [24] Osu, R., and Gomi, H.: Multijoint Muscle Regulation Mechanisms Examined by Measured Human Arm Stiffness and EMG Signals, *J. Neurophysiology* 81:1458-1468 (1999)
- [25] Ott, Ch.: *Cartesian Impedance Control of Redundant and Flexible-Joint Robots*, Springer Verlag, ISBN 978-3-540-69253-9 (2008).
- [26] Patel, R.V., and Shadpey, F.: *Control of Redundant Robot Manipulators - Theory and Experiments*. Springer Verlag, ISBN 978-3-540-25071-5 (2005).
- [27] Salisbury, J.: Active Stiffness Control of a Manipulator in Cartesian Coordinates. *19th IEEE Int. Conference on Decision and Control*, pp. 95-100 (1980).

2.2. Приказ предмета istraživanja i hipotetičkih stavova o problemu koji se istražuje

Polazeći od претходно описаног контекста и фокусирајући се на његове кључне истраживачке изазове, а такође, уважавајући и истраживачке приоритете пројекта TP35007, у оквиру ове докторске дисертације биће спроведена теоретска и експериментална истраживања општег системског оквира и његових базних конституената са циљем стварања опште теоријске основе за изградњу индустријских хуманидних робота који ће поседовати инхерентна својства управљања импедансом на начин који је конзистентан са захтевима активног адаптивног спајања делова у оквиру роботизованог система за монтажу, у условима који су дефинисани новом производном парадигмом масовне кастомизације.

Ова истраживања у најдиректнијем смислу представљају континуитет са истраживачким напорима који се остварују на Катедри за производно машинство, Машинског факултета у Београду у домену технологије монтаже, која су започела истраживањима пасивних система за адаптивно спајање (RCC јединице), средином осамдесетих година двадесетог века. Суштина истраживања која се планирају у оквиру ове дисертације односе се на уградњу својстава RCC јединица у саму структуру индустријског робота. На овај начин се концепт пасивне попустљивости, садржан у еластомеханичкој структури RCC јединице, преноси на механичку и управљачку структуру робота, чиме се пасивно понашање трансформише у активно понашање, а специфична еластомеханичка својства RCC јединице трансформишу у нову управљачку величину, која је од суштинског значаја за успешно извођење процеса спајања.

Досадашња истраживања су показала да управљање импедансом, адмитансом, или само управљање по сили, није једноставан инжењерски проблем. Ова тврдња се лако доказује стањем ствари у индустријској пракси, где се врло ретко проналазе успешне роботске инсталације која у својој управљачкој структури поседују и неки од облика повратне спреге по сили. Истраживања која су спроведена у оквиру пројекта TP35007, а која су претходила дефинисању истраживачког оквира за ову докторску дисертацију, показују да је остваривање жељених својстава попустљивости, или шире, импедансе врха робота у простору радног

задатка спајања делова, суочена са многим физичким ограничењима која долазе од саме кинетостатичке структуре механизма нередундантног робота. Паралелна истраживања која су спроведена у оквиру биолошких система, конкретно човекове руке, показују да је њена кинетостатичка структура кинематски редундантна. Међутим, редунданса није само ограничена на кинематски домен већ се простире и на актуациони домен. За разлику од постојећих решења индустријских робота код којих се сваки активни степен слободе погони једним одређеним актуатором – моноактуациони систем, код човека је присутна актуациона редунданса. Анализом анатомије мишићног система јасно се издвајају такозвани биартикуларни актуатори, односно мишићи који истовремено актуирају два суседна зглоба. Паралелно, поред биартикуларне актуације, присутан је и други тип редундансе који се односи на симултану актуацију једног зглоба са већим бројем моноартикулационих мишића. Дакле, човекова рука, која је иначе у технолошком смислу савршени алат за манипулацију и спајање делова у процесу монтаже, је поред кинематске редундансе, истовремено и актуационо редундантна. Математички модел оваквог биолошког система показује пуну оправданост, јер се кроз кинематску и актуациону редундансу може ефективно управљати својствима попустљивости руке, у смислу оптималног прилагођавања њених еластомеханичких својстава конкретном задатку манипулације деловима у процесу монтаже. Проблем је у томе што је физичка реализација полиартикуларних система конструкционо врло комплексна и сасвим сигурно, ван оквира данас расположиве технологије и технологије која се може предвидети у скорој будућности. Зато се у овом докторату истраживања фокусирају на кинематску редундансу и моноартикуларну актуацију, које су технички једноставно изводиве. При томе се полази од претпоставке да је конфигурациони простор нуле кинематски редундантног, моноартикуларно погођеног робота довољан оквир за остваривање жељених еластомеханичких својстава, односно жељене генерализоване крутости/попустљивости врха робота у простору радног задатка. Ова жељена својства се заправо односе на пресликавање еластомеханичких својстава RCC јединице која је своју успешност у компензацији геометријских неодређености у потпуности доказала у пракси и која се деценијама практично примењује на линијама за аутоматску монтажу. Остваривање жељених својстава попустљивости се у оквиру ових истраживања посматрају као технолошки задатак секундарног приоритета, који управљачки систем мора симултано и неконфликтно да оствари са примарним задатком управљања кретањем и позиционирањем врха робота. Прелиминарна истраживања у делу синтезе аналитичких модела фузије примарног и секундарних задатака су показала теоретску одрживост приступа, али су такође отворила и нека друга питања, која се пре свега односе на кинематске и актуационе сингуларитете ланчастог механизма робота (последица физичког дуализма помераја и силе).

У оквиру ове дисертације биће постављен општи формални концепт управљања попустљивошћу и импедансом на бази коришћења расположивих ресурса конфигурационог простора нуле кинематски редундантног робота. Паралелно, биће истраживани и релевантни аспекти управљања својствима попустљивости / импедансе моноартикуларног зглоба робота – актуатор променљиве крутости (Variable Stiffness Actuator - VSA), који је у основи базни градивни елеменат нове генерације индустријских хуманоида специјализованих за извршавање задатака адаптивног спајања делова у оквиру система за роботску монтажу, конзистентног са захтевима високоваријантне производње коју намеће нова производна парадигма масовне кастомизације. Даље, поред чисто теоретских истраживања општег проблема управљања генерализованом крутошћу / импедансом, у оквиру ове докторске дисертације биће паралелно спроведен широк корпус истраживања која се односе на крутост/импедансу као специфичну процесну величину у контексту процеса спајања. У том смислу, биће изграђени одговарајући алгоритми адаптивног спајања на бази препознавања контактних стања делова који се спајају коришћењем вектора силе спајања и са тим у вези, успостављање одговарајућих релација са оптималном генерализованом крутошћу/импедансом врха робота у простору радног задатка. Поред чисто теоретских истраживања, у оквиру ове дисертације биће спроведена и одговарајућа експериментална

истраживања са циљем практичне провере полазних хипотеза, развијених теоретских модела и концепта у целини.

У оквиру Лабораторије за кибернетику и мехатронске системе (CMSysLab), Машинског факултета, Универзитета у Београду, постоје потребни експериментални ресурси за практично спровођење свих експерименталних радњи које се планирају у оквиру ове дисертације. Поред антропоморфног, кинематски редундантног робота са седам степени слободе (Yaskawa SIA10F), специјализованог за процесе аутоматске монтаже, лабораторија располаже одговарајућим сензорским системима и пратећом опремом за аквизицију силе спајања у реалном времену, као и одговарајућим ласерским тринагулационим сензорима и ласерским сензорима са оптичком завесом за прецизну идентификацију помераја делова који учествују у експерименту спајања. Такође, CMSysLab поседује јединствени развојно-експериментални систем за интеракцију са управљачким системом робота SIA 10F у реалном времену (MotoPlus). MotoPlus је специјализовани сет API (*Application Programming Interface*) рутина (софтверских алата) које омогућавају бидирекциону комуникацију надређеног управљачког система на којем се у реалном времену остварује неки облик адаптивног закона управљања са управљачким системом робота. Оваква експериментално-развојна инсталација велике техничке комплексности биће једним делом реализована самоградњом у оквиру ове дисертације, а у складу са планираним активностима на пројекту TP35007. Базне компоненте ове експерименталне инсталације су обезбеђене од стране ресорног министарства Владе Републике Србије као капитална опрема за пројекат TP35007.

2.3. Научни циљеви истраживања

Општи научни циљ докторске дисертације је допринос стварању новог генеричког знања и практичних искустава (стечених кроз експерименталне радње у лабораторијским условима), неопходних за изградњу нове генерације интелигентних система за монтажу, применљивих у условима високоваријантне малосеријске и појединачне производње, у контексту који дефинише нова производна парадигма масовне кастомизације.

Поред општег, ова докторска дисертација има три посебна научна циља:

1. Стварање нових генеричких знања везаних за препознавање контактних стања, односно тополошких релација које се успостављају између делова током процеса спајања, у контексту стварања специфичне технолошке базе знања (скуп продукционих правила) за подршку когнитивним процесима система за адаптивно спајање.
2. Стварање нових генеричких знања неопходних за ефективно коришћење конфигурационог простора нуле кинематски редундантног робота за остваривање произвољне генерализоване крутости (квази-статички домен) или импедансе (динамички домен) врха робота у простору радног задатка – генерализована крутост / импеданса као специфичне процесне величине које су конзистентне са процесом спајања, а које робот остварује као секундарни (неконфликтни) управљачки задатак.
3. 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 на линијама/технолошким ћелијама за монтажу.

Поред чисто теоретских, пред ову докторску дисертацију постављају се и одговарајући циљеви продуковања резултата емпијског карактера, пре свега фокусирани на практичну проверу у лабораторијским условима, кључних теоретских садржаја, који су као оригинални допринос настали кроз спроведена истраживања.

3. Полазне хипотезе

Ова докторска дисертације полази од следећих хипотеза које су у основи базиране на претпоставкама које су изведене из прелиминарних истраживања које је кандидат спровео у оквиру свог усавршавања током докторских студија и паралелно кроз рад на пројекту TR35007, а који су презентирани стручној и научној јавности кроз саопштења на домаћим и међународним скуповима и научним чланцима објављеним у часописима и монографским књигама:

Хипотеза #1:

Унутар конфигурационог простора нуле кинематски редундантног робота, чији су активни степени слободе погођени моноартикуларним актуаторима, постоји најмање један непразни подскуп конфигурација који је конзистентан са произвољно изабраном матрицом генерализоване крутости врха робота у простору радног задатка.

Хипотеза #2:

Постоји једнозначна корелација између вектора силе спајања и генерализоване крутости врха робота која је конзистентна са произвољним, нетривијалним случајем процеса спајања.

Хипотеза #3:

Регуларна граматика типа 3 према класификацији Чомског је довољан формални оквир за конструисање контекстно сензитивног акцептора за препознавање контактних стања, односно препознавање тополошких релација над геометријом објеката у току процеса спајања, коришћењем вектора силе спајања као изворног носиоца потребног и довољног информационог садржаја.

Хипотеза #4:

Концепт фази-лингвистичке променљиве и из њега изведене фазидинамичке формалне структуре за апроксимативно закључивање у форми генерализованог модуса поненса, довољан су математички оквир за конструисање робусне фази-инферентне апстрактне информационе машине за адаптивно управљање нетривијалним случајем процеса спајања у оквирима технолошког система за роботизовану монтажу.

4. Научне методе истраживања

У стварању генеричких знања биће коришћене следеће истраживачке методе квантитативне анализе феномена повезаних са предметом истраживања у оквиру ове докторске дисертације:

1. Аналитичке методе линеарне алгебре и општа теорија линеарних простора за решавање проблема неконфликтне суперпозиције примарних и секундарних задатака код кинематски редундантних робота – аналитичка инферентна машина за фузију примарног и секундарних управљачких задатака (првенствено управљање крутошћу и избегавање сингуларитета) коришћењем конфигурационог простора нуле;
2. Методе апроксимативног закључивања базиране на теорији фази скупова и из њих изведене фази логике за препознавање контактних стања делова који се спајају и системско решавање проблема инхерентне комплексности и неодређености у примени аналитичких метода линеарне алгебре (наведено у тачки 1);
3. Општа теорија аутомата и вештачких језика за изградњу апстрактних репрезентација технолошког задатка спајања делова и контекстно сензитивне класификације контактних стања (робусни динамички класификатор контактних стања у реалном времену);

4. Аналитичке методе нумеричке обраде сигнала (филтрација, спектар и спектрална анализа) за обраду сензорске информације о сили спајања (основни носилац информационог садржаја о тополошким релацијама делова који се спајају), са посебним фокусом на применљивост у реалном времену (STFT и DWT апаратура);
5. Методе дискретне симулације за верификацију развијених закона управљања попустљивости у конфигурационом простору нуле редундантног робота и за симулацију кретања робота у извршавању суперпонираног примарног и секундарних задатака у процесу спајања делова;

У циљу провере развијених теоретских модела и тестирања полазних хипотеза у реалним условима, биће примењене емпиријске методе истраживања кроз спровођење одговарајућих експеримената превасходно у лабораторијским условима.

5. Очекивани научни допринос

У оквиру ове докторске дисертације очекује се да буду остварени следећи научни доприноси који се односе на изградњу теоретских основа адаптивног спајања делова у технологији роботизоване монтаже, посебно:

1. Систематизација и поставка нових генеричких модела механичке интеракције изабране класе делова елементарне геометрије у процесу спајања;
2. Нови концептуални оквир за идентификацију механичких својстава попустљивости система еластичног ослањања делова који се спајају, који су оптимални са аспекта извођења нетривијалног (колизионог) процеса спајања;
3. Поставка новог концепта фази-инферентне апстрактне информационе машине за адаптивно управљање нетривијалним случајем процеса спајања у оквирима технолошког система за роботизовану монтажу;
4. Концепт и разрада новог приступа за препознавање тополошких релација над геометријом објеката у току процеса спајања на бази препознавања облика вектора силе спајања (фундаментални носиоц информационог садржаја), кроз примену теорије аутомата и изградње контекстно сензитивног акцептора језика / регуларних израза;
5. Доградња и разрада концепта меких акутационих система променљиве (управљиве) крутости за погон антропоморфних роботских механизма (нова генерација индустријских робота – индустријски хуманоиди) и у том контексту развој нових закона управљања механичком импедансом у реалном времену;
6. Поставка новог концепта управљања генерализованом крутошћу робота коришћењем конфигурационог простора нуле кинематски редундантних антропоморфних роботских структура (поставка општег теоријског модела и идентификација оптималних подпростора унутар коресподентног конфигурационог простора нуле који су конзистентни са задатом генерализованом крутошћу, односно оптималном попустљивошћу врха робота у извођењу задатака спајања).

Даље се наводе појашњења претходно наведених очекиваних доприноса.

Поставка теоретских основа за изградњу система за адаптивно спајање делова који су по својим перформансама адаптивности и аутономности блиски перформансама које остварује човек на мануелним линијама/радним станицама за монтажу су од фундаменталног значаја за област којој у којој се спроводе истраживања у оквиру ове докторске дисертације. Својства адаптивности која су блиска својствима човека су есенцијална за ефективну примену робота на линијама за монтажу чији је функционални оквир одређен новом парадигмом масовне кастомизације. Изградњу аналитичких теоретских основа за синтезу управљања попустљивошћу/импедансом кинематски редундантних робота, погоњених моноартикуларним актуаторима је врло значајан очекивани научни допринос. Мада је ова

тематика присутна више деценија, практично од краја седамдесетих година двадесетог века, она у истраживачком смислу није још увек исцрпљена. Уколико би се, полазећи од дуализма помераја и силе, успоставио један заокружен математички апарат за опис крутости робота у конфигурационом простору нуле, таква теоретска основа би имала велику практичну вредност за роботiku у најширем смислу њеног одређења. Практичне примене робота у контексту у којем он остварује физичку интеракцију са окружењем, као што је то случај у процесу монтаже (извођење задатка спајања) или на пример у области медицинске роботике, где такође постоје врло деликатни захтеви за управљањем физичке интеракције између робота и биолошких структура, захтевају прецизно и поуздано управљање крутошћу врха робота у простору радног задатка. Управо недостатак одговарајућих теоретских подлога у овој области, представља кључну препреку за ширу примену робота у задацима ове врсте. Такође, врло значајан допринос који се очекује да буде остварен кроз ову докторску дисертацију односи се на изградњу нових закона или приступа управљања моноартикуларним актуаторима, које ће омогућити изградњу нове генерације актуационих система, способних да симултано управљају угаоним положајем зглоба робота (мисли се на обртне зглобове) и ефективном крутошћу на страни сегмента, укључујући и такозвано управљање пасивним кретањем, односно повратним кретањем под дејством спољашњег оптерећења (*backdrivability*). Са појавом хуманоидне роботике код које је физичка интеракција са окружењем много присутнија него што је то случај код индустријских робота (на пример ход), оваква врста актуационих система је постала врло актуелна истраживачка и развојна тема. У случају индустријских хуманоидних робота, примена такозваних меких зглобова, је конструкциони императив. Зато, резултати који се планирају у овом домену имају велику практичну вредност (конкретни резултати, теоретски и практични, већ су остварени током припремних истраживања).

У делу експерименталних истраживања, очекивани резултати се односе на изградњу две експерименталне инсталације:

1. Експериментална инсталација меког зглоба са променљивом и управљивом крутошћу и импедансом;
2. Експериментална инсталација за адаптивно спајање делова применом редундантног робота антропоморфне конфигурације.

Ова инсталација ће бити коришћена за експерименталну верификацију базних концепата и хипотеза, за потребе демонстрације. Касније, по окончању ове докторске дисертације, ове експерименталне инсталације ће бити коришћене као универзалне платформе за даља истраживања и потребе едукације студената мастер нивоа, у оквиру Лабораторије за кибернетику и мехатронске системе Катедре за производно машинство, Машинског факултета Универзитета у Београду.

Такође, развијене експерименталне инсталације ће бити коришћене као експериментални и развојно-истраживачки ресурс за активно учешће у стратешким програмима технолошког развоја индустрије и укупног економског система Србије, кроз увођење нових производних технологија и њихову ефективну примену у пракси, и екстерно, кроз учешће у међународним истраживачко-развојним пројектима на регионалном и на ЕУ нивоу.

6. План истраживања и структура рада

6.1. Прелиминарни план истраживања

На основу до сада спроведених припремних истраживачких активности, планирана истраживања ће обухватити следеће основне групе активности:

- Преглед и систематизација постојећег стања истраживања у области роботизоване монтаже са фокусом на процес спајања делова и нове генерације роботских система за

колаборативни / тимски рад човека и робота на линијама за монтажу – индустријски хуманоидни роботи;

- Концептуални оквири попустљивости роботских структура са флексибилним зглобовима, општи математички модел генерализоване крутости робота, интеракција механичког и управљачког система;
- Генерализована крутост кинематски редундантних система, истраживање конфигурационог простора нуле и његове примене у управљању крутошћу у простору радног задатка, управљање импедансом робота, суперпозиција радних задатака (посебно проблем конфликта између секундарних задатака оптимизације генерализоване крутости и избегавање сингуларитета);
- Зглоб променљиве крутости – базни градивни блок меког робота, индустријски хуманоиди и зглобови променљиве крутости, актуациона и кинематска редунданса, моноартикуларни и полиартикуларни системи погона за индустријске хуманоиде, зглоб променљиве крутости и физичка интеракција човека и робота;
- Процес спајања делова, општи модел силе спајања као основног носиоца информације о нетривијалној механичкој интеракцији делова, аспекти недовољно структурираног окружења и адаптивног понашања робота у контексту процеса спајања;
- Когнитивни аспекти процеса спајања – перцепција окружења, интерпретација и доношење одлука, учење и генерализација;
- Синтеза адаптивних закона управљања понашањем робота у извршавању нетривијалних задатака спајања делова на бази вектора силе спајања као основног носиоца повратне информације о окружењу и интеракције робота са окружењем, препознавање контактних стања у реалном времену доношење одлука;
- Експериментална истраживања, посебно: 1) истраживања у домену зглобова променљиве крутости, 2) управљања крутошћу редундантног робота у простору задатка и 3) адаптивног понашања меког редундантног робота у извршавању нетривијалног задатка спајања делова;
- Рекапитулација истраживања и извођење закључака, и
- предлог даљих истраживања у области дефинисаној темом докторске дисертације.

6.2. Планирана структура докторске дисертације

Основна структура предложене докторске дисертације начелно обухвата следеће целине:

1. Уводна разматрања
2. Процес спајања делова у технологији роботизоване монтаже
3. Генерализована крутост робота, алтернативни концепти и кинематска редунданса – индустријски хуманоид
4. Зглоб са променљивом крутошћу
5. Варијантни концепти управљања генерализованом крутошћу робота
6. Адаптивно управљање крутошћу у извршавању задатака спајања делова
7. Когнитивни аспекти адаптивног извршавања задатака нетривијалног спајања делова
8. Експериментална верификација
9. Закључна разматрања и предлог даљих истраживања
10. Прилози
11. Преглед коришћене литературе.

7. Закључак и предлог

Детаљном анализом пријаве докторске дисертације кандидата Николе Лукића, дипл.маш.инж. - мастер број 1729/1 од 15.09.2014. године, **Комисија закључује да је предложена тема адекватна за израду докторске дисертације и да кандидат испуњава све законске и друге услове за рад на докторској дисертацији.**

У том контексту Комисија предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета Универзитета у Београду да докторанту Николи Лукићу, дипл. маш. инж. – мастер, **одобри израду докторске дисертације под насловом: "Адаптивно спајање делова у технологији роботизоване монтаже применом кинематски редундантних робота" у научној области Машинство.**

За ментора за рад на овој дисертацији предлаже се др Петар Б. Петровић, редовни професор на Катедри за производно машинство Машинског факултета Универзитета у Београду.

Београд, 27. октобар 2014. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

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

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

.....
Проф. др Љубодраг Тановић,
Универзитет у Београду, Машински факултет

.....
Доц. др Живана Јаковљевић,
Универзитет у Београду, Машински факултет

.....
Проф. др Стеван Станковски,
Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука

ПОДАЦИ О МЕНТОРУ

Кандидат: **Никола ЛУКИЋ**, дипл.инж.маш.-мастер

Име и презиме ментора: **др Петар Б. ПЕТРОВИЋ**, дипл.инж.маш

Звање: **редовни професор**

Списак радова који квалификују ментора за вођење докторске дисертације:

1	Petrovic, P., Jakovljevic, Z., <i>Dynamic Compensation of Electrical Runout in Eddy Current Contactless Measurements of Non-Stationary Ferromagnetic Target</i> , Sensor letters, Vol.7, 191–202, 2009, doi:10.1166/sl.2009.1031, ISSN 0956-5515, (IF 1.587)	M21
2	Petrovic, P., Jakovljevic, Z., Milacic, V., <i>Context sensitive recognition of abrupt changes in cutting process</i> , Expert Systems with Applications 37, 2010, pp: 3721–3729, 10.1016/j.eswa.2009.11.053, ISSN 0957-4174, (IF 2.596)	M21
3	Jakovljevic, Z., Petrovic, P., B., Hodolic, J., <i>Contact states recognition in robotic part mating based on support vector machines</i> , The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, pp: 1-19, DOI 10.1007/s00170-011-3501-5, ISSN 0268-3768, (IF 2.068)	M21
4	Jakovljevic, Z., Petrovic, P., B., Mikovic, V., Pajic, M., <i>Fuzzy Inference Mechanism for Recognition of Contact States in Intelligent Robotic Assembly</i> , Journal of Intelligent Manufacturing, 2012, pp: 1-17, DOI 10.1007/s10845-012-0706-x, Print ISSN 0956-5515, (IF 1.278)	M22
5	Antic, A., Petrovic, P.B., Zeljkovic, M., Kosec, B., and Hodolic, J., <i>The Influence of Tool Wear on the Chip-Forming Mechanism and Tool Vibrations</i> , Materials and technology 46 (2012) 3, pp: 279–285, UDK 620.178.1:621.941, ISSN 1580-2949, (IF 0.571).	M23

Заокружити одговарајућу опцију (А, Б, В или Г):

А) У случају менторства дисертације на докторским студијама у групацији техничко-технолошких, природно-математичких и медицинских наука ментор треба да има најмање три рада са SCI, SSCI, AHCI или SCIE листе, као и Math-Net.Ru листе.

Б) У случају менторства дисертације на докторским студијама у групацији друштвено-хуманистичких наука ментор треба да има најмање три рада са релевантне листе научних часописа (Релевантна листа научних часописа обухвата SCI, SSCI, AHCI и SCIE листе, као и ERIH листу, листу часописа које је Министарство за науку класификовало као M24 и додатну листу часописа коју ће, на предлог универзитета, донети Национални савет за високо образовање. Посебно се вреднују и монографије које Министарство науке класификује као M11, M12, M13, M14, M41 и M51.)

В) У случају израде докторске дисертације према ранијим прописима за кандидате који су стекли академски назив магистра наука ментор треба да има пет радова (референци) које га, по оцени Већа научних области, квалификују за ментора односно дисертације.

Г) У случају да у ужој научној области нема квалификованих наставника, приложити одлуку Већа докторских студија о именовању редовног професора за ментора.

ДЕКАН ФАКУЛТЕТА

Датум 27.10.2014. године

М.П.
