

Универзитет у Београду
Електротехнички факултет

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Подобност теме и кандидата Бранка Лукића за израду докторске дисертације.

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета бр. 5018/13-1 од 21.02.2019. године именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата Бранка Лукића, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, за израду докторске дисертације и научне заснованости теме под насловом:

„Симултано управљање позицијом и крутошћу робота погоњеног актуаторима променљиве крутости”.

(енг. „*Simultaneous Stiffness and Position Control of Robots with Variable Stiffness Actuators*”).

На основу материјала приложеног уз захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Бранко Лукић, мастер инжењер електротехнике и рачунарства, рођен је 30.03.1990. године у Лозници. Основну школу је завршио у Лешници, а средњу Техничку школу у Лозници као ученик генерације. Електротехнички факултет у Београду уписао је 2008. године. Дипломирао је на Одсеку за сигнале и системе 2012. године са просечном оценом 8.53. Исте године уписао је мастер студије на Електротехничком факултету у Београду. Мастер студије је завршио 2013. године са просечном оценом 10.00 на тему “Развој експерименталне платформе за испитивање утицаја попустљивости у зглобовима на понашање робота” под менторством проф. др Вељка Поткоњака. Докторске студије на Електротехничком факултету у Београду на Модулу управљање системима и обрада сигнала уписао је 2013. године, а све испите положио је са просечном оценом 10.00.

Од априла 2014. до децембра 2016. године ангажован је на Електротехничком факултету у Београду на пројекту министарства као стипендиста Министарства, а од јануара 2017.

године ангажован је као истраживач приправник на пројекту Министарства „Истраживање и развој амбијентално интелигентних сервисних робота антропоморфних карактеристика”. Учесник је српско–словеначког билатералног пројекта “Развијање нових приступа за олакшавање колаборативног рада робота најновије генерације и човека у задацима заједничке манипулације објектима”, између Електротехничког факултета у Београду и Института Јожеф Стефан у Љубљани у периоду 2018.–2019. година.

У августу 2016. године учествовао је на летњој школи роботике “*IS3 HRC 2016: Italian-Serbian Summer School On Human-Robot Coworking - Master Classes on Human-Robot Coworking and Advanced Robotic Grasping*”, одржане на Машинском факултету у Београду. У периоду новембар–децембар 2018. године као и у периоду септембар – новембар 2019. године, провео је студијски истраживачки боравак на институту Јожеф Стефан у Љубљани у Лабораторији за колаборативну роботiku (*CoBoTaT Laboratory*). У јануару 2019. године похађао је курс “*Sliding Mode Control and Observation*”, одржан на *Centrale Supélec* у Паризу, у организацији *European Embedded Control Institute*.

У 2014., 2015. и 2016. години, добитник је Стипендије Министарства просвете, науке и технолошког развоја намењене студентима докторских студија, као и Градске награде града Лознице за најбоље студенте. Један од коаутора је на два рада који су проглашени за најбољи рад на конференцији *IsETRAN* у сесији за роботiku и флексибилну аутоматизацију 2016. и 2019. године, као и аутор рада који је проглашен за најбољи рад у студентској категорији на *International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region (RAAD 2019)*, у Кајзерслаутерну у Немачкој.

Аутор је 13 конференцијских радова и два часописна рада.

1.2. Стечено научно-истраживачко искуство

Кандидат Бранко Лукић је најпре од 2014. године био ангажован као стипендиста Министарства просвете, науке и технолошког развоја, а од 2017. године као истраживач-приправник на пројекту TP35003 – Истраживање и развој интелигентног сервисног робота антропоморфних карактеристика. Кандидат је био учесник билатералног пројекта између Електротехничког факултета у Београду и Института Јожеф Стефан у Љубљани у периоду 2018.–2019. година. У оквиру пројекта у периоду новембар–децембар 2018. године као и у периоду септембар – новембар 2019. године, провео је студијски истраживачки боравак на институту Јожеф Стефан у Љубљани у Лабораторији за колаборативну роботiku (*CoBoTaT Laboratory*). Учествовао је у летњој школи роботике “*IS3 HRC 2016: Italian-Serbian Summer School On Human-Robot Coworking - Master Classes on Human-Robot Coworking and Advanced Robotic Grasping*”, одржане на Машинском факултету у Београду. У јануару 2019. године похађао је курс “*Sliding Mode Control and Observation*”, одржан на *Centrale Supélec* у Паризу, у организацији *European Embedded Control Institute*.

Као стипендиста Министарства просвете, науке и технолошког развоја учествовао је у пројекту у области роботике са посебним ангажманом на развоју нових система актуације и управљању истих. За рад у тиму на тему симултаног управљања роботског зглоба са променљивом крутошћу, а касније и за примену метода оптимизације у проблемима управљања колаборативним роботим је био награђен за најбољи рад на конференцији IcETRAN у сесији за роботiku и флексибилну аутоматизацију 2016. и 2019. године. За активности и резултате на тему управљања механичком импедансом завршног уређаја колаборативног робота експлоатацијом кинематске редунансе добио је награду за најбољи рад у студентској категорији на *International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region* (RAAD 2019), у Кајзерслаутерну у Немачкој.

Кандидат Бранко Лукић је до сада у току докторских студија положио све испите предвиђени планом и програмом и публиковао два часописна и 13 конференцијских радова.

Испити и обавезе предвиђени планом и програмом докторских студија:

Р.Бр.	Испит	Оцена	ЕСПБ
1	Моторна контрола и рехабилитација	10	9
2	Неуралне мреже	10	9
3	Нелинеарни мултиваријабилни системи	10	9
4	Аутономни роботски системи без људске посаде	10	9
5	Увод у научни рад	10	6
6	Пројектовање наменских рачунарских система	10	9
7	Праћење покретних циљева	10	9
8	Теорија роботских система	10	9
9	Аутоматско вођење објеката у простору	10	9
10	Специјални роботски системи	10	9

Р.Бр.	Одрађене обавезе	ЕСПБ
1	студијски истраживачки рад I	15
2	научно стручни рад	3
3	студијски истраживачки рад II	15

Списак радова:

Рад у истакнутом међународном часопису (M22)

1. **Lukić B.**, Jovanović K. and Šekara T.B. (2019) Cascade Control of Antagonistic VSA—An Engineering Control Approach to a Bioinspired Robot Actuator. *Front. Neurorobot.* 13:69. DOI: [10.3389/fnbot.2019.00069](https://doi.org/10.3389/fnbot.2019.00069). IF = 3

Национални часопис међународног значаја (M24)

1. Jovanović K., **Lukić B.**, and Potkonjak V. Feedback Linearization for Decoupled Position/Stiffness Control of Bidirectional Antagonistic Drives. *Facta Universitatis, Series: Electronics and Energetics* Vol. 31, No 1, (March 2018): 51-61. DOI [10.2298/FUEE1801051J](https://doi.org/10.2298/FUEE1801051J)

Саопштење са међународног скупа штампано у целини (M33)

1. **Lukić B.**, Petrić T., Žlajpah L., Jovanović K. (2020) KUKA LWR Robot Cartesian Stiffness Control Based on Kinematic Redundancy. In: Berns K., Görge D. (eds) *Advances in Service and Industrial Robotics. RAAD 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 980. Springer, Cham
2. Knežević N., **Lukić B.**, Jovanović K. (2020) Feedforward Control Approaches to Bidirectional Antagonistic Actuators Based on Learning. In: Berns K., Görge D. (eds) *Advances in Service and Industrial Robotics. RAAD 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 980. Springer, Cham
3. **Lukić B.**, Jovanović K., Šekara T. B and Potkonjak V., "Cascade Control Design for Antagonistic Robot Joint Based on ARX Model Characterization." The 5th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN 2018), Palić, Serbia, June 11 – 14, 2018.
4. **Lukić B.**, Jovanović K., Šekara T.B. (2019) Cascade Gain Scheduling Control of Antagonistic Actuators Based on System Identification. In: Aspragathos N., Koustoumpardis P., Moulanianitis V. (eds) *Advances in Service and Industrial Robotics. RAAD 2018. Mechanisms and Machine Science*, vol 67. Springer, Cham.
5. **Lukić B. Z.**, Jovanović K. M. and Kvašček G. S., "Feedforward neural network for controlling qbmove maker pro variable stiffness actuator," *2016 13th Symposium on Neural Networks and Applications (NEUREL)*, Belgrade, 2016, pp. 1-4. doi: [10.1109/NEUREL.2016.7800116](https://doi.org/10.1109/NEUREL.2016.7800116)
6. **Lukić B.**, Jovanović K. (2017) Minimal Energy Cartesian Impedance Control of Robot with Bidirectional Antagonistic Drives. In: Rodić A., Borangiu T. (eds) *Advances in Robot Design and Intelligent Control. RAAD 2016. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 540. Springer, Cham.
7. **Lukić B.**, Jovanović K., Rakić A., "Realization and Comparative Analysis of Coupled and Decoupled Control Methods for Bidirectional Antagonistic Drives: QBmove maker pro", The 3rd International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN 2016), Zlatibor, Serbia, Jun 13-16, 2016.

8. Jovanović K., **Lukić B.** and Potkonjak V., “Enhanced Puller-Follower Approach for Stiffness Control of Antagonistic Drives”), The 3rd International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN 2016), Zlatibor, Serbia, Jun 13-16, 2016.
9. **Lukić B.**, Jovanović K., “Influence of Mechanical Characteristics of a Compliant Robot on Cartesian Impedance Control Design”, The 2nd International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN 2015), Srebrno Jezero, Serbia, Jun 8-11, 2015.
10. Potkonjak V., **Lukić B.**, Gordić Z., Milosavljević P., “Development of Experimental Platform for Research in Robots Having Compliant Joints”, The 1st International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN 2014), Vrnjačka Banja, June 2014.

Саопштење са међународног скупа штампано у изводу (M34)

1. Knežević N., **Lukić B.**, Jovanović K., Petrić T. and Žlajpah L., “End-Effector Cartesian Stiffness Optimization: Sequential Quadratic Programming Approach”, The 6th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN 2019), Srebrno Jezero, Serbia, Jun 3-5, 2019.

Саопштење са скупа националног значаја штампано у целини (M63)

1. Gordić Z., **Lukić B.**, Lazarević M., “Primena modifikovanog relejnog eksperimenta na sistemu sa dva rezervoara u cilju njegove karakterizacije i projektovanje optimalnog PID regulatora”, INFOTEN-Jahorina, Vol 12, March 2013, pp 1187-1191.
2. Lazarević M., Gordić Z., **Lukić B.**, “Primena numeričkih metoda inverzne Laplasove transformacije u rešavanju jedne klase parcijalnih diferencijalnih jednačina fizičkih procesa”, INFOTEN-Jahorina, Vol 12, March 2013, pp 1191-1195.

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Комисија је размотрила све претходно наведене резултате рада и стечена искуства кандидата Бранка Лукића. На основу приложених докумената и усмене презентације теме докторске дисертације, Комисија је стекла увид у способности кандидата за научно-истраживачи рад и његове могућности да током израде докторске дисертације оствари резултате који ће бити приказани и оцењени од стране међународне научне заједнице. Став Комисије је да кандидат Бранко Лукић испуњава све потребне суштинске и формалне услове да приступи изради докторске под наведеном темом.

2. Предмет и циљ истраживања

Данашња генерација робота се одликује великом прецизношћу, брзином и ефикасношћу рада, међутим они нису безбедни за рад у непосредном окружењу човека и самим тим раде у заштићеном зонама које троше непотребно велики део простора. Следећи изазов како у индустријској тако и у сервисној роботизи јесте развој безбедне физичке интеракције

робота и човека [1, 2] и самим тим оспособљавање робота за много шири спектар задатака у директној интеракцији и сарадњи са човеком [3, 4, 5]. Тренутна генерација колаборативних робота се пре свега одликује додатним сензорским системима који могу да детектују остварену интеракцију и по потреби зауставе робота или доведу до одређене акције која није тренутна већ захтева одређено време процесирања [6]. Да би се остварио циљ - конструисао робот који је безбедан за интеракцију са окружењем, потребно је остварити безбедност и на нивоу актуатора чија би инерција била распрегнута од инерције саме конструкције робота кроз употребу еластичних елемената и на тај начин гарантовала ограничену силу интеракције и у тренутку контакта. Истраживања у области сервисне и колаборативних роботике, довела су до развоја различитих приступа у пројектовању актуатора, најпре константне крутости (CEA – енг. serial elastic actuator) [7, 8], а затим и до актуатора променљиве крутости (BCA – енг. variable stiffness actuator) или нешто општије актуатора променљиве механичке импедансе (ВИА – енг. variable impedance actuator) [9, 10, 11]. Са развојем различитих приступа конструисању [12, 13, 14] искристалисала се изражена потреба за разматрањем ефикасних приступа за управљање оваквим системима који укључују еластичне елементе као најзахтевнијем задатку коришћења BCA [15, 16, 17].

Докторска дисертација има за циљ да доприне следећој генерацији колаборативних робота који ће се заснивати на новој технологији актуације (BCA/ВИА) кроз планирање механичке импедансе [18, 19] завршног уређаја робота (ЕЕ – енг. end-effector). Код ВИА актуатора позиција зглоба робота и позиција актуатора нису круто повезане и постоји еластични пренос који у случају интеракције робота са околином апсорбује удар и на тај начин спречава да дође до оштећења робота, предмета у његовој околини и чини робота безбеднијим за рад у непосредном окружењу човека.

ВИА актуатори су МИМО (енг. Multiple Input-Multiple Output) системи, где се осим позицијом зглоба управља и његовом крутошћу, са изразито нелинеарним карактеристикама [9, 10, 20] и због тога представљају изазов за развој управљачких алгоритама.

Истраживање у оквиру ове докторске дисертације биће усмерено у два правца:

- Управљање механичком импедансом (Картезијанском крутошћу) ЕЕ робота планирањем крутости појединих зглобова робота у комбинацији са променом кинематске конфигурације (кроз кретање у нултом простору – енг. null space).
- Развој метода за ефикасно симултано управљање позицијом и крутошћу актуатора са променљивом крутошћу на нивоу зглоба робота, односно актуатора и унапређење механичке конструкције и управљачке архитектуре оваквих актуатора.

Први део дисертације ће се бавити вишим нивоом управљања где ће се развијати стратегија за управљање Картезијанском крутошћу ЕЕ, док ће други део дисертације бити посвећен управљањем на нивоу једног зглоба са ВИА са посебним нагласком на једну од реализација ВИА – ВИА актуатором у антагонистичкој конфигурацији насталом као резултат техничког узора биолошких система [14, 21, 22, 23].

Први део истраживања ће се фокусирати на оптимизацији Картезијанске крутости ЕЕ. Матрица Картезијанске крутости ЕЕ одређује (статичку) зависност између положаја ЕЕ и силе интеракције која се јавља на ЕЕ у контакту са околином. Матрицом Картезијанске крутости се управља помоћу (променом) кинематске конфигурације робота и променом крутости појединих зглобова робота [18]. За примену приступа заснованог на промени кинематске конфигурације робота неопходно је да постоји редунданса [24], односно да робот има више степени слободе (зглобова) него што конкретни задатак захтева да би се очувала ЕЕ позиција што је приоритет, а да се затим кроз редундансу и нулти простор кинематике оствари жељена матрица крутости ЕЕ. У изради докторске дисертације биће анализирана оба приступа у обликовању матрице Картезијанске крутости ЕЕ. Посебан осврт биће на случајеве када жељена матрица крутости ЕЕ није остварива (услед физичких ограничења). У случајевима када није могуће остварити жељену матрицу Картезијанске крутости ЕЕ, неопходно је правити компромис између вредности елемената матрице Картезијанске крутости ЕЕ који су физички оствариве и жељених вредности. Компромис се може представити као:

- управљање само одређеним елементима из матрице крутости који су од интереса за задатак (нпр. елементи на главној дијагонали матрице крутости или неки појединачни елементи попут крутости дуж осе кретања),
- тражењем оствариве матрице Картезијанске крутости ЕЕ која је „најсличнија” жељеној матрици под одређеним критеријумима који су представљени кроз дефинисану критеријумску функцију.

У другој фази истраживања фокус ће бити усмерен на развој управљачког алгорита ВИА, нарочито ВИА са антагонистичким актуаторима који су жичано погоњени (енг. *tendon driven*) [25, 26, 27]. Полазећи од претпоставке да је прецизан математички модел тешко одредити и да је то нелинеаран систем са два улаза и два излаза, систем ће бити анализиран из перспективе експерименталне идентификације модела и параметара система, нелинеарне и мултиваријабилне теорије управљања. По угледу на радове доступне у литератури биће размотрена употреба каскадних приступа управљању. Такође, размотриће се могућност да се предложена метода примени на ширу класу ВИА.

- [1] Haddadin, S., Albu-Schäffer, A., Hirzinger, G. Safe physical human-robot interaction: measurements, analysis and new insights. In: Springer Tracts in Advanced Robotics, vol. 66, pp. 395–407 (2010)
- [2] De Santis, A., Siciliano, B., De Luca, A., Bicchi, A.: An atlas of physical human–robot interaction. *Mech. Mach. Theory* 43(3), 253–270 (2008)
- [3] Edsinger, A., Kemp, C.C.: Human-robot interaction for cooperative manipulation: handing objects to one another. In: *Proceedings - IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, pp. 1167–1172 (2007)
- [4] Yu, H., Huang, S., Chen, G., Pan, Y., Guo, Z.: Human-robot interaction control of rehabilitation robots with series elastic actuators. *IEEE Trans. Robot.* 31(5), 1089–1100 (2015)
- [5] Pedrocchi, N., Vicentini, F., Malosio, M., Tosatti, L.M.: Safe human-robot cooperation in an industrial environment. *Int. J. Adv. Robot. Syst.* 10(1), 27 (2013)

- [6] De Luca, A., Flacco, F., Bicchi, A., and Scivai, R. Nonlinear decoupled motion-stiffness control and collision detection/reaction for the VSA-II variable stiffness device, in 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (St. Louis, MO: IEEE) (2009).
- [7] Pratt, G. A., and Williamson, M. M. Series elastic actuators. In *Intelligent robots and systems 95*, in Proceedings. 1995 IEEE/RSJ International Conference on Human Robot Interaction and Cooperative Robots, Vol. 1 (Pittsburgh, PA), 399–406. (1995).
- [8] Robinson, D. W., Pratt, J. E., Paluska, D. J., and Pratt, G. A. Series elastic actuator development for a biomimetic walking robot, in *Advanced intelligent mechatronics*, 1999. Proceedings. 1999 IEEE/ASME International Conference (Atlanta, GA), 561–568. (1999).
- [9] Grioli, G., Wolf, S., Garabini, M., Catalano, M., Burdet, E., Caldwell, D., et al. Variable stiffness actuators: the user's point of view. *Int. J. Rob. Res.* 34, 727–743. (2015).
- [10] Vanderborght, B., Albu-Schaeffer, A., Bicchi, A., Burdet, E., Caldwell, D. G., Carloni, R., et al. Variable impedance actuators: a review. *Rob. Auton. Syst.* 61, 1601–1614. (2013)
- [11] Van Ham, R., Sugar, T.G., Vanderborght, B., Hollander, K.W., Lefeber, D.: Compliant actuator designs. *Robot. Autom. Mag.* 16(3), 81–94 (2009)
- [12] Van Ham, R., Vanderborght, B., Van Damme, M., Verrelst, B., Lefeber, D. MACCEPA, the mechanically adjustable compliance and controllable equilibrium position actuator: design and implementation in a biped robot. *Robot. Auton. Syst.* 55(10), 761–768 (2007)
- [13] De, A., Tasch, U. A two-DOF manipulator with adjustable compliance capabilities and comparison with the human finger. *J. Robot. Syst.* 13(1), 25–34 (1996)
- [14] Migliore, S.A., Brown, E.A., DeWeerth, S.P. Biologically inspired joint stiffness control. In: *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation 2005*, pp. 4508–4513 (2005)
- [15] Palli, G., Melchiorri, C., and De Luca, A. On the feedback linearization of robots with variable joint stiffness, in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2008. ICRA 2008 (Pasadena, CA: IEEE), 1753–1759 (2008).
- [16] Wimbock, T., Ott, C., Albu-Schaeffer, A., Kugi, A., and Hirzinger, G. Impedance control for variable stiffness mechanisms with nonlinear joint coupling, in 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (Nice: IEEE), 3796–3803. (2008)
- [17] Chalon, M., Friedl, W., Reinecke, J., Wimboeck, T., and Albu-Schaeffer, A. (2011). Impedance control of a non-linearly coupled tendon driven thumb, in 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (San Francisco, CA), 4215–4221.
- [18] Albu-Schaeffer, A., Fischer, M., Schreiber, G., Schoeppe, F., Hirzinger, G. Soft robotics: what cartesian stiffness can obtain with passively compliant, uncoupled joints? In: *Proceedings of International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2004 (IROS 2004), vol. 4, pp. 3295–3301 (2004)
- [19] Petit, F., Albu-Schaeffer, A.: Cartesian impedance control for a variable stiffness robot arm. In: *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 4180–4186 (2011)
- [20] Van Ham, R., Sugar, T. G., Vanderborght, B., Hollander, K. W., and Lefeber, D.. Compliant actuator designs. *IEEE Rob. Autom. Mag.* 16, 81–94. (2009)

- [21] Nakanishi, Y., Ohta, S., Shirai, T., Asano, Y., Kozuki, T., Kakehashi, Y., et al. Design approach of biologically-inspired musculoskeletal humanoids. *Int. J. Adv. Robot. Syst.* 10, 1–13, (2013)
- [22] Koganezawa, K., Nakazawa, T., and Inaba, T. Antagonistic control of multi-dof joint by using the actuator with non-linear elasticity, in *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2006. (Orlando, FL: ICRA), 2201–2207. (2006).
- [23] Kosta Jovanovic, Veljko Potkonjak and Owen Holland Dynamic modeling of an anthropomimetic robot in contact tasks, *Advanced Robotics*, 28:11, 793-806 (2014)
- [24] Chiaverini, S., Oriolo, G., Maciejewski, A.A.: *Redundant robots*. In: *Springer Handbook of Robotics*, 2nd edn., pp. 221–242. Springer, Cham, (2016)
- [25] Potkonjak, V., Svetozarevic, B., Jovanovic, K., and Holland, O. The puller-follower control of compliant and noncompliant antagonistic tendon drives in robotic systems. *Int. J. Adv. Robot. Syst.* 8:69. (2011).
- [26] Kobayashi, H., and Ozawa, R. Adaptive neural network control of tendon-driven mechanisms with elastic tendons. *Automatica* 39, 1509–1519. (2003).
- [27] Mizuuchi, I., Tajima, R., Yoshikai, T., Sato, D., Nagashima, K., Inaba, M., et al. The design and control of the flexible spine of a fully tendon-driven humanoid “Kenta,” *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (Lausanne)*, 2527–2532. (2002).

3. Полазне хипотезе

Полазне хипотезе докторске дисертације су:

- Промена Картезијанске крутости завршног уређаја редундантног робота се може постићи променом кинематске конфигурације робота или поменом крутости у зглобовима робота.
- Када жељена матрица Картезијанске крутости није остварива потребно је приступити поступку подешавања матрице у могућем простору оптимизације са ограничењима.
- Оптимизацију Картезијанске крутости завршног уређаја робота са проблема оптимизације нелинеарних функција са ограничењем је могуће свести на проблем управљања, где се крутост ЕЕ мења са променом кинематске конфигурације робота али задржавајући жељену позицију завршног уређаја.
- Методе за графичку анализу утицаја кинематске конфигурације робота на Картезијанску крутост завршног уређаја су развијене и могу се користити за анализу и обликовање крутости завршног уређаја (енг. *stiffness ellipse*).
- Прецизан математички модел ВСА/ВИА, који представља нелинеаран МИМО систем, је тешко извести и током времена и експлоатације модел се мења.
- Могуће је развити адекватан управљачки алгоритам за актуаторе са променљивом крутошћу када модел није познат кроз експерименталну идентификацију параметара.

4. Методе истраживања

Методологија која ће се користити у докторској дисертацији почиње са систематском анализом доступних алгоритама за управљање зглобовима са променљивом крутошћу као и алгоритама за обликовање Картезијанске крутости завршног уређаја.

Први део дисертације бавиће се управљањем и оптимизацијом пасивне Картезијанске крутости ЕЕ у току извршавања задатака. Прво ће бити истражено како се жељена Картезијанска крутост ЕЕ може постићи кинематичком редунаansom (реконфигурацијом положаја зглобова), а затим у другом кораку испитивање и развој метода за постизање Картезијанске крутости променом крутости појединачних зглобова робота. Недостатак итеративних поступака за оптимизацију пасивне Картезијанске крутости ЕЕ, које су већ коришћене, је тај што се унапред не зна (максимални) број итерација које ће довести до оптималног решења. Поред тога, да би алгоритам могао радити у реалном времену, потребан је рачунар са перформансама које омогућавају довољно брзо израчунавање итеративне методе. Због тога ће се оптимизација Картезијанске крутости ЕЕ реализовати кроз кретање у нултом простору кинематике и са проблема оптимизације нелинеарних функција са ограничењима (ограниченог опсега кретања и крутости зглобова) прећи у пробем управљање кроз инверзну кинематику. У зависности од потреба задатка, дефинисаће се различите норме и њихове оптимизационе функције које могу оптимизовати целу матрицу крутости ЕЕ или само њене појединачне елементе.

Потреба за реконфигурацијом робота током извршавања задатка већ је препозната у индустрији када је потребно реконфигурисати робот како би се постигла већа крутост и последично већа прецизност.

У другом делу разматраће се развој алгоритама за управљање антагонистичким ВИА са предложеном каскадном управљачком структуром, где се идентификација параметара система реализују идентификацијом доминантне динамике система и подешавањем контролера у складу са идентификованом доминантном динамиком. Разматраће се реализације статичких декуплера који мапирају вредности жељених крутости и позиција ВИА са једне стране и позиција мотора са друге. Декуплери могу бити у случају једноставнијих математичких модела аналитички пројектовани, или у случају комплекснијих релација улазно-излазних карактеристика декуплер може бити одређен нумерички или техникама машинског учења које могу да интерполирају улазно-излазну карактеристику ВИА. Контролери који се пројектују за управљање ВИА, представљаће компромис између перформанси управљачког система и робусности.

5. Очекивани научни доприноси

Очекивани научни доприноси докторске дисертације су:

- Систематичан преглед литературе на тему приступа управљању механичком импедансом завршног уређаја робота и величина којима се ова карактеристика описује.
- Развој нових техника управљања матрицом крутости завршног уређаја робота реконфигурацијом редунаantне кинематске структуре робота и/или подешавањем крутости појединих зглобова робота уз очување жељене статичке позиције завршног уређаја.
- Развој нових техника управљања Картезијанске крутости завршног уређаја дуж осе кретања завршног уређаја робота.

- Увођење нових формулација обликовања Картезијанске крутости завршног уређаја робота као проблема оптимизације нелинеарних функција са ограничењем кроз итеративну процедуру.
- Реализација управљачких приступа за једну класу актуатора са променљивом крутошћу уз могућност симултаног управљања крутошћу и позицијом.

6. План истраживања

Истраживање ће бити спроведено у два правца. Први правац ће разматрати управљање механичком импедансом завршног уређаја нове генерације колаборативних робота погоњених актуаторима променљиве крутости кроз реконфигурацију индустријског робота и управљање крутошћу појединог зглоба. Други правац истраживања ће се бавити приступима да се постигну жељена позиција и крутост појединог зглоба робота.

Истраживање ће започети са развојем алгоритама за управљањем Картезијанском крутошћу ЕЕ робота, користећи већ постојећи математички, као и детаљни Матлаб/Симулинк модел *KUKA LWR* робота са 7 степени слободе. Такође, доступни *CAD* модел *KUKA LWR* робота имплементиран у *MiJoCo HAPTIX* графичком окружењу у интеграцији са Матлаб/Симулинк моделом робота биће коришћени за стварање симулационог окружења за тестирање алгоритама. Иницијално тестирање ће бити спроведено у симулацијама, а затим верификовани на лабораториској поставци. За тестирање алгоритама као хардверске платформе користиће се робот *KUKA LWR* и робот *Panda* (производ фирме *Franka Emika*), оба са по 7 степени слободе као редуванте кинематске антропоморфне конфигурације које софтверки могу да опонашају промену крутости појединих зглобова.

У области симултаног управљања позицијом и крутошћу појединог ВИА биће унапређена хардверска платформа антагонистичког жичано погоњеног ВИА и развијен математички и симулациони модел, на коме ће бити тестирани управљачки алгоритми за симултано управљање позицијом и крутошћу. Истраживање ће се примарно усмерити на управљачким алгоритмима имплементираним кроз каскадне структуре (спољашње петље за регулисање позиције и крутости актуатора и унутрашње петље за регулацију позиције позиције погонских мотора) са декуплером који има задатак да преслика жељену позицију и крутост ВИА актуатора на позиције мотора. Подешавање контролера у управљачкој структури засниваће се на идентификацији доминантне динамике делова система за које се одређени контролери подешавају. За контролере у спољашњој петљи, систем који чија се доминантна динамика процењује састојаће се од механичког дела (осовина актуатора, мотори са редукторима, еластичне опруге...) и унутрашњих петљи за управљање позицијама мотора.

Коначан резултат истраживања ће водити отварању нових могућих примена следеће генерације колаборативних робота.

7. Закључак и предлог

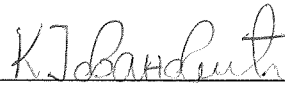
На основу изложеног, Комисија констатује да кандидат Бранко Лукић, мастер инжењер електротехнике и рачунарства, испуњава све потребне услове за израду докторске дисертације под насловом „Симултано управљање позицијом и крутошћу робота погоњеног актуаторима променљиве крутости“. Поред испуњености формалних услова, кандидат је демонстрирао способност систематичног приступа анализи проблема и теоријским и практичним знањима у управљању роботских система, као и излагању резултата у научној заједници.

Предложена тема је врло актуелна и заснована како на истраживачким активностима научне заједнице тако и на комерцијалним потребама тржишта. Предложени научни доприноси би свој допринос имали у развоју нове генерације колаборативних робота који се развијају на технологији актуатора променљиве крутости и проширењу могућности њихове примене.

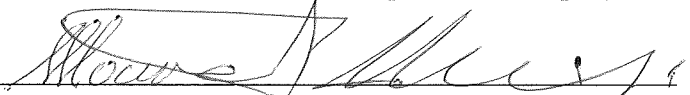
Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да кандидату Бранку Лукићу, мастер инжењеру електротехнике и рачунарства, одобри израду докторске дисертације под насловом „Симултано управљање позицијом и крутошћу робота погоњеног актуаторима променљиве крутости“, под менторством др Косте Јовановића, доцента на Електротехничком факултету Универзитета у Београду.

У Београду, 26.02.2019. године

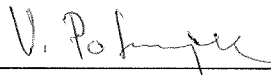
ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



др Коста Јовановић, доцент,
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Томислав Б. Шекара, редовни професор,
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Вељко Потокоњак, редовни професор,
Универзитет Метрополитан у Београду



др Милан Бебић, ванредовни професор,
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет