

## NASTAVNO-NAUČNOM VEĆU

Predmet: Referat o urađenoj doktorskoj disertaciji kandidata **Branka Z. Lukića**.

Odlukom Nastavno-naučnog veća Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu br. 5018/13-3 od 29.04.2022. godine, imenovani smo za članove Komisije za pregled, ocenu i odbranu doktorske disertacije kandidata **Branka Z. Lukića** pod naslovom:

**„Simultano upravljanje pozicijom i krutošću robota pogonjenog aktuatorima promenljive krutosti”**

odnosno na engleskom

**“Simultaneous Stiffness and Position Control of Robots With Variable Stiffness Actuators”**

Posle pregleda dostavljene Disertacije i drugih pratećih materijala i razgovora sa Kandidatom, Komisija je sačinila sledeći

## R E F E R A T

### 1. UVOD

#### 1.1. Hronologija odobravanja i izrade disertacije

Branko Z. Lukić je upisao doktorske akademske studije Elektrotehnike i računarstva, modul Upravljanje sistemima i obrada signala, na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, školske 2013/2014 godine. Sve ispite i nastavne obaveze položio je sa najvišom ocenom i time stekao pravo za podnošenje doktorske disertacije na pregled i ocenu.

30.01.2020. godine kandidat je prijavio temu za izradu doktorske disertacije pod nazivom „Simultano upravljanje pozicijom i krutošću robota pogonjenog aktuatorima promenljive krutosti”.

04.02.2020. godine Komisija za studije trećeg stepena razmatrala je predlog teme za izradu doktorske disertacije i predlog Komisije o oceni podobnosti teme i kandidata uputila Nastavno-naučnom veću na usvajanje.

21.02.2020. godine Nastavno-naučno veće imenovalo je Komisiju za ocenu uslova i prihvatanje teme doktorske disertacije ( Odluka br. 5018/13-1 od 21.02.2020. godine) u sastavu:

- dr Tomislav Šekara, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet,
- dr Veljko Potkonjak, redovni profesor, Univerzitet Metropolitan,
- dr Milan Bebić, vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet.

24.02.2020 Kandidat je polagao javnu usmenu odbranu teme doktorske disertacije.

10.03.2020. godine Nastavno-naučno veće usvojilo je Izveštaj Komisije za ocenu uslova i prihvatanje teme doktorske disertacije. Odluka br. 5018/13-2 od 10.03.2020. god.

30.04.2020. godine Veće naučnih oblasti tehničkih nauka dalo je saglasnost na predlog teme doktorske disertacije „Simultano upravljanje pozicijom i krutošću robota pogonjenog aktuatorima promenljive krutosti“.

28.03.2022. godine kandidat je predao doktorsku disertaciju na pregled i ocenu.

05.04.2022. godine Komisija za studije trećeg stepena potvrdila je ispunjenost potrebnih uslova za podnošenje predloga Nastavno-naučnom veću Elektrotehničkog fakulteta za formiranje Komisije za pregled i ocenu doktorske disertacije.

29.04.2022. godine Nastavno-naučno veće Fakulteta imenovalo je Komisiju za pregled i ocenu doktorske disertacije (broj odluke 5018/13-3 od 29.04.2022. godine) u sastavu:

- dr Kosta Jovanović, vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet
- dr Tomislav B. Šekatra, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet
- dr Tadej Petrič, viši naučni saradnik, Institut Jožef Stefan, Ljubljana, Slovenija
- dr Mirko Raković, vanredni profesor, Univerzitet u Novom Sadu – Fakultet tehničkih nauka
- dr Aleksandar Rakić, vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet

Na osnovu člana 101. Statuta Univerziteta u Beogradu, člana 74. Statuta Univerziteta u Beogradu-Elektrotehničkog fakulteta i zahteva studenta, odobreno je produženje roka za završetak studija do isteka trostrukog broja školskih godina potrebnih za realizaciju upisanog studijskog programa.

## 1.2. Naučna oblast disertacije

Doktorska disertacija pripada naučnoj oblasti Elektrotehnike i računarstva, za koju je matičan Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu. Dalje, u užem smislu, disertacija prvenstveno pripada naučnoj oblasti automatika, odnosno robotika i upravljanje sistemima.

Mentor doktorske disertacije Kosta Jovanović izabran je u zvanje vanredni profesor za užu naučnu oblast Automatika. Mentor ima višegodišnje istraživačko i nastavno iskustvo vezano za niz tematika kojima se bavi doktorska disertacija kandidata.

### 1.3. Biografski podaci o kandidatu

Branko Lukić, master inženjer elektrotehnike i računarstva, rođen je 30.03.1990. godine u Loznicama. Osnovnu školu je završio u Lešnici, a srednju Tehničku školu u Loznicama kao učenik generacije. Elektrotehnički fakultet u Beogradu upisao je 2008 godine. Diplomirao je na Odseku za signale i sisteme 2012. godine. Iste godine upisao je master studije na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. Master studije je završio 2013. godine na temu „Razvoj eksperimentalne platforme za ispitivanje uticaja popustljivosti u zglobovima na ponašanje robota“ pod mentorstvom prof. Veljka Potkonjaka. Doktorske studije na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu na modulu Upravljanje sistemima i obrada signala upisao je 2013. godine.

Od aprila 2014. do decembra 2016. godine angažovan je na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu na projektu ministarstva kao stipendista Ministarstva, a od januara 2017. godine angažovan je kao istraživač pripravnik na projektu ministarsva „Istraživanje i razvoj ambijentalno inteligentnih servisnih robota antropomorfnih karakteristika“. U septembru 2020. godine izabran je u zvanje istraživač saradnik.

Učesnik je srpsko-slovenačkog bilateralnog projekta „Razvijanje novih pristupa za olakšavanje kolaborativnog rada robota najnovije generacije i čoveka u zadacima zajedničke manipulacije objektima“, između Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu i Instituta Jožef Stefan u Ljubljani u periodu 2018.–2019. godine. U periodu jul 2020.–jul 2022. godine učesnik je na naučnoistraživačkom projektu „Mechanical Impedance Estimation and Planning for the Next Generation Robots–ForNextCobot“, u okviru Programa za izvrsne projekte mladih istraživača–PROMIS Fonda za nauku Republike Srbije.

U avgustu 2016. godine učestvovao je na letnjoj školi robotike „IS3 HRC 2016: Italian-Serbian Summer School On Human-Robot Coworking - Master Classes on Human-Robot Coworking and Advanced Robotic Grasping“, održane na Mašinskom fakultetu u Beogradu. U periodu novembar-decembar 2018. godine kao i u periodu septembar – novembar 2019. godine, proveo je studijski istraživaci boravak na institutu Jožef Stefan u Ljubljani u Laboratoriji za kolaborativnu robotiku (CoBoTaT Laboratory). U januaru 2019. godine pohađao je kurs „Sliding Mode Control and Observation“, održan na Centrale Supélec u Parizu, u organizaciji European Embedded Control Institute.

U 2014., 2015. i 2016. godini, dobitnik je Stipendije Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja namenjene studentima doktorskih studija, kao i Gradske nagrade grada Loznice za najbolje studente. Jedan od koautora je na dva rada koji su proglašeni za najbolji rad na konferenciji IcETRAN u sesiji za robotiku i fleksibilnu automatizaciju 2016. i 2019. godine, kao i autor rada koji je proglašen za najbolji rad u studentskoj kategoriji na International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region (RAAD 2019), u Kajzerslauternu u Nemačkoj.

## **2. OPIS DISERTACIJE**

### 2.1. Sadržaj disertacije

Disertacija pod naslovom „Simultano upravljanje pozicijom i krutošću robota pogonjenog aktuatorima promenljive krutosti“ napisana je na 127 strana na srpskom jeziku i sadrži 61 sliku.

Na početku disertacije dati su Sažetci teze na srpskom i engleskom jeziku, Zahvalnica i Sadržaj. Sledi poglavlje „Uvod“ u kome su prezentovani motivacija izbora teze, naučni doprinosi i pregled strukture teze. Ostatak disertacije je organizovan u četiri poglavlja „Bezbedna interakcija između čoveka i robota“ koja predstavlja pregled literature o ostvarivanju popustljivosti kod robota na nivou zglobovi i na nivou zavšnog uređaja robota. Zatim slede poglavlja „Upravljanje krutošću na nivou završnog uređaja robota“ i „Upravanje krutošću na nivou zglobovi“, u kojima su predstavljeni razvijeni algoritmi koji prestavljaju glavne doprinose disertacije. Disertacija se završava poglavljem „Zaključak“, nakon čega slede spisak korišćene literature sa referencama navedenih po redosledu pojavljivanja, biografija kandidata, Izjava o autorstvu, Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada i Izjava o korišćenju.

## 2.2. Prikaz pojedinačnih poglavlja

Prvo poglavlje predstavlja uvodni tekst koji čitaocu daje informacije o motivaciji za izbor tematike rada, naučnim doprinosima disertacije i o njenoj strukturi.

Drugo poglavlje predstavlja pregled literature o ostvarivanju popustljivosti kod robota na nivou zglobovi i na nivou zavšnog uređaja robota. Na nivou zglobovi i na nivou zavšnog uređaja robota je pojašnjeno kao se realizuje aktivna krutost, pasivna krutost, kao i njihova kombinacija. Pasivna krutost na nivo zglobovi je posmatrana kroz aktuatore sa konstantnom krutošću (SEA) i aktuatore sa promenljivom krutošću (VSA). Data je podela VSA spram načina na koji se krutost ostvaruje: 1) strukturno kontrolisana krutost; 2) mehanički kontrolisana krutost i 3) antagonistički kontrolisana krutost. Opisane su različite realizacije za svaki od ova tri tipa, a poseban fokus je dat na žičano pogonjene aktuatore sa promenljivom krutošću. Na nivou završnog uređaja robota osim načina ostvarivanja krutosti prikazana je i grafička metoda za analizu krutosti završnog uređaja robota koja se zasniva na elipsama i elipsoidima krutosti.

Treće poglavlje prikazuje implementacije upravljačkih metoda za oblikovanje krutosti završnog uređaja robota. Doprinosi teze u ovom poglavlju su u delu koji opisuje oblikovanje pasivne krutosti završnog uređaja koja se ostvara promenom krutosti na nivou zglobova i ili promenom kinematske konfiguracije kinematski redundantnog robota. Razvijeni algoritam za oblikovanje krutosti u završnom uređaju robota promenom konfiguracije robota u nultom prostoru je eksperimentalno verifikovan na laboratorijskoj postavci robota KUKA LWR.

Četvrto poglavlje prikazuje implementacije upravljačkih metoda za simultano praćenje pozicije i krutosti na nivou zglobovi robota. Najpre je prikazan razvoj žičano pogonjenog antagonističkog zglobovi promenljive krutosti, zatim njegovo modeliranje kroz eksperimentalnu identifikaciju parametara, a na kraju implementacija predložene upravljačke strukture. Kontroleri upravljačke strukture su podešeni da budu robusni i da predstavljaju kompromis između performansi i brzine sistema. Predložena upravljačka struktura kao bitnu komponentu ima statički dekupler koji mapira pozicije pokretačkih aktuatora sa pozicijom i krutošću osovine antagonističkog aktuatora. Za jednostavnije matematičke modele predložen je statički dekupler, dok je za kompleksnije modele, kao što je qb aktuator koji je korišćen u istraživanjima u ovoj disertaciji, predložen dekupler na bazi neuralne mreže koji u upravljačkoj strukturi može imati ulogu *feedforward* upravljačke komponente.

Peto poglavlje je zaključak. Tu su još jednom istaknuti ključni naučni doprinosi disertacije i ostvareni rezultati

### **3. OCENA DISERTACIJE**

#### **3.1. Savremenost i originalnost**

Oblasti u kojima su ostvareni doprinosi u disertaciji se mogu podeliti u dve celine: (1) Simultano upravljanje pozicijom i krutošću žičano pogonjenog aktuatora promenljive krutosti i (2) Oblikovanje krutosti završnog uređaja robota pogonjenog aktuatorima promenljive krutosti. Doktorska disertacija obrađuje izuzetno aktuelne naučne oblasti koje su u ekspanziji i još uvek nisu doživele svoj puni potencijal.

Poslednjih decenija istraživanja u oblasti robotike su usmerena ka razvoju robota sličnim čoveku i u mehaničkom i u kognitivnom smislu. Primeri žičano pogonjenih humanoidnih robota su ECCEROBOT i Kenshiro. Veliki broj trenutnih istraživanja je usmeren na kolaborativne robeote i bezbednu fizičku interakciju između čoveka i robota, što govori o aktuelnosti i savremenosti ove oblasti. Brojna istraživanja pokazala su da saradnja robota i čoveka osim što postaje sve neophodnija u proizvodnim pogonima može imati pozitivan socijalni i ekonomski uticaj i istovremeno smanjiti broj povreda na radu ljudi prilikom obavljanja fizički teških poslova.

Originalnost ove doktorske disertacije ogleda se u razvoju novih upravljačkih algoritama za simultano upravljanje pozicijom i krutošću antagonističkih aktuatora promenljive krutosti i na oblikovanju krutosti završnog uređaja robota pogonjenog aktuatorima promenljive krutosti.

Algoritam za simultano upravljanje pozicijom aktuatora promenljive krutosti je implementiran na žičano pogonjenoj hardverskoj realizaciji, gde su parametri kontrolera dobijeni identifikacijom dominantne dinamike delova elektro-mehaničkog sistema aktuatora. Upravljanje aktuatorom u većem opsegu krutosti je zahtevno jer sa promenom krutosti menja se i dinamika aktuatora što je posebno izraženo kod oscilacija koje se javljaju u sajlama žičano pogonjenih aktuatora. Predloženi tehniku *gain scheduling* omogućava promenu pojačanja kontrolera tako da se upravljanje aktuatorom menja sa njegovom promenom krutosti i samim tim promenom dinamike.

Kod oblikovanja matrice krutosti završnog uređaja robota, opšti problem je rešavanje nelinearnih relacija koje postoje između pozicija i krutosti aktuatora (zglobo robota) sa jedne strane i pozicije i krutosti završnog uređaja robota sa druge strane. Algoritam za oblikovanju krutosti završnog uređaja robota pogonjenog aktuatorima promenljive krutosti predstavlja problem optimizacije nelinearnih funkcija u višedimenzionom prostoru, koji je u ovoj disertaciji razmatran kao problemom upravljanja u nultom prostoru kinematike robota. Upravljanje krutosti završnog uređaja robota je primenjeno duž pravca kretanja kao najverovatnijem pravcu kontakta sa okolinom na primeru *peg-in-hole* koji simulira zadatak montaže u proizvodnom pogonu, tako da dobijeni rezultati imaju potencijalnu industrijsku primenu.

#### **3.2. Osrv na referentnu i korišćenu literaturu**

U ovoj doktorskoj disertaciji, analizirana literatura je obimna i relevantna. Navedeno je ukupno 141 bibliografska referenci. Literatura sadrži radove relevantne za oblasti istraživanja u tezi. Najbrojnije reference su iz oblasti popustljivih aktuatora i oblikovanja krutosti završnog uređaja koji su ujedno predmet ove disertacije. Prikazane reference daju kompletну analizu trenutnih dostignuća u predstavljenim oblastima. Spisak literature uključuje i relevantne radove koje je kandidat publikovao kao autor ili koautor. Među navedenom literaturom u ovim oblastima nalaze se relevantne

reference, počevši od osnovnih ideja pa do najnovijih rezultata publikovanih u prestižnim međunarodnim časopisima i zbornicima radova sa konferencija u oblasti.

### 3.3. Opis i adekvatnost primenjenih naučnih metoda

U doktorskoj disertaciji su korišćene aktuelne inženjerske i naučne metode (zasnovane na relevantnoj literaturi) koje se tiču teorije upravljanja, modeliranja i identifikacije sistema, a primjenje na antagonističke VSA i kolaborativne robote.

Na sistematičan način je izvršeno:

- Proučavanje i analiza dostupne literature i naučnih radova koji se tiču popustljivosti na nivou aktuatora (zglobo robota).
- Proučavanje i analiza dostupne literature i naučnih radova koji se tiču popustljivosti na nivou završnog uređaja robota.
- Formiranje pristupa gde se oblikovanje krutosti završnog uređaja robota iz optimizacije nelinearnih funkcija sa ograničenjima prebacuje u problem upravljanja u nultom prostoru.
- Oblikovanje krutosti završnog uređaja analizom oblikovanja popustljivosti završnog uređaja.
- Formiranje pristupa za modeliranje i projektovanje upravljačke kaskadne strukture zasnovane na identifikaciji dominantne dinamike sistema, za simultano upravljanje pozicijom i krutošću žičano pogonjenih antagonistički aktuatora promenljive krutosti.
- Implementacija razvijenih algoritama na laboratorijskoj postavci žičano pogonjenih antagonistički aktuatora promenljive krutosti.
- Implementacija razvijenih algoritama na laboratorijskoj postavci robota KUKA LWR.

### 3.4. Primenljivost ostvarenih rezultata

Tematika kojom se bavi doktorska disertacija je aktuelna i poslednjih godina je u izuzetnoj ekspanziji. Tematika disertacije je zastupljena i primenljiva na više istraživačkih polja, od razvoja popustljivih aktuatora nove generacije preko kolaborativnih i servisnih robota sve do medicinski pomagala i egzoskeleta, tj. gde god postoji potreba za direktnim kontaktom između čoveka i mehaničkih uređaja.

Rezultati koji su ostvareni na nivou (žičano pogonjenog) aktuatora sa promenljivom krutošću mogu se primeniti na širu klasu antagonističkih aktuatora nezavisno od njihove konstrukcije. Jedan redak primer komercijalno dostupnog aktuatora koji je analiziran u okviru disertacije u poglavlju 4 je qb move maker pro. Sama činjenica da su komercijalno dostupni aktuatori retkost i nisu široko rasprostranjeni, to primenu algoritama za upravljanje ograničava na namenski razvijene aktuatore koji se koriste ili u istraživačke svrhe ili u mehanizmima specijane namene.

Rezultati za oblikovanje krutosti koji su ostvareni na nivou završnog uređaja robota imaju primenu na kinematski redundantnim robotima, nezavisno od toga da li su roboti pogonjeni popustljivim aktuatorima ili krutim aktuatorima opremljeni sa dodatnim senzorima momenta. Rezultati mogu biti primjenjeni na krute industrijske robote koji poseduju neku elastičnost u prenosnom sistemu u

kontaktnim zadacima gde se generiše velika sila ili prilikom podizanja tereta. Kod kolaborativnih roboti primena je šira, i može se primeniti kod većeg broja zadataka gde je potrebno kontrolisati ponašanje robota pri kontaktu (zadatak montaže, podizanje tereta, testerisanje, bušenje, poliranje, i sl.).

### 3.5. Ocena dostignutih sposobnosti kandidata za samostalni naučni rad

Kandidat Branko Z. Lukić je tokom svojih doktorskih studija pokazao sve suštinske osobine neophodne za naučnoistraživački rad, kao što su: analitičko pretraživanje stručne literature, razumevanje i primena teorijskih i praktičnih koncepata, definisanje naučnih problema, sistematičan pristup rešavanju postavljenih zadataka, sposobnost razvoja upravljačkih algoritama, kao i veštine analize, obrade i prezentovanja dobijenih rezultata. Uz to, kandidat je pokazao izuzetan nivo samostalnosti u svom naučnoistraživačkom radu. Sve navedeno Komisija smatra izuzetno važnim osobinama za dalji naučni rad kandidata.

## **4. OSTVARENI NAUČNI DOPRINOS**

### 4.1. Prikaz ostvarenih naučnih doprinosa

Ostvareni naučni doprinosi su sledeći:

- 1) Sistematičan i detaljan pregled literature, teoretskih osnova i postojećih rešenja u oblasti upravljanja pozicijom i krutošću aktuatora promenljive krutosti i upravljanja pozicijom i krutošću završnog uređaja robota.
- 2) Razvoj i realizacija hardverske platforme žičano pogonjenog antagonističkog zglobova sa promenljivom krutošću za eksperimentalno testiranje upravljačkih algoritama.
- 3) Realizacija upravljačkih pristupa za jednu klasu aktuatora sa promenljivom krutošću uz mogućnost simultanog upravljanja krutoću i pozicijom.
- 4) Razvoj tehnika upravljanja matricom krutosti završnog uređaja robota promenom kinematske konfiguracije redundantne kinematske strukture robota (kretanje u nultom prostoru) i/ili podešavanjem krutosti pojedinih zglobova robota uz očuvanje željene statičke pozicije završnog uređaja.
- 5) Razvoj tehnika upravljanja Kartezijanske krutosti završnog uređaja robota duž ose kretanja završnog uređaja robota.
- 6) Uvođenje novih formulacija oblikovanja Kartezijanske krutosti završnog uređaja robota kao problema optimizacije nelinearnih funkcija sa ograničenjem kroz iterativnu proceduru.

#### 4.2. Kratka kritička analiza rezultata istraživanja

Naučni doprinosi navedeni u tački 4.1 predstavljaju sledeća unapređenja naučnih znanja u poređenju sa postojećim stanjem:

- Predložena je i implementirana kaskadna upravljačka struktura za simultanuo upravljanje pozicijom i krutošću na hardverskoj postavci žičano pogonjenog antagonističkog aktuatora promenljive krutosti gde su kontroleri podešeni spram identifikovane dominante dinamike. Ovakav metod upravljanja je robustan i jednostavan za implementaciju što omogućava širu praktičnu primenu.
- Razvijena je i implementirana tehnika upravljanja krutosti završnog uređaja promenom kinematske konfiguracije robota, gde je problem opimizacije nelinearnih sistema jednačina zamenjen problemom upravljanja u nultom prostoru. Pozicijom završnog uređaja se upravlja u fiksiranom kordinatnom sistemu vezanom za bazu robota, dok krutost završnog uređaja oblikuje u pokretnom koordinatnom sistemu vezanom za završni uređaj robota.

#### 4.3. Verifikacija naučnih doprinosa

Naučni doprinosi koji su rezultat istraživanja u okviru doktorske disertacije su publikovani u sledećim radovima klasifikovanim po M kategorijama po Pravilniku Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije:

Kategorija M22

[1] B. Lukić, K. Jovanović and T. B. Šekara, "Cascade Control of Antagonistic VSA—An Engineering Control Approach to a Bioinspired Robot Actuator," *Frontiers in Neurorobotics*, vol. 13, no. 69, pp. 53-67, 2019. DOI: 10.3389/fnbot.2019.00069

Kategorija M24

[2] Kosta Jovanović, Branko Lukić, and Veljko Potkonjak. "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

Kategorija M51

[3] N. Knežević, B. Lukić, K. Jovanović, L. Žlajpah and T. Petrič, "End-effector Cartesian stiffness shaping - sequential least squares programming approach," *Serbian Journal of Electrical Engineering*, vol. 18, no. 1, pp. 1-14, 2021. DOI: 10.2298/SJEE2101001K

Kategorija M33

[4] Branko Lukić, Kosta Jovanović, Nikola Knežević, Leon Žlajpah, Tadej Petrič (2020, June). Maximizing the End-Effector Cartesian Stiffness Range for Kinematic Redundant Robot with Compliance. In *International Conference on Robotics in Alpe-Adria Danube Region* (pp. 208-217). Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-48989-2\_23

[5] N. Knežević, B. Lukić and K. Jovanović, "Feedforward Control Approaches to Bidirectional Antagonistic Actuators Based on Learning," in *Advances in Service and Industrial Robotics*, Cham, Springer, 2020, pp. 337-345. DOI: 10.1007/978-3-030-19648-6\_39

[6] B. Lukić, T. Petrič, L. Žlajpah and K. Jovanović, "KUKA LWR Robot Cartesian Stiffness Control Based on Kinematic Redundancy," in The 28th International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region, RAAD 2019, Kaiserslautern, Germany, 2019.

DOI: 10.1007/978-3-030-19648-6\_36

[7] B. Lukić, K. Jovanović and T. B. Šekara, "Cascade Gain Scheduling Control of Antagonistic Actuators Based on System Identification," in Advances in Service and Industrial Robotics. RAAD 2018. Mechanisms and Machine Science, Cham, Springer, 2018, pp. 425-435.

DOI: 10.1007/978-3-030-00232-9\_45

[8] Branko Lukić, Kosta Jovanović, and Tomislav B. Šekara. "Cascade Control Design for Antagonistic Robot Joint Based on ARX Model Characterization." in Proceedings of 5th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN 2018), Palić, Serbia, June 11 – 14, 2018.

[9] B. Z. Lukić, K. M. Jovanović and G. S. Kvaščev, "Feedforward neural network for controlling qbmove maker pro variable stiffness actuator," in 2016 13th Symposium on Neural Networks and Applications (NEUREL), Belgrade, Serbia, 2016. DOI: 10.1109/NEUREL.2016.7800116

[10] Branko Lukić and Kosta Jovanović. "Minimal Energy Cartesian Impedance Control of Robot with Bidirectional Antagonistic Drives." International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region. Springer, Cham, 2016.p. 56-64. DOI 10.1007/978-3-319-49058-8\_7

[11] B. Lukić, K. Jovanović and A. Rakić, "Realization and Comparative Analysis of Coupled and Decoupled Control Methods for Bidirectional Antagonistic Drives: QBmove maker pro," in Proceedings of 3rd International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering, Zlatibor, Serbia, 2016.

[12] Kosta Jovanović, Branko Lukić, "Enhanced Puller-Follower Approach for Stiffness Control of Antagonistic Drives"), in Proceedings of 3rd International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN 2016), Zlatibor, Serbia, Jun 13-16, 2016.

[13] B. Lukić and K. Jovanović, "Influence of Mechanical Characteristics of a Compliant Robot on Cartesian Impedance Control Design," in Proceedings of 2nd International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering, Silver Lake, Serbia, 2015.

[14] Veljko Potkonjak, Branko Lukić, Zaviša Gordić, Predrag Milosavljević, "Development of Experimental Platform for Research in Robots Having Compliant Joints", in Proceedings of 1st International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN 2014), Vrnjačka Banja, June 2014.

Kategorija M34

[15] Nikola Knežević, Branko Lukić, Kosta Jovanović, Tadej Petrič and Leon Žlajpah. "End-Effector Cartesian Stiffness Optimization: Sequential Quadratic Programming Approach", The 6th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN 2019), Silver Lake, Serbia, Jun 3-5, 2019.

Rad [6] koji predstavlja osnovu za istraživanje prikazano u poglavljju 3 je nagrađen kao najbolji rad u studentskoj kategoriji na 28th International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region, RAAD 2019, održane u Kajzerslautenu u Nemačkoj.

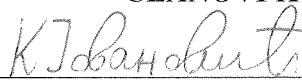
## 5. ZAKLJUČAK I PREDLOG

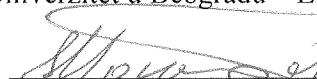
Komisija smatra da doktorska disertacija kandidata Branka Z. Lukića, master inženjera elektrotehnike i računarstva, pod naslovom „Simultano upravljanje pozicijom i krutošću robota pogonjenog aktuatorima promenljive krutosti“, ispunjava sve suštinske i formalne uslove predviđene Zakonom o visokom obrazovanju, kao i propisima Univerziteta u Beogradu i Elektrotehničkog fakulteta. Navedeni naučni doprinosi se odnose na pospešivanje integracije kolaborativnih robota robota u čovekovo i industrijsko okruženje kroz poboljšanje performansi ovih robota putem upravljanja pozicijom i krutošću završnog uređaja u zatvorenoj sprezi, kao i modeliranju i razvoju upravljački algoritama jedne klase aktuatora sa promenljivom krutošću kao pogona kolaborativnih robota nove generacije. Rezultati su eksperimentalno demonstrirani na robotu KUKA LWR, namenskom antagonističkom aktuatoru razvijenom na Elektrotehničkom fakultetu i na *qbmove* komercijalno dostupnom aktuatoru. Većina navedenih rezultata je verifikovana u publikacijama kandidata ili je poslata u časopise i čeka recenziju.

Uzimajući u obzir sve navedeno Komisija smatra da doktorska disertacija Branka Z. Lukića sadrži originalne naučne doprinose u aktuelnoj oblasti upravljanja kolaborativnih robota, kao i u oblasti upravljanja aktuatora promenljive krutosti, kao i da je izradom ove doktorske disertacije kandidat Branko Z. Lukić demonstrirao spremnost za samostalan naučno-istraživački rad. Stoga Komisija sa zadovoljstvom predlaže Nastavno-naučnom veću Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu da se doktorska disertacija pod nazivom „Simultano upravljanje pozicijom i krutošću robota pogonjenog aktuatorima promenljive krutosti“ prihvati, izloži na uvid javnosti i uputi na konačno usvajanje Veću naučnih oblasti tehničkih nauka Univerziteta u Beogradu.

U Beogradu, 04.05.2022. godine

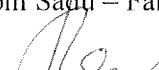
### ČLANOVI KOMISIJE

  
dr Kosta Jovanović, vanredni profesor  
Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet

  
dr Tomislav B. Sekara, redovni profesor  
Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet

  
dr Tadej Petrič, viši naučni saradnik  
Institut Jožef Stefan, Ljubljana, Slovenija

  
dr Mirko Raković, vanredni profesor  
Univerzitet u Novom Sadu – Fakultet tehničkih nauka

  
dr Aleksandar Rakić, vanredni profesor  
Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet