

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата **Косте М. Јовановића**.

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета Универзитета у Београду бр. 5017/10-3 од 27.1.2016. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата **Косте М. Јовановића** под насловом

Моделирање и управљање антропомиметичког робота са антагонистичким погонима у контактним и бесконтактним задацима

[engleski: Modeling and control of the anthropomorphic robot with antagonistic joints in contact and non-contact tasks]

После прегледа достављене Дисертације и других пратећих материјала и разговора са Кандидатом, Комисија је сачинила следећи

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Коста Јовановић је 21.12.2010. године уписао докторске академске студије Електротехнике и рачунарства, модул Управљање системима и обрада сигнала, на Електротехничком факултету у Београду. Све испите и наставне обавезе положио је са највишом оценом и тиме стекао право за подношење докторске дисертације на преглед и оцену.

Кандидат је 8.1.2014. године пријавио тему докторске дисертације под називом „Моделирање и управљање антропомиметичког робота са антагонистичким погонима у контактним и бесконтактним задацима“.

Комисија за студије трећег степена 15.1.2014. године разматрала је предлог теме за израду докторске дисертације и упутила Наставно–научном већу предлог за именовање Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације.

Наставно-научно веће 21.1.2014. године, на 770. седници, именovalo је Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације у саставу: др Вељко Поткоњак, редовни професор (ментор), др Мирјана Поповић, редовни професор, др Александар Родић, научни саветник (Институт Михајло Пупин, Универзитет у Београду), др Жељко Ђуровић, редовни професор.

Наставно-научно веће 20.5.2014. године, на 774. седници, усвојило је Извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације.

Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације (број одлуке 61206-2604/2-14 од 15.9.2014. године).

Кандидат је 28.12.2015. године предао докторску дисертацију на преглед и оцену.

Комисија за студије трећег степена 12.1.2016. године потврдила је испуњеност потребних услова за подношење предлога Наставно-научном већу за формирање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације.

Наставно-научно веће Електротехничког факултета 19.1.2016. године, на 795. седници, именovalo је Комисију за преглед и оцену докторске дисертације у саставу (број одлуке 5017/10-3 од 27.1.2016. године): др Вељко Поткоњак, редовни професор (ментор), др Мирјана Поповић, редовни професор, др Александар Родић, научни саветник (Институт Михајло Пупин, Универзитет у Београду), др Alin Albu-Schäffer, редовни професор (Технички Универзитет у Минхену, Немачка; и директор Института за роботiku и мехатронику, Центар за свемирска истраживања – ДЛР, Немачка), др Жељко Ђуровић, редовни професор.

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација припада научној области Електротехнике и рачунарства, ужој научној области Роботика и Управљање системима, за коју је матичан Електротехнички факултет Универзитета у Београду.

Ментор докторске дисертације је др Вељко Поткоњак, који је изабран у звање редовног професора за ужу научну област Роботика на Електротехничком факултету Универзитета у Београду. Ментор израде докторске дисертације се активно бави координацијом наставних и научно-истраживачких активности у области роботике, који су до сада резултовали у 55 публикованих радова у међународним часописима са импакт фактором (радови публиковани у часописима са *Thomson Reuters Journal Citation Reports – JCR* листе), и преко 460 цитата (на основу званичне потврде Универзитетске библиотеке из марта 2015.).

1.3. Биографски подаци о кандидату

Коста Јовановић је рођен 1986. године у Чачку. Основну школу и Гимназију је завршио у родном граду као ученик генерације. Дипломирао је на Одсеку за сигнале и системе Електротехничког факултета у Београду 2009. године са просечном оценом 9,96 као најбољи студент на Одсеку. Мастер студије је завршио 2010. године такође на Одсеку за сигнале и системе са просечном оценом 10,00. Докторске студије на Електротехничком факултету је уписао 2010. године на модулу Управљање системима и обрада сигнала, где је положио све испите са просечном оценом 10,00.

Коста Јовановић је у марту 2010. године изабран у звање сарадника у настави на Одсеку за сигнале и системе на Електротехничком факултету у Београду, а у априлу 2011. године за асистента где је и данас ангажован на курсевима у области роботике и мехатронике. Претходно, од јуна до септембра 2009. године, Коста Јовановић је радно искуство стицао у

Одељењу за електронику и аутоматику у компанији СМС Зимаг (*SMS Siemag*) у Зигену у Немачкој као стипендиста Фондације др Зоран Ђинђић и Одбора немачке привреде за сарадњу са истоком (*Ost-Ausschuss der Deutschen Wirtschaft*). Током јула и августа 2010. године, Коста Јовановић је боравио на истраживачком стажу у Лабораторији за роботiku и ембедед системе на Техничком универзитету у Минхену (ТУМ) у Немачкој, у јулу 2012. године је похађао летњу школу роботике на Политехничком универзитету у Цириху (ЕТХ) у Швајцарској, а од маја до новембра 2013. године Коста Јовановић је боравио у Институту за роботiku и мехатронику при Центру за свемирска истраживања (ДЛР) у Минхену у Немачкој као стипендиста Службе за академску размену Савезне Републике Немачке (ДААД).

Област истраживања Косте Јовановића је роботика и управљање системима у оквиру које је до сада учествовао на једном европском ФП7 пројекту: *ECCEROBOT – Embodied Cognition in a Compliantly Engineered Robot*, и пројекту Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије ТР35003: *Истраживање и развој амбијентално интелигентних сервисних робота антропоморфних карактеристика*. Досадашњи резултати кандидата су приказани кроз публикације и то: 1 поглавље у монографији међународног значаја, 6 радова у иностраним часописима (од тога 5 са импакт фактором), 3 рада у часопису од националног значаја, 11 радова на међународним конференцијама и 12 радова на домаћим конференцијама.

За досадашњи рад и активности Коста Јовановић је добио следеће награде: Прва награда на такмичењу у роботики на тему управљања погонима са променљивом крутошћу (Рим, Италија, 2015. године), Награда за најбољи рад младих аутора на конференцији *ICETRA 2014* у секцији РОИ (2014. године), Награда научног портала СУПЕРСТЕ за најбољег младог научника у области природних и техничких наука у Србији (2013. године), Награда града Београда за организацију догађаја године у Београду за манифестацију „Дани будућности: роботика“, (организациони тим: Александра Дреџун, Центар за промоцију науке, проф. Вељко Поткоњак, Коста Јовановић, 2013. године), Награда Фондације Никола Тесла за изузетна достигнућа младих научника у области техничких наука (2012. године), Награда Универзитета у Београду за најбољи студентски научно-истраживачки рад у области техничких наука (2011. године), Награда за најбољег дипломца на Одсеку за сигнале и системе (2009. године), Награда проф. Мирка Милића (2009. године), итд.

Ужа област истраживања Косте Јовановића обухвата моделирање и управљање роботских система, а посебно система чија се реализација заснива на опонашању биолошких узора (*bio-inspired*), роботских актуатора са променљивом крутошћу, а посебно антагонистички спрегнутих погона у роботики.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација по форми и структури потпуно одговара Упутству за обликовање докторске дисертације Универзитета у Београду. Садржи укупно 288 страна. Делови дисертације су:

- Насловна страна на енглеском језику
- Насловна страна на српском језику
- Страна са информацијама о ментору и члановима комисије
- Изјава захвалности
- Стране са подацима о докторској дисертацији на енглеском језику

- Стране са подацима о докторској дисертацији на српском језику
- Садржај
- Текст рада по поглављима
 - Увод
 - Модел динамике робота са антагонистичким погонима у бесконтактним и контактним задацима
 - Технике управљања које користе конвенционалне инжењерске принципе
 - Технике управљања засноване на знању и учењу
 - Управљање робота са антагонистичким попустљивим погонима у контактним задацима
 - Закључци и правци даљег истраживања
- Списак коришћене литературе
- Биографија аутора
- Изјава о ауторству
- Изјава о истовестности штампане и електронске верзије докторског рада
- Изјава о коришћењу.

Дисертација садржи 81 слику, 17 табела, 188 нумерисаних једначина, и списак коришћене литературе који садржи 277 библиографских јединица.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У првом поглављу су истакнуте главне идеје и мотивација за рад на овој теми, као и правци истраживања у развоју и управљању зглобова са еластичношћу (попустљивошћу), са нагласком на антагонистичке погоне. У овом поглављу се истичу безбедносни изазови будућих сервисних робота, наводе се одговарајуће технологије и трендови: еластични актуатори, појмови активне и пасивне попустљивости и VSA (*variable stiffness actuator*). Као група од посебног интереса међу VSA, приказан је детаљан пресек стања на тему антагонистичких актуатора у роботички.

Друго поглавље приказује развој симулационог модела динамике робота погоњеног антагонистички упареним еластичним актуаторима. Приказани су модели два основна антагонистички погоњена зглоба робота који представљају типичне структуре човекових зглобова погоњених антагонистички упареним мишићима. Ови модели појединих зглобова су интегрисани у модел горњег дела антропомиметичког робота (од струка на више) по узору на прототип *Eccerobot*-а. Узимајући у обзир да је такав робот превасходно намењен за рад у непосредном људском окружењу, посебна пажња је посвећена моделирању контаката. Ово поглавље даје ефикасан алат за симулирање динамике антропомиметичког робота који је и реализован у *Matlab*-у. У том циљу су приказана и два примера заснована на симулацијама. Први пример представља антропомиметичког робота на покретној основи који ради у неструктурираном окружењу које га као такво излаже кратким (импулсним) и дугорочним поремећајима. Овде је развијени модел искоришћен за анализу динамичког баланса посматрањем тачке нултог момента. Други пример преставља робота који наменски хвата објекат у простору. На овај начин су демонстриране све три фазе моделирања контактних задатака између робота и објекта: приближавање, нееластични судар и кретање у контакту. У исто време, развијени симулациони модел је служио као платформа за даљи рад и развој алгоритама управљања приказаних у дисертацији.

У трећем поглављу су приказани доприноси у области управљања антагонистички погоњеним, линеарним/нелинеарним, еластичним зглобом робота са жичаним преносом. Након пресека стања у области управљања антагонистичким актуаторима и употребе

повратне спреге за линеаризацију (енг. *feedback linearization*) у управљању роботима, унапређује се тзв. „пулер-фоловер“ приступ иницијално уведен у раду¹. Овај биолошки инспирисан приступ се заснива на енергетски ефикасном истовременом управљању позиције зглоба робота и затезне силе у једном од антагонистички упарених тендона. У овој тези, пулер-фоловер (енг. *puller-follower*) приступ је проширен за потребе истовременог управљања позицијом зглоба и његовом крутошћу. Затим, иницијално уведени приступ за контролу једног зглоба робота који се заснива на фидбек линеаризацији је прилагођен за компензацију гравитационог оптерећења, ефективног момента инерције у сваком зглобу, као и динамичког спрезања у системима са више повезаних тела, употребом теорије робусног управљања. Овај део дисертације се завршава навођењем ограничења у примени поменутог метода и отворених питања као могућих праваца даљег рада.

Поред метода управљања које се заснивају на конвенционалним инжењерским принципима, у дисертацији је приказан развој неколико когнитивних метода управљања антагонистичким еластичним актуаторима у роботизици. У складу са структуром антропомиметичких робота, развијене су и методе које се, имитирајући људско понашање, заснивају на искуству, учењу и хеуристици. Развијен је метод најближег суседа (енг. *the nearest-neighbor*) за управљање у повратној спрези (енг. *feedback*) и директној грани (енг. *feedforward*). Такође, управљање у директној грани је реализовано употребом неуралних мрежа тзв. радијалне основе (енг. *radial-basis neural networks*), а управљање у повратној спрези пројектовано на бази тренутне процене кинематичких коефицијената и фази правила (енг. *fuzzy rules*). Ове когнитивне методе представљају значајан корак ка коначној шеми управљања антропомиметичким роботом имајући у виду да конвенционалне инжењерске управљачке методе не дају решења за контролу вишеосних роботских зглобова или тендона који истовременом делују на више оса робота, где се когнитивне методе управљања могу применити без додатних ограничења. Демонстрација пројектованих метода управљања је урађена кроз симулационе примере у програмском језику *Matlab*.

У петом одељку дисертације приказана су иницијална истраживања и ставови на тему управљања антагонистички погоњеним еластичним зглобовима у контактним задацима. У том циљу, предложена је управљачка шема која представља модификацију опште прихваћене методе импедансног управљања на бази биолошки инспирисаних образаца за поделу оптерећења између два антагонистички упарена тендона.

Главна запажања, закључци, доприноси дисертације као и правци даљег рада на тему обрађену у дисертацији су сумирани у завршном одељку.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

У дисертацији је обрађена врло актуелна тема у области роботике - моделирање и управљање антропомиметичким роботима, посебно оним са попустљивим антагонистичким погонима.

Појам антропомиметички се односи на робота који подсећа на човека не само својим изгледом, већ и унутрашњом структуром и функционалношћу. Мотивација за израду ове дисертације је произишла из активности аутора на Електротехничком факултету у Београду, а у оквиру пројекта *Eccerobot - Embodied Cognition in a Compliantly Engineered Robot*, финансираног од стране седмог оквирног програма Европске уније (ФП7), што довољно

¹ Б. Светозаревић, „Управљање електричним агонист-антагонист погоном са и без еластичних ефеката у роботским системима“, Мастер рад, Електротехнички факултет у Београду, Београд, Србија, 2010.

говори о актуелности теме. О актуелности теме на светском нивоу говори и ангажман престижне JCK лабораторије за роботiku Универзитета у Токију који су такође аутори популарних антропомиметичких робота (последњи прототип из 2013. године – робот *Kenshiro*). Антропомиметички принцип у роботизи је добио и признања познатог магазина „*Popular Mechanics*“ за највећи технолошки концепт у 2010. години, као и другу награду међу технолошким концептима који ће потенцијално имати највећи утицај на људско друштво у будућности на сајму европских технологија ФЕТ 2011 у Будимпешти.

С обзиром на недостатке конвенционалних крутих актуатора у будућим роботским апликацијама које захтевају висок степен безбедности, развој и управљање нових актуатора који укључују еластичност је од великог значаја. Посебно је значајан развој актуатора са променљивом крутошћу VSA (од енглеског назива “*variable stiffness actuator*”) који омогућавају подешавање крутости током рада и самим тим дају компромис између прецизности рада робота и безбедности његовог окружења. Фокус истраживања у дисертацији су работи са антагонистичким погонима као посебна група биолошки инспирисаних VSA. У прилог актуелност ове теме говоре актуелни и недавно завршени пројекти попут STIFF, PHRIENDS или VIATORS, на којима су ангажоване највеће истраживачке институције попут ДЛР Института за роботiku и мехатронику у Немачкој, Ителијанског института технологије, Универзитета Пиза и Ла Сапиенца у Италији, Универзитета Твенте у Холандији, Врије Универзитета Брисел у Белгији, Империл Колеџа у Енглеској, итд.

Иако смо сведоци сада већ бројних примера погона са променљивом крутошћу на бази антагонистичког принципа као и антропомиметичких робота, ипак опште прихваћени приступи управљању оваквим системима још изостају.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Наведена литература броји чак 277 библиографских јединица јер је област коју покрива дисертација јако широка и за синтезу резултата су била потребна знања и савремена научна достигнућа из разних области. Најбројније референце су из области пројектовања антропомиметичких робота, пројектовања и управљања антагонистичким погонима робота, развоја модела динамике хуманоидних робота, биомеханике антагонистички упарених мишића човека, итд. Међу наведеном литературом у овим областима налазе се релевантне референце од основних идеја до најновијих резултата публикованих у престижним међународним часописима и зборницима радова са конференција. На основу увида у тезу и анализе наведене литературе, стиче се утисак да су оригинални научни доприноси до којих је кандидат дошао стављени у коректан контекст.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У дисертацији су коришћене актуелне инжењерске и научне методе у моделирању динамике робота и управљању роботима засноване на релевантној литератури.

Моделирање динамике робота са антагонистичким попустљивим погонима је извршено применом тзв. Степањеновог приступа који је у литератури познат као приступ који нуди ефикасно извршавање алгорита за рачунање динамике робота на бази Њутн-Ојлерових једначина. Извођење математичког модела сваког од представљених антагонистичких зглобова робота чије су структуре усвојене да обухвате све релевантне особине типичних антагонистичких структура човека, извршено је на основу кинематских параметара и

основних закона динамике. Остваривање контаката између робота и објекта из његовог окружења (или неког другог робота) се посматра кроз методе одржања импулса и теорију нееластичног судара да би се обезбедио потпун третман динамике контактних задатака.

Методе управљања робота са антагонистичким погонима се у многостручности заснивају на опонашању њихових биолошких копија – антагонистички упарених мишића човека. У складу са тим кандидат врши анализу активности антагонистичких мишића кроз њихове електромиограмске (ЕМГ) сигнале, који се затим касније превасходно користе за дефинисање референтног понашања система као и формирање базе искуства. За декупловање подсистема за управљање позицијом зглоба и његовом крутошћу (или силом у антагонистичком тендону) код антагонистички упарених попустљивих актуатора, користи се метода фидбек линеаризације која је у литератури раније већ коришћена за сличне намене код роботских зглобова са променљивом крутошћу, а посебно код антагонистички упарених погона. Унапређење метода управљања које имају велику зависност од тачности модела као што је фидбек линеаризација, је предложено кроз компензацију гравитације и естимацију ефективног момента инерције у сваком зглобу на основу претходно развијеног модела динамике робота и позиција појединих зглобова робота. Коначно међу актуелним методама робусног управљања изабрана је и примењена метода H_∞ loop shaping, јер се подешавањем амплитудских карактеристика односно перформанси система и његове робусне стабилности може независно управљати кроз различите фазе пројектовања. На овај начин се компензују динамичко спрезање између зглобова робота и остала немоделирана динамика. Тзв. когнитивне технике управљања предложене у дисертацији користе методе неуралних мрежа (посебно тзв. неуралних мрежа радијалне основе), искуствене методе засноване на познавању кинематике робота, фази логику за агрегацију искуствених правила и доношење одлука, као и методе засноване на интерполацији акумулираног искуства. Ове набројане методе које категоришемо међу методе засноване на учењу и искуству доприносе свеобухватности задатка управљања антропомиметичким роботима и дају могућности превазилажења ограничења у примени конвенционалних техника управљања. Техника управљања робота са антагонистичким погонима развијена у дисертацији користи опште прихваћену методу импедансног управљања у роботизици за остваривање жељене импедансне механичке карактеристике између робота и његове околине.

У дисертацији је приказан развој нових и унапређење постојећих техника моделирања и управљања које синтетизују појединачне поменуте методе и истичу њихове предности и недостатке у управљању антропомиметичким роботима.

3.4. Применљивост остварених резултата

Интензиван развој антропомиметичких робота и роботских зглобова који поседују антагонистички упарене попустљиве погоне неизоставно даје и већу тежину овој докторској дисертацији. Развијени модел динамике робота у форми погодне за симулације је већ примењен у теоријским и практичним анализама за дизајн платформи робота анализом утицаја деловања спољашњих утицаја. Приступ развоју модела динамике робота даје могућност модификације и симулације робота са другим врстама погонима уз третман динамике контактних задатака на аналоган начин. Као што је већ речено интензиван развој области, пре свега дизајна савремених хуманоидних роботских структура, је потребно пратити и развојем управљачких техника које ће омогућити безбедну интеракцију таквих робота у људском окружењу.

У дисертацији је истакнута и могућност примене резултата на још комплексније структуре роботских зглобова као што су кугласти зглобови који нису погодни за управљање

конвенционалним погонима већ захтевају антагонистичке погоне и жичани пренос. У том циљу, резултати на тему моделирања и управљања приказани у овој дисертацији дају добру основу. Такође, кандидат наводи и могућности примене резултата дисертације у областима попут биомеханике, индустрије видео игара, антропоморфних егзоскелета, итд.

О значају добијених резултата најбоље говоре публикације кандидата који су директно резултат рада на докторској дисертацији од чега се издвајају 4 рада у међународним часописима са импакт фактором, као и цитираност ових публикација која је за врло кратко време достигла 50 цитата, односно 112 цитата (извор *Scopus*, односно извор *Google Scholar*).

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Коста Јовановић је током својих докторских студија као и целокупног свог досадашњег рада показао све суштинске особине неопходне за самостални научноистраживачки рад, као што су: аналитичко претраживање стручне литературе, разумевање и примена теоријских и практичних концепата, дефинисање научних проблема, систематичан приступ решавању постављених задатака, способност развоја симулационих модела и њихове имплементације на рачунару, као и вештине анализе и обраде добијених резултата. Радећи у области моделирања и управљања робота са изразито човеколиким карактеристикама кандидат је показао способност синтезе резултата из различитих научних области као што су роботика, управљање системима, биомеханика, мехатроника, као и бројне нове научне гране засноване на опонашању биолошких принципа у техничким решењима, што Комисија сматра врло важном особином за даљи научни рад кандидата.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Један од првих општих доприноса тезе је детаљан преглед антагонистичких погона као подгрупе биолошки инспирисаних погона са променљивом крутошћу. Изглед будућих човеколиких сервисних робота, антропомиметичких робота, ће се врло вероватно у многоме ослањати на антагонистички принцип. С тим у складу је приказан и детаљан преглед антропомиметичких робота.

Научни доприноси приказани у тези могу бити груписани у неколико главних целина као што следи (свака целина одговара једном поглављу у тези):

Група доприноса 1 (Поглавље 2): Развој симулационих модела робота са антагонистичким попустљивим зглобовима при слободном кретању и у контактним задацима.

За развој симулационих модела је примењен Степањенков приступ, који је препознат као ефикасан алат за израчунавање динамике робота. Развијени су модели типичних конфигурација антагонистички погоњених зглобова по узору на људске који су затим интегрисани у комплетан модел антропомиметичког робота. Као надградња кандидатовог мастер рада², модели динамике контакта кроз фазе приближавања, судара и кретања у контакту су интегрисане у симулациони модел антропомиметичког робота у контактним задацима. Уведено је и третирање динамике контакта у зависности од врсте деформације која се појављује у контактної зони која се може окарактерисати као крут, еластодинамичан или

² К. Јовановић, „Развој симулационог модела робота са антагонистичким погонима у контактним задацима“, Мастер рад, Електротехнички факултет у Београду, Београд, Србија, 2010.

мекан. Доприноси дисертације у овој области су публиковани у радовима: (M23.1), (M23.2), (M33.3), (M33.5), (M33.9), (M33.10), (M51.1), (M51.2), (M63.1), (M63.2), (M63.3) и (M63.4).

Група доприноса 2 (Поглавље 3): Инжењерски приступи управљању робота са антагонистичким попустљивим погонима.

Полазећи од концепта управљања антагонистичким погонима са нееластичним и еластичним преносом иницијално приказаним у мастер раду Светозаревића¹, конвенционалне нелинеарне, мултиваријабилне и робусне методе управљања су примењене за развој методе којом се истовремено управља позицијом и силом у антагонистичком тендону једног зглоба робота. Овај приступ управљању је демонстриран за еластичне елементе линеарне и нелинеарне карактеристике у антагонистичкој конфигурацији. Управљачки концепт је затим проширен на истовремено управљање позицијом и крутошћу антагонистичких попустљивих зглобова робота. Развијени пулер-фоловер алгоритам управљања синтетизује употребу фидбек линеаризације, гравитационе компензације и процене ефективног момента инерције појединих зглобова на бази модела динамике и H_∞ *loop-shaping* робусног управљања. Развијени приступ управљању је успешно демонстриран на примеру система са више степени слободе кроз симулације. Доприноси дисертације у овој области су публиковани у радовима: (M14.1), (M21.1), (M23.3), (M33.8), (M33.9), (M33.11), (M33.12) и (M51.3).

Група доприноса 3 (Поглавље 4): Когнитивни приступи управљању робота са антагонистичким попустљивим погонима.

С обзиром да су антропомиметички роботи дизајнирани да потпуно опонашају човеколику структуру, очекује се да ће и алгоритми управљања оваквим роботима копирати начине функционисања човека. У том циљу, основни допринос управљању антагонистичким роботима заснованом на инжењерским принципима је проширен техникама заснованим на учењу, когницији и хеуристици. Овакав приступ је резултовао техникама које користе интерполацију (метод најближег суседа), неуралне мреже, фази логику и хеуритички метод заснован на бази искуства. Доприноси дисертације у овој области су публиковани у радовима: (M14.1), (M21.1), (M33.4), (M33.6) и (M33.7).

Група доприноса 4 (Поглавље 5): Управљање роботима са антагонистичким попустљивим погонима у контактним задацима.

Научни доприноси на ову тему обухватају синтезу општеприхваћеног конвенционалног импендансног управљања примењеног на антагонистичке погоне робота опонашањем биолошких антагонистичких система. Иако су нека прелиминарна истраживања овог дела докторске тезе приказана у радовима (M33.1) и (M33.2), већина резултата је тек у процесу рецензије и припреме за публикавање.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

О актуелности теме и доприносима истраживања докторске дисертације сведочи податак да су они великим делом резултати рада кандидата на пројекту *ECCEROBOT* финансираном од стране Седмог оквирног програма (ФП7) Европске Уније.

Унапређење научних знања уведених у овој дисертацији у поређењу са постојећим стањем у области се таксативно истичу по појединим поглављима као и научни доприноси:

Група доприноса 1 (Поглавље 2): Развој симулационих модела робота са антагонистичким попустљивим зглобовима при слободном кретању и у контактним задацима.

Досадашњи модели робота су углавном изведени користећи индуктивни приступ и за специфичну намену моделирања одређеног роботског система. У дисертацији је приказано извођење модела динамике комплексног робота са попустљивим погонима коришћењем дедуктивног приступа. На овај начин показано је како се могу моделирати а затим и симулирати нови роботски системи са различитим врстама погона. За потребе свеобухватне анализе врло актуелног проблема у роботизи – интеракције робота и човека, развијени су модели робота са пасивном попустљивошћу као и модели окружења које је подложно деформацијама док су досадашња истраживања углавном апроксимирала један од ова два система као бесконачно крута (недеформабилна). Коначно, дисертација разматра остваривање контаката кроз нееластични судар и закон одржања импулса и тиме омогућује комплетан третман контактних задатака са становишта динамике.

Група доприноса 2 (Поглавље 3): Инжењерски приступи управљању робота са антагонистичким попустљивим погонима.

Докторска дисертација приказује технике управљања попустљивим антагонистичким погонима које нуде могућност истовременог управљања позицијом и крутошћу зглоба а које се заснивају на класичној теорији нелинеарног и мултиваријабилног управљања. За разлику од неких ранијих резултата, технике управљања приказане у дисертацији нуде могућност постизања компромиса између контроле крутости зглоба робота и контролабилности антагонистичког система кроз очување затезне силе у антагонистичким тендонима, а уједно и управљања на енергетски ефикасан начин што је од великог значаја за управљање аутономним роботима. Дисертација уводи и поређење са одговарајућим биолошким системима човека и уводи планирање понашања антагонистичких роботских система у складу са постојећим биолошким обрасцима развијаним кроз еволуцију. Коначно, с обзиром да технике управљања засноване на декупловању и линеаризацији сложених система фидбек линеаризацијом врло ретко достижу практичну примену јер у многоставно зависе од тачности модела, дисертација предлаже неколико унапређења. Приступ моделирању робота сложене структуре са попустљивим антагонистичким погонима приказан претходно у дисертацији, даје могућност унапређења фидбек линеаризације на бази адекватне процене гравитационог оптерећења и ефективног момента инерције у свакој од појединих оса робота. Коначно, дисертација уводи непараметарску технику робусног управљања за линеаризовани и декупловани систем који неизбежно садржи грешке моделирања као и немоделирану динамику.

Група доприноса 3 (Поглавље 4): Когнитивни приступи управљању робота са антагонистичким попустљивим погонима.

У овом поглављу новине у односу на претходне резултате доступне у литератури се огледају кроз опонашање и учење образаца кретања (неуро-мишићних активности) антагонистички упарених мишића човека. Технике управљања на бази искуства засноване на интерполацији, неуралним мрежама, фази логици и хеуристичком доношењу одлука су примењене на робота погоненог антагонистичким погонима. Ови резултати су посебно значајни јер представљају корак ка решавању управљања зглобовима са више оса ротације, као и погонима који истовремено делују на више оса ротације као што је то случај код антропомиметичких робота. Коначно методе представљене у раду као когнитивне су потребне да дају свеобухватан преглед техника управљања роботима са антагонистичким погонима као упрошћене верзије потпуно антропомиметичких робота.

Група доприноса 4 (Поглавље 5): Управљање роботима са антагонистичким попустљивим погонима у контактним задацима.

У литератури постоји значајан број техника за контролу механичке импедансе у спољашњим (Картезијанским) координатама или техника за контролу крутости (или механичке импедансе у општем случају) једноосног роботског зглоба са антагонистичким погонима. У литератури су малобројни радови који разматрају управљање крутошћу у спољашњим (Картезијанским) координатама код робота са више степени слободе који имају антагонистичке погоне. Тим пре значај дела дисертације који експлоатише конвенционално импедансно управљање делећи потребне жељене погонске силе и моменте између два антагонистички спрегнута погона постаје већи. Расподела оптерећења између два антагонистички упарена погона се заснива на појмовима коактивације и реципрочне активације познатим у области моторне контроле човека, а прилагођеним за техничку реализацију код робота.

Коначно, у дисертацији се истичу доприноси у области моделирања и управљања антагонистичким и попустљивим зглобовима робота као основа за још сложеније механичке системе какви се код будућих антропомиметичких робота очекују. По угледу на мишићно скелетну структуру човека, то би били зглобови са више оса ротације, као и погони који по узору на људске мишиће истовремено утичу на кретање више зглобова робота.

4.3. Верификација научних доприноса

Научни доприноси који су резултат истраживања у оквиру докторске дисертације су публиковани у следећим радовима класификованим по М категоријама по Правилнику Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије:

Категорија M14:

M14.1 V. Potkonjak, **K. Jovanovic**, P. Milosavljevic, Chapter 20: How to Control Anthropomimetic Robot: Engineering and Cognitive Approach, *Springer Series on Mechanisms and Machine Science – New trends in Medical and Service Robotics*, vol. 20, pp. 299-314, 2014 (ISBN: 978-3-319-05430-8, DOI:10.1007/978-3-319-05431-5).

Категорија M21:

M21.1 S. Wittmeier, C. Alessandro, N. Bascarevic, K. Dalamagkidis, A. Diamond, M. Jantsch, **K. Jovanovic**, R. Knight, H. G. Marques, P. Milosavljevic, B. Svetozarevic, V. Potkonjak, R. Pfeifer, A. Knoll, O. Holland, Towards anthropomimetic robotics, *Artificial Life*, vol. 19, no.1, pp 171-193, 2013 (**IF=1.93**) (ISSN: 1064-5462, DOI: 10.1162/ARTL_a_00088).

Категорија M23:

M23.1 **K. Jovanovic**, V. Potkonjak, O. Holland, Dynamic modelling of an anthropomimetic robot in contact tasks, *Advanced Robotics*, vol. 28, no.11, pp 793- 806, 2014 (**IF=0.572**) (ISSN 0169-1864, DOI: 10.1080/01691864.2014.896748).

M23.2 V. Antoska, **K. Jovanovic**, V. Petrovic, N. Bascarevic, M. Stankovski, Balance analysis of the mobile anthropomimetic robot under disturbances – ZMP approach, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 10, no. 206, pp 1-10, 2013 (**IF=0.497**) (ISSN 1729-8806, DOI: 10.5772/56238).

M23.3 V. Potkonjak, B. Svetozarevic, **K. Jovanovic**, O. Holland, The puller-follower control of compliant and noncompliant antagonistic tendon drives in robotic system, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 8, no. 5, pp. 143-155, 2011, (**IF=0.375**) (ISSN: 1729-8806, DOI: 10.5772/10690).

Категорија M33:

- M33.1 **K. Jovanovic**, P. Milosavljevic, V. Potkonjak, Control design for pick-and-place task using robot with intrinsic compliance - QB robot, *The 2nd IcETRAN Conference*, Srebrno jezero, Serbia, pp RO1.1- 1-6, 2015 (ISBN 978-86-80509-71-6).
- M33.2 B. Lukic, **K. Jovanovic**, Influence of mechanical characteristics of a compliant robot on Cartesian impedance control design, *The 2nd IcETRAN Conference*, Srebrno jezero, Serbia, pp RO2.5- 1-6, 2015 (ISBN 978-86-80509-71-6).
- M33.3 **K. Jovanovic**, J. Vranic, Muscle models for accurate simulation of human movements, *The 1st IcETRAN Conference*, Vrnjacka Banja, Serbia, pp RO2.4- 1-5, 2014 (ISBN 978-86-80509-70-9).
- M33.4 V. Potkonjak, N. Bascarevic, P. Milosavljevic, **K. Jovanovic**, O. Holland, Experience-based fuzzy control of an anthropomimetic robot, *International Joint Conference on Computational Intelligence (CFP IJCCI 2012)*, Barcelona, Spain, pp 389-394, 2012 (DOI: 10.5220/0004117503890394).
- M33.5 N. Bascarevic, **K. Jovanovic**, P. Milosavljevic, V. Potkonjak, O. Holland, Tip-over stability examination of a compliant anthropomimetic mobile robot, *IEEE International Conference on Control Applications (IEEE CCA 2012)*, Dubrovnik, Croatia, pp 1584-1589, 2012 (DOI: 10.1109/CCA.2012.6402718).
- M33.6 P. Milosavljevic, **K. Jovanovic**, N. Bascarevic, V. Potkonjak, O. Holland, Heuristic machine-learning approach to the control of an anthropomimetic robot arm, *IFAC Symposium on Robot Control (IFAC SYROCO 2012)*, Dubrovnik, Croatia, pp 301-306, 2012 (DOI: 10.3182/20120905-3-HR-2030.00098).
- M33.7 P. Milosavljevic, N. Bascarevic, **K. Jovanovic**, G. Kvascev, Neural networks in feedforward control of a robot arm driven by antagonistically coupled drives, *Symposium on Neural Networks Applications in Electrical Engineering (NEUREL)*, Belgrade, Serbia, pp 77-80, 2012 (DOI: 10.1109/NEUREL.2012.6419967).
- M33.8 V. Potkonjak, **K. Jovanovic**, P. Milosavljevic, N. Bascarevic, O. Holland, The puller-follower control concept for the multi-joint robot with antagonistically coupled compliant drives, *IASTED International Conference on Robotics (Robo 2011)*, Pittsburgh, USA, pp 375-381, 2011 (DOI: 10.2316/P.2011.752-018).
- M33.9 V. Potkonjak, **K. Jovanovic**, B. Svetozarevic, O. Holland, D. Mikicic, Modeling and control of a compliantly engineered anthropomimetic robot in contact tasks, *ASME Mechanisms and Robotics Conference (ASME Mech 2011)*, Washington, DC, USA, pp 23-32, 2011 (DOI: 10.1115/DETC2011-47256).
- M33.10 V. Potkonjak, B. Svetozarevic, **K. Jovanovic**, O. Holland, Anthropomimetic robot with passive compliance – contact dynamics and control, *IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation (MED 2011)*, Corfu, Greece, pp 1059–1064, 2011 (DOI: 10.1109/MED.2011.5983000).
- M33.11 V. Potkonjak, B. Svetozarevic, **K. Jovanovic**, O. Holland, Biologically-inspired control of a compliant anthropomimetic robot, *IASTED International Conference on Robotics and Applications*, Cambridge, Massachusetts, USA, pp 182-189, 2010 (DOI: 10.2316/P.2010.706-006).
- M33.12 V. Potkonjak, B. Svetozarevic, **K. Jovanovic**, O. Holland, Control of compliant anthropomimetic robot joint, *International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics*, Rhodes, Greece, pp 1271-1274, 2010 (DOI: 10.1063/1.3497932).

Категорија M51:

- M51.1 **K. Jovanovic**, J. Vranic, N. Miljkovic, Hill's and Huxley's muscle models – tools for simulations in biomechanics, *Serbian Journal of Electrical Engineering*, vol. 12, no.1, pp. 53-67, 2015 (ISSN: 1451-4869, DOI: 10.2298/SJEE1501053J).

- M51.2 V. Petrovic, **K. Jovanovic**, V. Potkonjak. Influence of external disturbances to dynamic balance of the semi-anthropomorphic robot, *Serbian Journal of Electrical Engineering*, vol. 11, no. 1, pp 145-158, 2014 (ISSN: 1451-4869, DOI: 10.2298/SJEE131014013P).
- M51.3 B. Svetozarevic, **K. Jovanovic**, Control of compliant anthropomorphic robot joint, *Serbian Journal of Electrical Engineering*, vol. 8, no. 1, pp 85-93, 2011 (ISSN: 1451-4869, DOI:10.2298/SJEE1101085S).

Категорија M63:

- M63.1 V. Petrovic, **K. Jovanovic**, V. Potkonjak, ZMP approach to the critical design of a mobile platform for the semi-anthropomorphic robot, *The 57th ETRAN Conference*, Zlatibor, Serbia, pp RO1.1- 1-6, 2013 (ISBN 978-86-80509-68-6).
- M63.2 N. Bascarevic, **K. Jovanovic**, V. Potkonjak, A tip-over stability analysis of an anthropomorphic wheeled robot based on zmp, *The 56th ETRAN Conference*, Zlatibor, Serbia, pp RO2.9 - 1-4, 2012 (ISBN 978-86-80509-65-9).
- M63.3 **K. Jovanovic**, N. Bascarevic, Modeling contact dynamics of the anthropomorphic robot – Eccerobot, *The 55th ETRAN Conference*, Teslic, Bosnia and Herzegovina, pp RO1.8- 1-4, 2011 (ISBN 978-86-80509-66-2).
- M63.4 **K. Jovanovic**, B. Svetozarevic, Humanoid robot model with antagonistic drives, *The 54th ETRAN Conference*, Donji Milanovac, Serbia, pp RO1.3 - 1-4, 2010 (ISBN 978-86-80509-65-5).

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Комисија сматра да докторска дисертација **Косте М. Јовановића**, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, под насловом „**Моделирање и управљање антропомиметичког робота са антагонистичким погонима у контактним и бесконтактним задацима**“, испуњава све суштинске и формалне услове предвиђене Законом о високом образовању, као и прописима Универзитета у Београду и Електротехничког факултета.

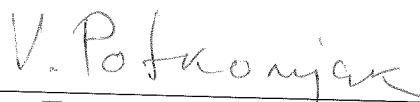
Докторска дисертација Косте Јовановића садржи научне доприносе који се огледају у области моделирања и управљања антропомиметичким роботима као врло актуелној теми истраживања у области роботике у интернационалним оквирима. Конкретно, научни резултати дисертације који су публиковани у престижним међународним часописима обухватају развој симулационих модела динамике робота са попустљивим антагонистичким погонима у контактним и бесконтактним задацима. У области управљања, научни доприноси дисертације се огледају у развоју и примени нелинеарних, мултиваријабилних и робусних техника управљања антропомиметичким роботима заснованих на конвенционалној теорији управљања, као и развоју и примени техника управљања на основу искуства и учења (методе интерполације на основу искуства, неуралних мрежа, фази логике и хеуристичког доношења одлука). Докторска дисертација приказује и доприносе управљању антропомиметичких робота у контактним задацима који се као и остале приказане технике управљања у многоме ослањају на биолошке принципе функционисања човека. Наведени научни доприноси разматрају робота са антагонистичким погонима, али уједно наглашавају и могућности примене наведених научних доприноса на сложене роботске системе са вишеосним зглобовима и на погоне који истовремено делују на више зглобова робота.

Током израде докторске дисертације као и током целих докторских студија кандидат Коста Јовановић је показао изражену склоност, зрелост и способност за самостални научноистраживачки рад.

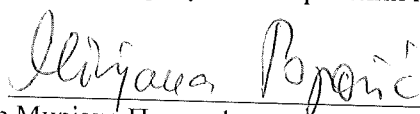
На основу свега изложеног, Комисија са задовољством предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета да се докторска дисертација под насловом „**Моделирање и управљање антропомиметичког робота са антагонистичким погонима у контактним и бесконтактним задацима**“, кандидата **Косте М. Јовановића**, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, прихвати, изложи на увид јавности и упуту на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

У Београду, 10.2.2016. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



др Вељко Поткоњак, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



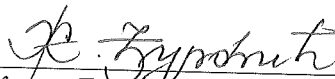
др Мирјана Поповић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Александар Родић, научни саветник
Универзитет у Београду – Институт Михајло Пупин



др Alin Albu-Schäffer, редовни професор
Технички универзитет у Минхену, Немачка
Директор, ДЛР Институт за роботiku и мехатронику, Немачка



др Жељко Ћуровић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

TO THE TEACHING AND SCIENTIFIC COUNCIL

Subject: Report on the completed doctoral dissertation of **Kosta M. Jovanović**.

Under Decision No. 5017/10-3 of January 27, 2016 of the Teaching and Scientific Council of the School of Electrical Engineering, we the undersigned were appointed as members of the Commission for the Review, Assessment, and Defense of the doctoral dissertation of **Kosta M. Jovanović** titled

Modeling and control of the anthropomorphic robot with antagonistic joints in contact and non-contact tasks

[in Serbian: **Моделирање и управљање антропомиметичког робота са антагонистичким погонима у контактним и бесконтактним задацима**]

After examining the enclosed dissertation and other documents, and communicating with the candidate, the Dissertation Committee produced the following

REPORT

1. Introduction

1.1. Chronology of approval and creation of the dissertation

Kosta Jovanović enrolled on December 21, 2010 in the Doctoral Electrical Engineering and Computer Science Program of the University of Belgrade, School of Electrical Engineering, Control Systems and Signal Processing Department. He has passed all examinations and completed all assignments with the highest grade point average, and thus acquired the right to submit his doctoral dissertation for review and evaluation.

The candidate submitted the topic of the doctoral dissertation “Modeling and control of the anthropomorphic robot with antagonistic actuators in contact and non-contact tasks” on January 8, 2014.

The Doctoral Studies Commission considered the proposed topic of the doctoral dissertation on January 15, 2014 and forwarded to the Teaching and Scientific Council its recommendation to appoint a committee for the assessment of criteria and approval of the topic of the doctoral dissertation.

At its 770th session held on January 21, 2014, the Teaching and Scientific Council appointed the Committee for the Assessment of Criteria and Approval of the Doctoral Dissertation Topic

composed of: Dr. Veljko Potkonjak, Full Professor (Supervisor); Dr. Mirjana Popović, Full Professor; Dr. Aleksandar Rodić, Scientific Advisor (Mihajlo Pupin Institute, University of Belgrade); and Dr. Željko Đurović, Full Professor.

At its 774th session held on May 20, 2014, the Teaching and Scientific Council approved the report of the Committee for the Assessment of Criteria and Approval of the Doctoral Dissertation Topic.

The Board of Technical Sciences of the University of Belgrade approved the proposed topic of the doctoral dissertation on September 9, 2014 (under Decision 61206-2604/2-14).

The candidate submitted his doctoral dissertation on December 28, 2015 for review and evaluation.

The Doctoral Studies Commission confirmed on January 12, 2016 that all the criteria had been fulfilled for submitting a proposal to the Teaching and Scientific Council to appoint a dissertation review and evaluation committee.

At its 794th session held on January 19, 2016, under Decision 5017/10-3 dated January 27, 2016, the Teaching and Scientific Council of the School of Electrical Engineering appointed the Dissertation Committee composed of Dr. Veljko Potkonjak, Full Professor (Supervisor); Dr. Mirjana Popović, Full Professor; Dr. Aleksandar Rodić, Scientific Advisor (Mihajlo Pupin Institute, University of Belgrade); Dr. Alin Albu-Schäffer, Full Professor (Technical University of Munich, Germany; and Director of Institute of Robotics and Mechatronics, German Aerospace Center – DLR, Germany); and Dr. Željko Đurović, Full Professor.

1.2. The scientific area of the dissertation

The scientific field of the doctoral dissertation is Electrical Engineering and Computer Science, and the area of research is Robotics and Control Systems, for which the parent school of the University of Belgrade is the School of Electrical Engineering.

The supervisor of the doctoral dissertation was Dr. Veljko Potkonjak, a tenured full professor of robotics at the School of Electrical Engineering of the University of Belgrade. The supervisor of the doctoral dissertation has been actively coordinating teaching and research activities in robotics, which have so far resulted in 55 papers published in international journals with an impact factor (papers published in journals on the Thomson Reuters Journal Citation Reports – JCR List), with more than 460 citations (according to the official note of the University library from March 2015).

1.3. Candidate's biography

Kosta Jovanović was born in Čačak in 1986. He completed elementary school and high school in his hometown on top of his class. He obtained his Bachelor's degree from the University of Belgrade, School of Electrical Engineering, Signals & Systems Department, graduating on top of his class with a grade point average of 9.96 (out of 10). He then completed his Master's studies in 2010, also at the Signals and Systems Department, with a grade point average of 10. He enrolled in the doctoral program at the Control Systems & Signals Processing Department in 2010 and passed all examinations with a grade point average of 10.

In March 2010, Kosta Jovanović was appointed teaching assistant at the University of Belgrade, School of Electrical Engineering, Signals & Systems Department, focusing on robotics and mechatronics courses since April 2011. From June to September 2009, Kosta Jovanović gained hands-on experience at the Electronics and Controls Department of SMS Siemag, Siegen, Germany, under a grant from Dr. Zoran Đinđić Foundation and Ost-Ausschuss der Deutschen Wirtschaft. He

spent July and August 2010 on a research stay at the Robotics and Embedded Systems Laboratory of TUM Munich, in July 2012 attended the summer school of robotics at ETH Zurich, Switzerland, and spent May to November 2013 at the Institute of Robotics and Mechatronics of the Aerospace Center (DLR) in Munich, Germany, under a grant of the German Academic Exchange Service (DAAD).

Kosta Jovanović's area of research is robotics and control systems, in which he has to date participated in a European FP7 project: *ECCEROBOT – Embodied Cognition in a Compliantly Engineered Robot*, and Project TR 35003 of the Serbian Ministry of Education, Science and Technological Development: *Research and Development of Ambient Intelligent Service Robots of Anthropomorphic Characteristics*. The candidate's past achievements have been reported in a number of publications, including: one chapter in an international monograph, six papers in international journals (five with an impact factor), three papers in national journals, 11 papers presented at international conferences, and 12 papers presented at domestic conferences.

Kosta Jovanović has received the following awards for his activities to date: first prize at a variable stiffness actuators competition (Rome, Italy, 2015), Young Researcher Best Paper Award, ROI Section, IcETRAN Conference (2014); SUPERSTE award for the best Serbian young scientist in the field of natural and technical sciences (2013); City of Belgrade Award for organizing the event-of-the-year – Days of the Future: Robotics in 2013 (team included Aleksandra Drecun, Science Promotion Center, and Prof. Veljko Potkonjak); Nikola Tesla Foundation Award for extraordinary achievements of young scientists (2012); University of Belgrade Award for the best student's scientific work in the field of technical sciences (2011), Top Graduate Award of the Signals & Systems Department (2009), Prof. Mirko Milić Award (2009), etc.

The focus of Kosta Jovanović's research is robot modeling and control, particularly of bio-inspired systems and variable-stiffness actuators, especially antagonistically-coupled actuators in robotics.

2. DESCRIPTION OF THE DISSERTATION

2.1. Content

The doctoral dissertation is written in the English language. Its structure and format are consistent with the Doctoral Dissertation Writing Instructions of the University of Belgrade. The dissertation comprises 288 pages and includes the following:

- Title page in English
- Title page in Serbian
- Information about the dissertation supervisor and Dissertation Committee
- Acknowledgements
- Abstract in English
- Abstract in Serbian
- Table of Contents
- Body of dissertation divided into sections:
 - o Introduction
 - o Dynamics model of a robot with antagonistic joints in non-contact and contact tasks
 - o Engineering control approaches
 - o Cognition-based control approaches
 - o Control of a robot with antagonistically coupled compliant drives in contact tasks
 - o Findings, conclusions & directions of ongoing research
- Bibliography
- Author's biography
- Statement of authorship

- Statement of identical printed and electronic content
- Statement of referencing and reproduction rights

The dissertation includes 81 figures, 17 tables, 188 numbered equations and a bibliography comprised of 277 units.

2.2. Synopsis of sections

The first section outlines the main ideas and motivation for the work. It presents research directions, points of view and initiatives in the design and control of compliant robots, with special emphasis on antagonistically-actuated joints. It also addresses safety issues of future service robots, and lists technologies, trends, and approaches towards achieving that goal: moving from stiff to compliant actuators, the benefits introduced by passive and active compliance, variable stiffness actuators, etc. As a special group of bio-inspired variable stiffness actuators in robotics, antagonistic joints are reviewed comprehensively. Such a detailed review of antagonistic joint design aims to highlight the importance of the subject, on the one hand, while on the other hand it presents the technology that will be intensively exploited in future anthropomimetic robots.

The second section presents a detailed simulation-based model of the robot driven by antagonistically-actuated compliant drives. To begin with, basic models of antagonistic joints that resemble typical human-like antagonistic structures are introduced. These models are incorporated into the upper-body anthropomimetic robot model, which is a close approximation of the Eccerobot prototype. Since such a robot is intended to work in collaboration with humans and directly interact with its surroundings, modeling of contacts is introduced. This section as a whole represents an efficient and accurate tool for simulating the anthropomimetic robot dynamic, which is implemented in Matlab for demonstration purposes. Two case studies are presented. The first emulates an anthropomimetic robot on a wheeled-base, working in an unstructured environment and therefore exposed to impulse and long term external disturbances. Here the model is used to observe the robot's zero-moment-point and thus its balance. The second case study emulates intentional contact – grasping of an object. Models of all contact stages are demonstrated: approach, impact and in-contact-motion phases. At the same time, the simulation model served as a platform for the development of control algorithms elaborated in the following sections.

The third section makes a contribution of this thesis to the control of an antagonistic, linear/non-linear, cable driven, compliant robot joint. After an overview of the background work on antagonistic joint control and feedback linearization in robot control, our puller-follower approach, initially introduced in the master's thesis of Svetozarevic¹, is presented. This biologically-inspired and energy efficient approach simultaneously controls joint position and force in one of the tendons. In the present thesis, the puller-follower approach extends to joint position and joint stiffness control. An initially demonstrated single-joint control algorithm based on feedback linearization is improved to compensate for gravity load, effective changeable joint inertia and dynamic coupling in multi-joint systems, by introducing the robust control theory. The third section ends with limitations and issues that remain open and will be the topic of future research.

In addition to control methods that rely on conventional engineering techniques, several cognitive approaches to the control of antagonistically coupled compliant drives in robotics were developed. In accordance with a bio-inspired background and fully human-like design of the anthropomimetic

¹ B. Svetozarevic, "Control of electrical agonist-antagonist drives with and without elastic effects in robotic systems (in Serbian)," Master thesis, School of Electrical Engineering, University of Belgrade, Belgrade, Serbia, 2010.

robot, the focus was on human-like control as well – control based on experience, learning and heuristics. To that end, nearest-neighbor algorithms for feedforward and feedback control of the anthropomorphic robot, an algorithm for neural network feedforward control using radial-basis networks, and an algorithm for feedback control based on on-line estimation of kinematic coefficients and fuzzy rules were developed. Although cognitive algorithms were not of primary importance in this thesis, they present a step forward in the control of a fully anthropomorphic robot since engineering-based control algorithms reach their limits if multi-articular muscles or multi-axes joints are considered. On the other hand, cognitive methods outlined in the thesis can be applied to such systems without restrictions. Finally, a comparative simulation study in Matlab was carried out to highlight the main features of the developed cognitive-based control schemes.

Section 5 provides insight into the author's point of view and initial research on antagonistically-driven compliant joint control in interaction (contact) tasks. It presents a mixture of state-of-the-art conventional and widely adopted impedance control techniques and bio-inspired patterns of biological antagonistic structures.

The concluding Section 6 highlights the main findings and observations, summarizes the contribution of the thesis once again, and finally provides guidelines for further research on the topic.

3. EVALUATION OF THE DISSERTATION

3.1. Contemporaneity and originality

The dissertation deals with a highly topical area of robotics – modeling and control of anthropomorphic robots, especially those with compliant antagonistic actuators.

The term “anthropomorphic” refers to a robot that resembles a human, not only in appearance, but also inner structure and functionality. The motivation for the dissertation originated from the author's activities at the School of Electrical Engineering, in connection with the project *Eccerobot - Embodied Cognition in a Compliantly Engineered Robot*, funded by the EU 7th Framework Program, which by itself is sufficient evidence of the contemporaneity of the topic. On a global scale, the activities of the prestigious JSK robotics laboratory of the University of Tokyo, which has produced a number of popular anthropomorphic robots (the most recent being Kenshiro, 2013) attest to the topical nature of the subject matter. The anthropomorphic principle in robotics has been recognized by the famous journal *Popular Mechanics* as the greatest technological concept in 2010 and received the second prize among technological concepts that might have the largest impact on human society in the future at the FET 2011 exhibition of European technologies held in Budapest.

Given the shortfalls of conventional stiff actuators, the development and control of novel actuators, which feature elasticity, is of major importance for future robotic applications that require a high level of safety. Among these, especially significant is the development of VSAs (variable stiffness actuators), which allow stiffness adjustment in operation and thus a trade-off between the robot's accuracy and the safety of its environment. The dissertation focuses on robots with antagonistic actuators, which belong to a special group of bio-inspired VSAs. The contemporaneity of the topic is also corroborated by a number of recently completed projects, such as STIFF, PHRIENDS and VIATORS, which involved major research institutions like the German DLR Institute of Robotics and Mechatronics, the Italian Institute of Technology, the University of Pisa and the Sapienza

University of Rome (Italy), the Dutch University of Twente, the Belgian Vrije University of Brussel, the UK Imperial College, etc.

Although there are now numerous examples of antagonistic VSAs and anthropomorphic robots, general approaches to their control systems are still lacking.

3.2. References and bibliography

The bibliography is comprised of as many as 277 units, given that the research area of the dissertation is very broad, such that a synthesis of the results required knowledge of contemporary scientific achievements in various disciplines. The largest number of the references pertain to the design of anthropomorphic robots, design and control of antagonistic actuators, development of models of humanoid robot dynamics, biomechanics of antagonistically-coupled human muscles, etc. The bibliography includes references ranging from those related to basic ideas to those reporting the most recent results published in eminent international journals and conference proceedings. Based on our insight into the dissertation and our assessment of the bibliography, our impression is that the original scientific contributions of the candidate have been placed in a proper context.

3.3. Description and adequacy of applied scientific methods

The dissertation reflects the use of current engineering and scientific methods for modeling robot dynamics and robot control based on relevant literature.

The dynamics of a robot with antagonistic compliant actuators were modeled applying the so-called Stepanjenko's approach, which is known in the literature as a method that offers efficient execution of robot dynamics algorithms based on Newton-Euler equations. The mathematical model of each of the presented antagonistic robot joints, whose structure was selected so as to include all relevant features of typical antagonistic human structures, is based on kinematic parameters and the fundamental laws of dynamics. Contact between the robot and an object in its environment (or another robot) is considered in terms of impulse conservation and non-elastic impact, to ensure full treatment of contact task dynamics.

Control methods for antagonistically-actuated robots are largely based on emulating their biological paragon – the antagonistically-coupled human muscle. As such, the candidate analyzes the activity of antagonistic muscles through their electromyographic (EMG) signals, which are later primarily used to define the reference behavior of the system and create an experience base. The feedback linearization method, which, according to the literature, has already been used for similar applications of variable-stiffness robot joints (especially antagonistically-coupled actuators), is applied to decouple the control subsystem for joint position and stiffness (or antagonistic tendon force). Enhancement of control methods that largely depend on the accuracy of the model, such as feedback linearization, is proposed through gravity compensation and estimation of the effective moment of inertia of each joint, based on a previously-developed model of robot dynamics and positions of individual robot joints. Ultimately, among current robust control methods, H_∞ loop shaping was selected and applied because amplitude characteristics (or system performance) and robust stability can be used for independent control in various design stages. This allows compensation of dynamic coupling between robot joints and other unmodeled dynamics. The so-called cognitive control techniques proposed in the dissertation rely on neural networks (especially radial-based networks), experience based on knowledge of the robot's kinematics, fuzzy logic, and aggregation of experience-based rules and decision making, as well as methods based on interpolation of accumulated knowledge. The above methods, classified as methods based on learning and experience, contribute to the comprehensiveness of the anthropomorphic robot control

task and allow constraints of conventional control techniques to be overcome. The antagonistic-actuator control technique developed in the dissertation relies on the generally accepted method of impedance control in robotics, for achieving the desired mechanical impedance characteristics between the robot and its environment.

The dissertation presents modeling and control techniques that synthesize these methods for the purposes of developing novel or enhanced approaches, and points out their advantages and shortfalls with regard to anthropomorphic robot control.

3.4. Applicability of results

Rapid development of anthropomorphic robots and antagonistically-coupled compliant joint actuators inevitably puts more weight on the dissertation. The model of robot dynamics developed in a form suitable for simulations has already been applied in theoretical and practical considerations pertaining to the design of robot platforms by influence of external forces analysis. The approach to robot dynamics modeling allows modifications and simulations of robots with other types of actuators, treating the dynamics of contact tasks in an analogous manner. As already pointed out, rapid development in this area, in particular the design of contemporary humanoid robotic structures, needs to be accompanied by the development of control techniques that ensure safe interaction of such robots with the human environment.

The dissertation points out the possibility of applying the results to even more complex structures of robot joints, such as spherical joints that are unsuitable for control by conventional actuators. Instead, they require antagonistic actuators and need to be tendon driven. The modeling and control results shown in the dissertation provide a sound groundwork for achieving this goal. In addition, the candidate states that it is possible to apply the results of his research in various fields, such as biomechanics, the video gaming industry, and anthropomorphic exoskeletons.

The significance of the results is best corroborated by the candidate's publications that are direct outcomes of the research associated with the dissertation, especially four papers published in international journals with an impact factors and many citations of these publications over a very short period of time (50 on Scopus and 112 on Google Scholar).

3.5. Assessment of the candidate's ability to conduct independent research

During the course of his doctoral studies and other activities to date, Kosta Jovanović has demonstrated all the essential qualities needed for independent research, such as: analytical perusal of technical literature, understanding and application of theoretical and practical concepts, definition of scientific problems, systematic approach to the performance of given tasks, ability to develop simulation models and apply them on computers, and data processing and analysis skills. While working on the modeling and control of robots with distinct human-like characteristics, the candidate demonstrated the ability to integrate results from different scientific disciplines, such as robotics, controls, biomechanics, mechatronics, and numerous advanced fields of science based on mimicking biological principles in technical solutions, all of which the Committee deems extremely significant for the candidate's future research efforts.

4. SCIENTIFIC CONTRIBUTION

4.1. Overview

One of the first general contributions of the thesis is a detailed review of the antagonistic joint design as a subgroup of bio-inspired variable stiffness actuators. Furthermore, designs of future

human-like service robots – anthropomimetic robots, which will strongly rely on the antagonism principle, are reviewed in details.

In summary, the scientific contributions of the present thesis can be grouped into several main topics, as follows (each corresponding to one of the following sections in the thesis):

Contribution set 1 (Section 2): Development of simulation-based models of antagonistically driven compliant robots in free motion and in contact/interaction tasks.

Here, Stepanjenko's approach to robot modeling, known for efficient calculation of robot dynamics, is applied. Models of typical antagonistic joints in humans are developed and integrated into a full robot body model. As an upgrade of author's master thesis², models of contact dynamics are elaborated through approach, impact and in-contact-motion phases, and then integrated into the simulation-based model of the anthropomimetic robot in a contact task. In according to the type of surface in the contact zone contact dynamics is considered as rigid, elastodynamic or soft. Topic-related publications include: (M23.1), (M23.2), (M33.3), (M33.5), (M33.9), (M33.10), (M51.1), (M51.2), (M63.1), (M63.2), (M63.3), and (M63.4).

Contribution set 2 (Section 3): Engineering approaches to the control of a robot with antagonistically coupled compliant drives.

Starting with the initially introduced concept in control of antagonistic drives with inelastic and elastic transmission by Svetozarevic¹, conventional non-linear, multi-variable and robust control techniques are applied to control the position and antagonistic tendon force. Such control is developed for both linear and non-linear antagonistic drive configurations resembling typical human joints driven by antagonistically coupled muscles. The control approach is demonstrated for linear and non-linear elastic elements in antagonistic tendons. Then the control concept is modified for simultaneous position and stiffness control of the antagonistic compliant actuators. The developed puller-follower control algorithm synthesizes feedback-linearization, model-based gravity compensation, joint effective inertia estimation, and H_∞ loop-shaping robust control. The presented control approach is then effectively demonstrated on a multi-joint system through simulations. The publications that have come out of this work are: (M14.1), (M21.1), (M23.3), (M33.8), (M33.9), (M33.11), (M33.12), and (M51.3).

Contribution set 3 (Section 4): Cognitive approaches to the control of a robot with antagonistically coupled compliant drives.

Since anthropomimetic robots are built to resemble the human structure, anthropomimetic robot control algorithms are also expected to copy the way the human body works. To that end, fundamental research on control is extended to include techniques based on learning, cognition and heuristic. Therefore, the exploitation of optimization (in the nearest-neighbor method), neural networks, fuzzy logic and heuristics based on an experience base in anthropomimetic robot control are elaborated. Papers related to these contributions include: (M14.1), (M21.1), (M33.4), (M33.6), and (M33.7).

Contribution set 4 (Section 5): Control of robots with antagonistically-coupled compliant drives in contact tasks.

This part of the thesis presents a mixture of state-of-the-art conventional and widely adopted impedance control techniques, implemented in antagonistic drives in a bio-inspired manner. The

² K. Jovanović, "Simulation model development of the humanoid robot with antagonistic drives in contact tasks (in Serbian)," Master thesis, School of Electrical Engineering, University of Belgrade, Belgrade, Serbia, 2010.

results of this recent research have not yet been published, although some preliminary investigations on the topic have been prepared and presented, including (M33.1) and (M33.2).

4.2. Critical assessment

The contemporaneity and contributions of the research conducted in connection with the doctoral dissertation are substantiated by the fact that they largely derive from the candidate's involvement in the ECCEROBOT project funded by the EU 7th Framework Program (FP7).

The advancement of scientific knowledge afforded by the dissertation, compared to prior knowledge in this field, and the scientific contributions, are summarized below:

Contribution set 1 (Section 2): Development of simulation-based models of antagonistically driven compliant robots in free motion and in contact/interaction tasks.

Past robot models have largely been derived following an inductive approach and tailored to a specific application. The dissertation, however, presents the development of a dynamics model of a complex robot with compliant actuators, applying a deductive approach. This approach shows how new robotic systems with different types of actuators can be modeled and then simulated. Models of robots featuring passive compliance and models of environments subject to deformation have been developed for the purposes of comprehensive study of a highly topical problem in robotics – interaction between robots and humans; past research has largely approximated one of these two systems as infinitely stiff (non-deformable). The dissertation considers contacts through non-elastic impact and the law of impulse conservation, and thus enables full treatment of contact tasks from a dynamics perspective.

Contribution set 2 (Section 3): Engineering approaches to the control of a robot with antagonistically coupled compliant drives.

The doctoral dissertation presents control techniques for compliant antagonistic actuators, which offer the possibility of simultaneous joint position and stiffness control and which are based on the conventional theory of non-linear and multi-variable control. Contrary to some of the previously reported results, the techniques presented in the dissertation allow a trade-off between robot joint stiffness control and antagonistic system controllability through conservation of the antagonistic-tendon tension force, while achieving energy efficiency which is a major feature of autonomous robot control. The dissertation provides a comparison with corresponding biological systems of humans and introduces behavior planning of antagonistic robotic systems consistent with biological patterns developed through evolution. Ultimately, given that control techniques based on decoupling and linearization of complex control systems by feedback linearization rarely result in practical applications because they largely depend on model accuracy, the dissertation proposes several enhancements. The modeling approach to a complex-structure robot with compliant antagonistic actuators, previously shown in the dissertation, allows enhancements of feedback linearization based on proper estimation of gravity load and effective moment of inertia on each of the robot axes. Finally, the dissertation introduces a non-parametric robust control technique for a linearized and decoupled system, which unavoidably involves modeling errors and unmodeled dynamics.

Contribution set 3 (Section 4): Cognitive approaches to the control of a robot with antagonistically coupled compliant drives.

In this section the novelties, compared to previous results reported in the literature, are reflected in the emulation and learning of movement patterns (neuro-muscular activity) of antagonistically-

coupled human muscles. Control techniques founded upon experience and based on interpolation, neural networks, fuzzy logic and heuristic decision-making are applied to a robot driven by antagonistic actuators. The results are especially significant because they represent a step towards joint control with several axes of rotation, and actuators that act simultaneously in several axes of rotation, such as in the case of anthropomorphic robots. Finally, the methods proposed in the dissertation as cognitive were needed to provide a comprehensive review of the control of an antagonistically-actuated robot, as a simplified version of the fully anthropomorphic robot.

Contribution set 4 (Section 5): Control of robots with antagonistically-coupled compliant drives in contact tasks.

Although the literature discusses a considerable number of techniques for mechanical impedance control in Cartesian coordinates or stiffness control techniques (or mechanical impedance control techniques in the general case) of a single-axis robot joint with antagonistic actuators, there are only a few reports that address stiffness control of antagonistically-actuated robots. This very fact increases the significance of the part of the dissertation that deals with conventional impedance control and partitions the necessary drive forces and moments between two antagonistically-coupled actuators. The load distribution between the two antagonistically-coupled actuators is based on the concepts of coactivation and reciprocal activation, well-known in human motor control but adapted for technical implementation in robots.

Finally, the dissertation points out its contributions in the area of modeling and control of antagonistic and compliant robot joints, as a basis for even more complex mechanical systems expected in future anthropomorphic robots. Mimicking the human muscular and skeletal structures, these would be joints with several axes of rotation, and actuators that emulate human muscles and move several robot joints simultaneously.

4.3. Verification of scientific contribution

The scientific contributions resulting from the research conducted in connection with this doctoral dissertation have been published in the following papers classified under M categories regulated by the Serbian Ministry of Education, Science and Technological Development:

Category M14:

M14.1 V. Potkonjak, **K. Jovanovic**, P. Milosavljevic, Chapter 20: How to Control Anthropomorphic Robot: Engineering and Cognitive Approach, *Springer Series on Mechanisms and Machine Science – New trends in Medical and Service Robotics*, vol. 20, pp. 299-314, 2014 (ISBN: 978-3-319-05430-8, DOI:10.1007/978-3-319-05431-5).

Category M21:

M21.1 S. Wittmeier, C. Alessandro, N. Bascarevic, K. Dalamagkidis, A. Diamond, M. Jantsch, **K. Jovanovic**, R. Knight, H. G. Marques, P. Milosavljevic, B. Svetozarevic, V. Potkonjak, R. Pfeifer, A. Knoll, O. Holland, Towards anthropomorphic robotics, *Artificial Life*, vol. 19, no.1, pp 171-193, 2013 (**IF=1.93**) (ISSN: 1064-5462, DOI: 10.1162/ARTL_a_00088).

Category M23:

M23.1 **K. Jovanovic**, V. Potkonjak, O. Holland, Dynamic modelling of an anthropomorphic robot in contact tasks, *Advanced Robotics*, vol. 28, no.11, pp 793- 806, 2014 (**IF=0.572**) (ISSN 0169-1864, DOI: 10.1080/01691864.2014.896748).

- M23.2 V. Antoska, **K. Jovanovic**, V. Petrovic, N. Bascarevic, M. Stankoviski, Balance analysis of the mobile anthropomimetic robot under disturbances – ZMP approach, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 10, no. 206, pp 1-10, 2013 (**IF=0.497**) (ISSN 1729-8806, DOI: 10.5772/56238).
- M23.3 V. Potkonjak, B. Svetozarevic, **K. Jovanovic**, O. Holland, The puller-follower control of compliant and noncompliant antagonistic tendon drives in robotic system, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 8, no. 5, pp. 143-155, 2011, (**IF=0.375**) (ISSN: 1729-8806, DOI: 10.5772/10690).

Category M33:

- M33.1 **K. Jovanovic**, P. Milosavljevic, V. Potkonjak, Control design for pick-and-place task using robot with intrinsic compliance - QB robot, *The 2nd IcETRAN Conference*, Srebrno jezero, Serbia, pp RO1.1- 1-6, 2015 (ISBN 978-86-80509-71-6).
- M33.2 B. Lukic, **K. Jovanovic**, Influence of mechanical characteristics of a compliant robot on Cartesian impedance control design, *The 2nd IcETRAN Conference*, Srebrno jezero, Serbia, pp RO2.5- 1-6, 2015 (ISBN 978-86-80509-71-6).
- M33.3 **K. Jovanovic**, J. Vranic, Muscle models for accurate simulation of human movements, *The 1st IcETRAN Conference*, Vrnjacka Banja, Serbia, pp RO2.4- 1-5, 2014 (ISBN 978-86-80509-70-9).
- M33.4 V. Potkonjak, N. Bascarevic, P. Milosavljevic, **K. Jovanovic**, O. Holland, Experience-based fuzzy control of an anthropomimetic robot, *International Joint Conference on Computational Intelligence (CFP IJCCI 2012)*, Barcelona, Spain, pp 389-394, 2012 (DOI: 10.5220/0004117503890394).
- M33.5 N. Bascarevic, **K. Jovanovic**, P. Milosavljevic, V. Potkonjak, O. Holland, Tip-over stability examination of a compliant anthropomimetic mobile robot, *IEEE International Conference on Control Applications (IEEE CCA 2012)*, Dubrovnik, Croatia, pp 1584-1589, 2012 (DOI: 10.1109/CCA.2012.6402718).
- M33.6 P. Milosavljevic, **K. Jovanovic**, N. Bascarevic, V. Potkonjak, O. Holland, Heuristic machine-learning approach to the control of an anthropomimetic robot arm, *IFAC Symposium on Robot Control (IFAC SYROCO 2012)*, Dubrovnik, Croatia, pp 301-306, 2012 (DOI: 10.3182/20120905-3-HR-2030.00098).
- M33.7 P. Milosavljevic, N. Bascarevic, **K. Jovanovic**, G. Kvascev, Neural networks in feedforward control of a robot arm driven by antagonistically coupled drives, *Symposium on Neural Networks Applications in Electrical Engineering (NEUREL)*, Belgrade, Serbia, pp 77-80, 2012 (DOI: 10.1109/NEUREL.2012.6419967).
- M33.8 V. Potkonjak, **K. Jovanovic**, P. Milosavljevic, N. Bascarevic, O. Holland, The puller-follower control concept for the multi-joint robot with antagonistically coupled compliant drives, *IASTED International Conference on Robotics (Robo 2011)*, Pittsburgh, USA, pp 375-381, 2011 (DOI: 10.2316/P.2011.752-018).
- M33.9 V. Potkonjak, **K. Jovanovic**, B. Svetozarevic, O. Holland, D. Mikicic, Modeling and control of a compliantly engineered anthropomimetic robot in contact tasks, *ASME Mechanisms and Robotics Conference (ASME Mech 2011)*, Washington, DC, USA, pp 23-32, 2011 (DOI: 10.1115/DETC2011-47256).
- M33.10 V. Potkonjak, B. Svetozarevic, **K. Jovanovic**, O. Holland, Anthropomimetic robot with passive compliance – contact dynamics and control, *IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation (MED 2011)*, Corfu, Greece, pp 1059–1064, 2011 (DOI: 10.1109/MED.2011.5983000)

- M33.11 V. Potkonjak, B. Svetozarevic, **K. Jovanovic**, O. Holland, Biologically-inspired control of a compliant anthropomorphic robot, *IASTED International Conference on Robotics and Applications*, Cambridge, Massachusetts, USA, pp 182-189, 2010 (DOI: 10.2316/P.2010.706-006)
- M33.12 V. Potkonjak, B. Svetozarevic, **K. Jovanovic**, O. Holland, Control of compliant anthropomorphic robot joint, *International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics*, Rhodes, Greece, pp 1271-1274, 2010 (DOI: 10.1063/1.3497932).

Category M51:

- M51.1 **K. Jovanovic**, J. Vranic, N. Miljkovic, Hill's and Huxley's muscle models – tools for simulations in biomechanics, *Serbian Journal of Electrical Engineering*, vol. 12, no.1, pp. 53-67, 2015 (ISSN: 1451-4869, DOI: 10.2298/SJEE1501053J).
- M51.2 V. Petrovic, **K. Jovanovic**, V. Potkonjak. Influence of external disturbances to dynamic balance of the semi-anthropomorphic robot, *Serbian Journal of Electrical Engineering*, vol. 11, no. 1, pp 145-158, 2014 (ISSN: 1451-4869, DOI: 10.2298/SJEE131014013P).
- M51.3 B. Svetozarevic, **K. Jovanovic**, Control of compliant anthropomorphic robot joint, *Serbian Journal of Electrical Engineering*, vol. 8, no. 1, pp 85-93, 2011 (ISSN: 1451-4869, DOI:10.2298/SJEE1101085S).

Category M63:

- M63.1 V. Petrovic, **K. Jovanovic**, V. Potkonjak, ZMP approach to the critical design of a mobile platform for the semi-anthropomorphic robot, *The 57th ETRAN Conference*, Zlatibor, Serbia, pp RO1.1- 1-6, 2013 (ISBN 978-86-80509-68-6).
- M63.2 N. Bascarevic, **K. Jovanovic**, V. Potkonjak, A tip-over stability analysis of an anthropomorphic wheeled robot based on zmp, *The 56th ETRAN Conference*, Zlatibor, Serbia, pp RO2.9 - 1-4, 2012 (ISBN 978-86-80509-65-9).
- M63.3 **K. Jovanovic**, N. Bascarevic, Modeling contact dynamics of the anthropomorphic robot – Eccerobot, *The 55th ETRAN Conference*, Teslic, Bosnia and Herzegovina, pp RO1.8- 1-4, 2011 (ISBN 978-86-80509-66-2).
- M63.4 **K. Jovanovic**, B. Svetozarevic, Humanoid robot model with antagonistic drives, *The 54th ETRAN Conference*, Donji Milanovac, Serbia, pp RO1.3 - 1-4, 2010 (ISBN 978-86-80509-65-5).

5. CONCLUSION AND RECOMMENDATION

The Dissertation Committee believes that the doctoral dissertation of **Kosta M. Jovanović**, MS in electrical engineering and computer science, which is titled **Modeling and control of the anthropomorphic robot with antagonistic actuators in contact and non-contact tasks**, fulfills all the essential and formal criteria stipulated in the Law on Tertiary Education and is consistent with the regulations of the University of Belgrade and the School of Electrical Engineering.

The doctoral dissertation of Kosta Jovanović contains scientific contributions to the modeling and control of anthropomorphic robots, which is a highly topical area of research in robotics on an international scale. Specifically, the scientific outcomes of the dissertation, which have been published in prestigious international journals, pertain to the development of simulation models of the dynamics of robots with compliant antagonistic actuators in contact and non-contact tasks. In the field of control, the scientific contributions of the dissertation are reflected in the development

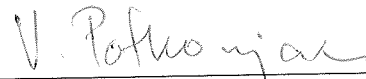
and application of non-linear, multi-variable and robust techniques for anthropomorphic robot control, based on the conventional control theory, as well as in the development and application of control techniques based on experience and learning (experience-based interpolation, neural network, fuzzy logic and heuristic decision-making). The doctoral dissertation also contributes to anthropomorphic robot control in contact tasks which, similar to the other presented techniques, largely relies on the biological principles of humans. These contributions are related to robots with antagonistic actuators, but the possibility of applying the contributions to complex robotic systems with multiple-axis joints and actuators that simultaneously drive several robot joints is also indicated.

During the course of his doctoral studies and research associated with the doctoral dissertation, the candidate Kosta Jovanović demonstrated a distinct propensity, maturity and ability to conduct independent scientific research.

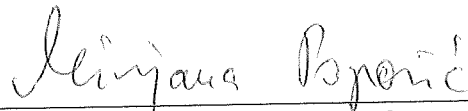
Considering all the above, the Dissertation Committee is pleased to recommend to the Teaching and Scientific Council of the School of Electrical Engineering to approve the doctoral dissertation titled **Modeling and control of the anthropomorphic robot with antagonistic actuators in contact and non-contact tasks** of the candidate **Kosta M. Jovanović**, MS in electrical engineering and computer science, to make the dissertation available to the public, and to forward it to the Board of Engineering Sciences of the University of Belgrade for adoption.

Made in Belgrade on February 10, 2016

DISSERTATION COMMITTEE



Dr. Veljko Potkonjak, Full Professor
University of Belgrade, School of Electrical Engineering



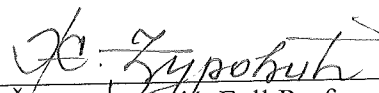
Dr. Mirjana Popović, Full Professor
University of Belgrade, School of Electrical Engineering



Dr. Aleksandar Rodić, Scientific Advisor
University of Belgrade, Mihajlo Pupin Institute



Dr. Alin Albu-Schäffer, Full Professor
Technical University of Munich, Germany
Director, DLR Institute of Robotics and Mechatronics, Germany



Dr. Željko Đurović, Full Professor
University of Belgrade, School of Electrical Engineering