

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Подобност теме и кандидаткиње Марије М. Томић за израду докторске дисертације

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета Универзитета у Београду бр. 806 од 15.11.2016. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидаткиње Марије М. Томић, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, за израду докторске дисертације и научне заснованости теме **„Дворучна роботска манипулација инспирисана људским вештинама“** (енг. **“Dual-Arms Robotic Manipulation Inspired by Human Skill”**).

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Марија Томић је рођена 14.07.1987. године у Ужицу. Основну школу и Гимназију завршила је у Ужицу. Електротехнички факултет у Београду уписала је 2006. године на одсеку Сигнали и системи. Дипломирала је 2010. године са просечном оценом 9.02 са темом дипломског рада „Моделовање, управљање и симулација мобилне роботске платформе са роботском руком LYNXMOTION AL5A“. Мастер студије је уписала 2010. године на Електротехничком факултету у Београду на истом одсеку и завршила 2011. године са просечном оценом 10. Тема мастер рада је „Моделирање и управљање координисаном дворучном манипулацијом сервисног робота антропоморфне структуре“. Докторске студије је уписала 2011. године на Електротехничком факултету у Београду, Модул управљање системима и обрада сигнала. Наредне године осваја стипендију Француске владе за докторске студије у Француској и свој докторат наставља као билатерални докторски програм између Електротехничког факултета у Београду и „Ecole Centrale de Nantes“ у Нанту у Француској. Током докторских студија на Електротехничком факултету положила је десет испита са просечном оценом 10.00 и одслушала више курсева из области роботике на „Ecole Centrale de Nantes“ што је предуслов пријаве докторске тезе.

Марија Томић је током основних и мастер студија стицала знања из роботике кроз стручне праксе у „Manipal Institute of Technology“ у Индији 2010. године (у трајању од три месеца) и институту „Михајло Пупин“ у Београду 2010. године у Центру за роботiku (у трајању од годину дана). Након успешно завршене стручне праксе Марија Томић је засновала радни однос у институту „Михајло Пупин“ у Центру за роботiku 2012. године, где је запослена до данас на позицији истраживач сарадник. У оквиру билатералних докторских студија Марија Томић је у периоду од три године провела осамнаест месеци у институту IRCCYN факултета „Ecole Centrale de Nantes“ у тиму „Team Robotics“ као студент докторских студија. У истом периоду на факултету „Ecole Centrale de Nantes“ пратила је курсеве мастер програм из

области роботике „EMARO+“. У јуну 2012. године је похађала летњу школу роботике „MESROB 2012“ на Техничком универзитету у Клуж-Напоки у Румунији.

Област научног истраживања кандидата обухвата имитацију људских покрета помоћу хуманоидних робота велике редувантности. Аутор је преко 10 радова у научним часописима и на домаћим и страним конференцијама.

Нека од признања Марије Томић за досадашњи рад и активности су:

- Прва награда на међународном такмичењу студентских пројеката у области инжењерства – *ICAMES* у Истанбулу (2011. године),
- Стипендија француске владе за билатералне докторске студије између Универзитета у Београду и „Ecole Centrale de Nantes“ у Француској (2012-2015. године)

1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Област истраживања Марије Томић је хуманоидна роботика, имитација људских покрета и управљање редувантним роботским системима.

У оквиру ових области Марија Томић је до сада учествовала на следећим пројектима:

- IZ74Z0_137361/1: „Creative Alliance in Robotics Research and Education Focused on Medical and Service Robotics“ финансиран од стране Swiss National Science Foundation (2012.-2014. године)
- TP-35003 - пројекат Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије: „Истраживање и развој амбијентално интелигентних сервисних робота антропоморфних карактеристика“. (2011.-2016. године)
- European research and development program HORIZON 2020, Coordination support activity project “Researchers’ night - FLIRT”, финансиран од стране EU Commission (2014.-2015. године)

На докторским студијама је положио 10 испита са просечном оценом 10,00:

Рд. бр.	Назив испита	Оцена	ЕСПБ
1	Праћење покретних циљева	10	9
2	Теорија роботских система	10	9
3	Софтверски системи за рад у реалном времену	10	9
4	Аутоматско вођење објекта у простору	10	9
5	Интелигентни роботски системи	10	9
6	Вештачка интелигенција	10	9
7	Оптимални и адаптивни стохастички системи	10	9
8	Неуралне мреже	10	9
9	Енглески језик	10	6
10	Специјални роботски системи	10	9
	Назив обавезе		
1	Студијски истраживачки рад I		15
2	Студијски истраживачки рад II		15
3	Научно стручни рад		3

Досадашњи резултати кандидаткиње Марије Томић су приказани кроз публиковане радове и то: 2 поглавља у монографијама међународног значаја, 7 радова штампаних у зборницима

међународних научних скупова и 5 радова штампаних у зборницима научних скупова од националног значаја.

Радови у поглављу монографије међународног значаја (M14):

1. **Tomić M.**, Vassallo Ch., Chevallereau Ch., Rodić A., Potkonjak V.: Arms motion of a humanoid inspired by human motion, - New Trends in Medical and Service Robotis, Springer, Vol 38, No 3, 2016, pp. 227-238. ISBN 978-3-319-05431-5, ISSN: 2211-0984, DOI: 10.1007/978-3-319-05431-5
2. Rodić A., Urukalo Đ., Vujović M., Spasojević, S., **Tomić M.**, Berns, K., Al-Darraj, S. and Zafar, Z.: Embodiment of Human Personality with EI-Robots by Mapping Behaviour Traits from Live-Model, - Advances in Robot Design and Intelligent Control (Springer), Vol 540, No 7, 2017, pp. 438-448. ISBN: 978-3-319-49058-8, DOI: 10.1007/978-3-319-49058-8_48

Радови у зборницима међународних научних скупова (M33):

1. Potkonjak V., **Tomić M.**, Rodić A., Antoska V.: Human and Humanoid Motion - Distinguish Between Safe and Risky Mode of Locomotion, - IFAC Proceedings Volumes, Vol 45, No 22, 2012, pp. 524-529. <http://dx.doi.org/10.3182/20120905-3-HR-2030.00070>, ISBN: 978-3-902823-11-3
2. **Tomić M.**, Miloradović B., Janković M.: The algorithm for trajectory tracking using a combination of Neural Network and Genetic Algorithm, - 11th Symposium on Neural Network Applications in Electrical Engineering, Beograd, Srbija, 2012, pp. 59-64, DOI:10.1109/NEUREL.2012.6419964, ISBN: 978-1-4673-1570-8
3. **Tomić M.**, Chevallereau Ch.: Conversion of Captured Human Motion to the Humanoid ROMEO for Human Imitation, - The 1st IcETRAN Conference, Vrnjačka Banja, Srbija, Jun, 2014. ROI 2.3, ISBN 978-86-80509-70-9
4. **Tomić M.**, Vassallo Ch., Chevallereau Ch., Rodić A., Potkonjak V.: Arms motion of a humanoid inspired by human motion, - MESROB 2014, EPFL Lausanne, Švajcarska, Jul, 2014.
5. **Tomić M.**, D. Katić, "Arms Dual-Arm Robot Tracking of the Moving Target Using the Algorithm of Inverse Kinematics", The 1st IcETRAN Conference, Vrnjačka Banja, Srbija, Jun, 2014. ROI 1.3, ISBN 978-86-80509-70-9
6. **Tomić M.**, Rodić A., Urukalo Đ.: Solving Inverse Kinematics of Hyper-Redundant Multi-Links Flexible Robot-modeling and simulation, - The 2nd IcETRAN Conference, Srebrno jezero, Serbia, Jun, 2015, RO 1.3, ISBN 978-86-80509-70-9
7. Vujović M., Stevanović I., **Tomić M.**, Miloš M., Rodić A.: Mechanical design of robot head with ability to express emotional gestures, - The 2nd IcETRAN Conference, Srebrno jezero, Serbia, Jun, 2015, RO 3.5, ISBN 978-86-80509-70-9

Радови у зборницима научних скупова од националног значаја (M63):

1. **Tomić M.**, Chevallereau Ch.: The Circular motion of the Dual-Arms Robotics Manipulation Hands Inspired by Human Skill, - The 57th ETRAN Conference, Zlatibor, Srbija, Jun, 2013, RO 1.5, ISBN 978-86-80509-68-6
2. Miloradović B., **Tomić M.**, Popić S.: Primena veštačkih neuronskih mreža za rešavanje problema inverzne kinematike manipulatora sa pet stepeni slobode, - The 56th ETRAN Conference, Zlatibor, Srbija, Jun 2012, RO 1.8, ISBN 978-86-80509-67-9
3. **Tomić M.**, Janković M.: Solving inverse kinematics problem of ROBOD3 manipulator using genetic algorithms, - The 56th ETRAN Conference, Zlatibor, Srbija, Jun 2012, RO 1.6, ISBN 978-86-80509-67-9
4. Bascarević N., **Tomić M.**, Milosavljević P.: Symbiosis of programming languages Matlab and C++ for efficient robot simulation, - The 55th ETRAN Conference, Banja Vrucica, Bosna i Hercegovina, Jun, 2011, RO 1.6 ISBN 978-86-80509-66-2
5. **Tomić M.**, Potkonjak V.: Čovečiji i čovekoliki hod razlike između safe i risky moda, - The 54th ETRAN Conference, Donji Milanovac, Srbija, Jun, 2010, RO 1.7, ISBN 978-86-80509-65-5

Кандидаткиња је 25.11.2016. године на Електротехничком факултету у Београду јавно усмено бранила предложену тему докторске дисертације пред комисијом у саставу:

1. др Жељко Ђуровић, редован проф., Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,
2. др Александар Родић, научни саветник, Институт Михајло Пупин,
3. др Лазар Сарановац, ванредни проф., Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,

где је комисија закључила да је кандидаткиња добила оцену **задовољила** и да испуњава услове за рад на предложеној теми докторске дисертације.

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

На основу претходног приказа резултата досадашњег рада кандидаткиње Марије Томић, Комисија је сагласна да је кандидаткиња показала способности за рад на предложеној теми докторске дисертације. Постигнутим резултатима Марија Томић је демонстрирала да је вредна и одговорна кандидаткиња која је показала способност да своја теоријска и практична знања успешно примени у пракси, а у складу са тим и демонстрира научној јавности. Кроз ангажман на бројним домаћим и иностраним пројектима и у оквиру својих билатералних докторских студија Марија Томић је стекла широко знање из области роботике и поред тога успоставила контакте са водећим домаћим и страним истраживачким институцијама у истој области. Марија Томић је извршила све обавезе у оквиру докторских студија: положила све планом предвиђене испите и остварила 120 ЕСП бодова, јавно одбранила тему докторске дисертације пред комисијом формираном од стране Наставно-научног већа Електротехничког факултета у Београду.

Предложена тема докторске дисертације кандидаткиње Марије Томић је у складу са докторског програма који похађа и повезана је са резултатима приказаним кроз публиковане радове. Стога Комисија сматра да Марија Томић задовољава све услове за рад на предложеној теми.

2. Предмет и циљ истраживања

Последњих година, развој хуманоидне роботике је оријентисан ка интеграцији робота у људско окружење и помагање човеку у свакодневним активностима. Сходно томе се тежи да из генерације у генерацију хуманоидни роботи све више попримају карактеристике човека - како физичке тако и моделе понашања. Захваљујући развоју биомеханике, медицине, физиологије, роботике и неурофизиологије, научници су направили значајан допринос у моделирању људског тела [1,2]. Ипак, хуманоидни роботи су још увек далеко од људских карактеристика. Човек има 206 костију повезаних различитим врстама еластичних зглобова, а људско кретање се остварује са око 640 скелетних мишића. С друге стране, хуманоидни робот има круте серијске кинематичке ланце са крутим зглобовима опремљеним ограниченим бројем сензора. Иако поједностављена, класична репрезентација хуманоидних робота са по 7 степени слободе у рукума и по 6 у ногама је довољна за моделирање људског тела. Хуманоидни робот Ромео са овим карактеристикама је коришћен у нашем истраживању [8].

У циљу повећавања прихватљивости хуманоидних робота у људском окружењу, кретање хуманоидног робота мора бити "блиско" људском кретању и/или инспирисано људским вештинама. Како је хуманоидни робот редундантна структура као и човек, он је у могућности да имитира људско кретање. Имитацију људских покрета је могуће остварити уз помоћ процеса имитације људског покрета [3] или процеса изучавања људског покрета. Процес изучавања људског покрета има за циљ анализу карактеристика људског покрета на основу података добијених снимањем људских покрета. Са друге стране процес имитације људских покрета је заснован на имитацији покрета без било какве анализе карактеристика људских покрета. Наше истраживање се заснива на оба приступа имитације људских покрета.

Посматрајући преглед стања у области имитације људских покрета можемо видети да је „Programing by Demonstration“ најчешће коришћен метод за трнсфер људског покрета у покрет хуманоида [11-13]. Проблем имитације људских покрета се може решити коришћењем оптимизационих алгоритама на динамичком и кинематском нивоу. Имитацију покрета горњег дела тела коришћењем динамичких једначина и информације о покрету добијених уз помоћ система за снимање људских покрета је анализирано у радовима [4,5]. Проблем имитације људских покрета је решен на кинематском нивоу у радовима [6,7].

Предложен је метод за трансформисање снимљених 3Д позиција маркера у трајекторије зглобова велике димензионалности. Људско тело је моделирано као скалирани модел хуманоида. Оптимизационе технике као што су „B-spline wavelets“ и „large-scale optimization“ су коришћене за генерисање покрета зглобова. Представљени алгоритми нису у могућности да остваре имитацију људског покрета у реалном времену. Стога, наш задатак ће бити да генеришемо алгоритам који ће моћи да имитира људске покрета у реалном времену. Без обзира који се имитациони процес користи, верификација резултата имитационих алгоритама на хуманоидном роботу захтева и узимање у обзир карактеристика робота као што је ограничење у зглобовима, радни простор робота... Радови [9,10] представљају најчешће коришћене алгоритме за израчунавање радног простора робота и генерисање покрета робота у оквиру ограничења у зглобовима, који су коришћени и у нашем истраживању.

Процес изучавања карактеристика људских покрета се надовезује на процес имитације људског покрета. Трајекторије људских покрета добијених из имитационог алгоритма се користи за анализу карактеристика људских покрета. Током обављања покрета, човек највероватније користи оптимално решење за извршавање покрета покушавајући да минимизира за нас непознате критеријумске функције. Стога, за анализу карактеристика људског кретања, инверзни оптимизациони приступи се могу користити за проналажење коришћеног критеријума. На жалост, критеријумске функције које човек минимизира током покрета могу зависити од начина на који је анализиран човечији покрет. У области биомеханике, критеријумска функција која је најчешће коришћена за анализу људских покрета је минимизација напора мишића [14]. У области роботике најчешће минимизирана критеријумска функција је момент у зглобовима [15]. Током нашег истраживања, ми смо анализирали утицај појединачних критеријумских функција на квалитет имитације покрета [16]. Критеријумске функције су дефинисане на кинематском нивоу као што су минимизација кинетичке енергије, минимизација брзине зглобова, максимизација манипулабилности и минимизација одступања од ергономичне позиције човека.

Посматрајући начине на који човек обавља задатке логично је схватање да човек користи комбинацију критеријумских функција уместо једног критеријума. У радовима [17,18] имитација људског кретања је представљена као оптимизациони проблем са објективном функцијом која представља тежинску суму критеријумских функција: минимизација укупног времена, минимизација компоненти убрзања током кретања, минимизација грешке оријентације и правца кретања ка голу. Циљ његовог истраживања је да пронађу оптималну комбинацију тежинских фактора која би била у стању да опише било које људско кретање. У раду [19] је проширен оптимизациони алгоритам инверзне кинематике заснован на псеудоинверзији и минимизација одступања од жељене позиције шака и зглобова су узети као критеријумске функције. У представљеним оптимизационим алгоритмима критеријумска функција је дефинисана у простору спољашњих координата. Анализу карактеристика људског покрета у простору унутрашњих координата је представљена у раду [20]. Комбинација критеријумских функција минимизација померања зглобова, минимизација промене потенцијалне енергије и минимизација дискомфота је дефинисана у оптимизационом алгоритму. За сваку критеријумску функцију је предложен тежински фактор узимајући у обзир утицај сваког зглоба на остваривање покрета. Насупрот многим студијама а са циљем да се дефинише једноставно правило управљања хуманоидним роботом, тестирани критеријуми ће бити суштински дефинисани на нивоу брзине (а не на нивоу убрзања и момента).

Циљеви истраживања ће бити организовани у две спрегнуте целине: генерисање алгоритама за имитацију снимљених људских покрета у реалном времену уз помоћ хуманоидног робота и развој оптимизационих алгоритама, као што је алгоритам инверзне кинематике, за анализу карактеристика људских покрета у циљу преношења људских вештина на кретање хуманоидних робота. У овом истраживању ће бити анализирани основни покрети дворучне манипулације који су мање анализирани у литератури. Сваки од покрета садржи две фазе:

фазу покрета која подразумева контакт између шака и опреме и фазу кретања без контакта. Покрети дворучне манипулације ће бити класификовани на транслационе и ротационе покрете, а додатна класификација је дефинисана у складу са међусобним односима кретања руку приказаним у радовима [21,22]. Сваки од покрета ће бити извршени од стране 15 здравих особа и снимљен уз помоћ Vison система за снимање људских покрета.

У првој фази истраживања, алгоритам за конверзију људских покрета на покрете хуманоида ће бити дефинисан. Алгоритам ће бити заснован на праћењу маркера физички постављених на људском телу, а на бази виртуелних маркера чија позиција је дефинисана на скалираном моделу робота Ромеа. Аналитички приступ решавања оптимизационих проблема ће бити искоришћен за дефинисање у имитационом алгоритму. Циљ је да се добије имитациони алгоритам који ће бити у могућности да у реалном времену имитира кретање човека. Имитациони алгоритам ће конвертовати људске покрете у покрете скалираног модела робота у простору спољашњих и унутрашњих координата. Добијени резултати ће бити искоришћени за генерисање покрета робота Ромеа током кретања са и без контакта између руку и пореме. Стратегија остваривања контакта између руку робота и опреме ће бити додатно анализирана.

Друга фаза истраживања имаће за циљ анализу стратегије људских покрета. Заједничка претпоставка многих оптимизационих приступа је да током свакодневних задатака манипулације човек покушава да минимизира непознате критеријуме. Сходно томе, биће потребно дефинисати критеријуме који могу описати карактеристике људског покрета. На основу дефинисаних критеријума ми ћемо бити у могућности да остваримо кретање хуманоидног робота које садржи карактеристике људског покрета. Алгоритам инверзне кинематике као најчешће коришћен алгоритам за генерисање покрета хуманоидних робота се може користити и за имитацију људских покрета што је и предмет овог истраживања. На основу истраживања постојећих резултата, алгоритам инверзне кинематике није често коришћен за анализу карактеристика људског кретања. Примарни задатак алгоритма инверзне кинематике је праћење жељене путање завршног уређаја робота (за случај дворучне манипулације то су путање руке). Као алгоритам оптимизације, инверзна кинематика може додатно укључити критеријумске функције за оптимизацију које могу дати карактеристике људског кретања. Ми ћемо узети комбинацију основних критеријумских функција које су добро познате у процесу оптимизације у роботизи као што су: минимизација кинетичке енергије, минимизација брзине у зглобовима, повећавање манипулабилности и тежња ергономичној позицији човека. Објективна критеријумска функција оптимизационог алгоритма ће бити дефинисана као збир основних критеријумских функција са тежинским коефицијентима који дају приоритете сваком од критеријума. На овај начин желимо да разумемо и идентификујемо оптималну комбинацију критеријума која представља људски покрет и успоставимо моделе оптималне контроле које се могу користити за контролу кретања робота. На овај начин, алгоритам инверзне кинематике за генерисање покрета робота са људским вештинама би био дефинисан. Добијени покрети робота би били налик на људске покрете што је и један од циљева за бољу интеграцију робота у људско окружење. Такође, наш алгоритам може наћи примену и у рехабилитационог медицине, анализом покрета људи са нарушеном моториком покрета и поређењем са добијеним карактеристикама покрета здравих људи.

1. Köhler H., Pruzinec M., Feldmann T., Wörner A.: Automatic Human Model Parametrization from 3D Marker Data for Motion Recognition, - International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision, Plzen, Czech Republic, February 2008.
2. Kirk A. G., O'Brien J. F., Forsyth D. A.: Skeletal Parameter Estimation from Optical Motion Capture Data, - Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2005.
3. Do M., Azad P., Asfour T., Dillmann R.: Imitation of human motion on a humanoid robot using non-linear optimization, - In Humanoid Robots, 2008. Humanoids 2008. 8th IEEE-RAS International Conference on IEEE, Daejeon, Korea, 2008, pp. 545-552.
4. Ott C., Lee D., Nakamura Y.: Motion capture based human motion recognition and imitation by direct marker control, - Proceedings of IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, 2008, pp. 399-405.

5. Suleiman W. et al.: On human motion imitation by humanoid robot, - IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2008), Pasadena, California, USA, May 2008, pp. 2697-2704.
6. Ude A., Atkeson C., Riley M.: Programming full-body movements for humanoid robots by observation, *Robot. Auton. Syst.* (Elsevier), Vol. 47, No 2/3, 2004, pp. 93 -108.
7. Ude A., Man C., Riley M., Atkeson C.G.: Automatic Generation of Kinematic Models for the Conversion of Human Motion Capture Data into Humanoid Robot Motion, - In *Proceeding of the First IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots* (Georgia Institute of Technology), 2000, pp. 2223 -2228.
8. FUI national Romeo project: <http://projetromeo.com>
9. Wenger Ph.: Performance Analysis of Robots, - *Modeling, Performance Analysis and Control of Robot Manipulators*. Wiley Online Library, 2010, pp. 141-183.
10. Baerlocher, P., Boulic, R.: An inverse kinematics architecture enforcing an arbitrary number of strict priority levels, - *The visual computer*, Vol. 20, No 6, 2004, pp. 402-417.
11. Calinon S., Guenter F., Billard, A: Goal-directed imitation in a humanoid robot, - In *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2005, pp. 299-304.
12. Calinon S., Billard A.: Stochastic gesture production and recognition model for a humanoid robot, - *Proceedings. 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 3, 2004, pp. 2769-2774.
13. Calinon S., Billard A.: Incremental learning of gestures by imitation in a humanoid robot, - In *Proceedings of the ACM/IEEE international conference on Human-robot interaction*, 2007, pp. 255-262.
14. Khatib O. et al.: Robotics-based synthesis of human motion,- *Journal of Physiology-Paris*, Vol. 103, No 3, 2009, pp. 211-219.
15. Zheng Y., Yamane K.: Human motion tracking control with strict contact force constraints for floating-base humanoid robots,- *13th IEEE-RAS International Conference Humanoid Robots (Humanoids)*, 2013, pp. 34-41.
16. Tomić M., Vassallo Ch., Chevallereau Ch., Rodić A., Potkonjak V.: Arms motion of a humanoid inspired by human motion, - *New Trends in Medical and Service Robotis* (Springer), Vol. 38, No 3, 2016, pp. 227-238.
17. Mombaur K., Laumond JP., Yoshida E.: An optimal control model unifying holonomic and nonholonomic walking, - *8th IEEE-RAS International Conference Humanoid Robots*, 2008, pp. 646-653.
18. Mombaur K., Truong A., Laumond JP.: From human to humanoid locomotion—an inverse optimal control approach, - *Autonomous robots* (Springer), Vol 28, No 3, 2010, pp. 369-383.
19. Billard A. G., Calinon S., Guenter F.: Discriminative and adaptive imitation in uni-manual and bi-manual tasks, - *Robotics and Autonomous Systems*(Elsevier), Vol 54, No 5, 2006, pp. 370-384.
20. Yang J., Marler R. T., and Kim HJ., Arora J., Abdel-Malek K.: Multi-objective optimization for upper body posture prediction, - *10th AIAA/ISSMO multidisciplinary analysis and optimization conference*, Vol 30, 2004.
21. Zöllner R., Asfour T. Dillmann R.: Programming by demonstration: dual-arm manipulation tasks for humanoid robots, - *IROS*, 2004, pp.479-484.
22. Krüger J., Schreck G., Surdilovic D.: Dual arm robot for flexible and cooperative assembly, - *CIRP Annals-Manufacturing Technology* (Elsevier), Vol 60, No 1, 2011, pp. 5-8.

3. Полазне хипотезе

Полазне хипотезе докторске дисертације се заснивају на следећим претпоставкама:

- Имитација људских покрета је важна у циљу постизања природне интеракције између човека и робота, пружања помоћи у обављању свакодневних задатака старијих особа и особа са инвалидитетом, у физикалној терапији деце, помоћи људима при обављању једноставних индустријских задатака у небезбедном окружењу [1- 3].
- Људско кретање се може представити као резултат процеса оптимизације [4] и комбинације основних критеријумских функција коришћењем алгоритама инверзне кинематике [5].
- Човек обично бира једну стратегију за генерисање истог покрета у различитим срединама и ограничењима[6, 7]
- Критеријуми које човек користи могу бити модификовани због карактеристика средине као што су величина човека у односу на опрему, растојање између човека и опреме... [8]
- Добијена стратегија људског покрета ће бити у стању да генерише најбољу имитацију анализираног људског покрета на високо редундантном хуманоидном роботу [9].

1. Ayusawa K., Morisawa M., Yoshida E.: Motion retargeting for humanoid robots based on identification to preserve and reproduce human motion features,- *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2015, pp. 2774-2779.
2. Borovac B., Gnjatović M., Savić S., Raković M., Nikolić M.: Human-like Robot MARKO in the Rehabilitation of Children with Cerebral Palsy, - *New Trends in Medical and Service Robots*, 2016, pp. 191-203.

3. Yokoyama K. et al.: Cooperative works by a human and a humanoid robot, - IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 3, 2003, pp. 2985-2991.
4. Ude A., Atkeson C., Riley M.: Programming full-body movements for humanoid robots by observation, Robot. Auton. Syst. (Elsevier), Vol.47 No 2/3, 2004, pp. 93 -108.
5. Billard A.G., Calinon S., Guenter F.: Discriminative and adaptive imitation in uni-manual and bi-manual tasks, - Robotics and Autonomous Systems (Elsevier), Vol. 54, No 5, 2006, pp. 370-384.
6. Lardy J., Beurier G., Wang X.: Effects of rotation amplitude on arm movement when rotating a spherical object, - Ergonomics (Taylor & Francis), Vol. 55, No 12, 2012, pp. 1524-1534.
7. Potkonjak V., Popović, M., Lazarević, M., Sinanović J.: Redundancy problem in writing: from human to anthropomorphic robot arm, - IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, Vol. 28, No 6, 1998, pp. 790-805.
8. Mombaur K., Laumond JP., Yoshida E.: An optimal control model unifying holonomic and nonholonomic walking, - 8th IEEE-RAS International Conference on Humanoids, 2008, pp. 646-653.
9. Mombaur K., Truong A., Laumond JP.: From human to humanoid locomotion—an inverse optimal control approach, - Autonomous robots, Vol. 28, No 3, 2010, pp. 369-383.

4. Научне методе истраживања

Методологија која ће се користити у докторској дисертацији почиње са систематском анализом доступних алгоритама за имитацију људског покрета и оптимизационих алгоритама за анализу карактеристика људских покрета са нагласком на имитацију и анализу дворучне манипулације са и без контакта са опремом. Прва фаза истраживања ће бити заснована на снимању различитих врста основних покрета дворучне манипулације. Сваки од покрета ће извршавати 15 актера под истим условима у виртуелном окружењу. За потребе нашег истраживања користићемо Vicon систем за снимање људских покрета који пружа информације о кретању маркера физички постављених на људско тело. За представљање кинематичког модела људског тела биће коришћен скалирани модел хуманоидног робота Ромеа. На основу анализе расположивих техника, ми ћемо побољшати постојећи алгоритам за имитацију људског покрета и поред праћења кретања маркера у имитациони алгоритам ћемо укључити и праћење кретања зглобова актера у циљу повећавања прецизности имитације. Прецизна имитација кретања је веома важна за обављање манипулационих задатака при контакту са опремом. Добијен имитациони алгоритам ће бити тестиран на хуманоидном роботу Ромеу за имитацију људских покрета, са и без контакта између руку и опреме, у реалном времену. У другој фази истраживања, на кинематичком нивоу ћемо анализирати постојеће критеријумске функције које се често користе у оптимизационим алгоритмима из области роботике. Ми ћемо прилагодити основни облик алгоритма инверзне кинематике у циљу укључивања критеријумских функција као што су минимизација кинетичке енергије, минимизација норме брзина степени слободе у зглобовима, минимизација удаљености између тренутне позиције и ергономске конфигурације човека и постављање руку далеко од сингуларних вредности (максимизација манипулабилности). Лагранжов мултипликатор ће се користити за формулисање алгоритма инверзне кинематике са оптимизационим делом који представља тежинску комбинацију основних критеријумских функција. Карактеристике људских покрета ће бити анализирани на основу вредности тежинских коефицијената сваког критеријума. Имитација снимљеног кретања са хуманоидним роботом Ромеом ће бити извршена помоћу алгоритма инверзне кинематике и комбинацијом критеријумских функција дефинисаном претходном методом.

5. Очекивани научни допринос

Очекивани научни доприноси докторске дисертације су:

- Побољшање постојећег алгоритма имитације, узимајући у обзир информације о кретању маркера и зглобова актера, са циљем повећања тачности имитације.
- Истраживање карактеристика основних покрета дворучне манипулације, сам и без контакта између руку и опреме, које у комбинацији могу бити коришћене за дефинисање сложених задатака

- Анализа људског покрета на нивоу кинематике, без узимања у обзир динамике кретања, за предлагање једноставне управљачке стратегије која се лако имплементира на хуманоидном роботу
- Коришћење алгоритма инверзне кинематике, који садржи пондерисану комбинацију неколико основних критеријумских функција, за анализу карактеристика људског кретања
- Имплементација добијених карактеристика људског покрета на хуманоидном роботу у циљу прилагођавања хуманоида за сарадњу са људима у кооперативним задацима и за бољу интеграцију хуманоидних робота у животну средину човека
- Анализа различитих карактеристика људских покрета у простору унутрашњих координата за исте покрете у простору спољашњих координата
- Анализа карактеристика кретања у зависности од карактеристика човека (старост, пол, физичка кондиција, димензије тела...)

Очекивани допринос у смислу унапређења инжењерске праксе би се огледао у успостављању лакше интеграцији робота у људском окружењу при обављању свакодневних послова; анализом људских покрета са нарушеном моториком упоређујући са карактеристикама покрета здравих људи; замена људи у извршавању задатака дворучне манипулације у срединама опасним по живот човека (са високом степеном радијације, високим температурама...).

6. План истраживања и структура рада

План истраживања се састоји од две фазе.

Прва фаза: Имитација људског кретања - експериментално снимање људских покрета и дефинисање карактеристика кретања помоћу имитационог алгоритма:

- Анализирање основних покрета дворучне манипулације и њихова класификација у различите групе према заједничким карактеристикама (транслаторно или ротационо кретање руку, асиметрично или симетрично кретање руку...).
- Анализирање постојећих алгоритама за имитацију људских покрета.
- Анализирање одговарајућих кинематичких модела хуманоидног робота који могу бити коришћени као поједностављен модел људског тела у имитационом алгоритму.
- Скалирање кинематичког модела хуманоидног робота Ромео на димензије сваког актера на основу процењених димензија сегмената тела актера.
- Развој имитационог алгоритма заснованог на аналитичком приступу за остваривања имитације људских покрета у реалном времену коришћењем скалираног модела робота Ромео и података о људском покрету добијених из система за снимање људских покрета.
- Тестирање развијеног имитационог алгоритма на сету покрета дворучне манипулације различитих карактеристика.
- Компаративна анализа развијеног имитационог алгоритма и постојећих алгоритама.
- Тестирање резултата добијених из развијеног имитационог алгоритма за генерисање истих покрета са роботом Ромео у човековом окружењу.

Друга фаза: Анализа карактеристика људског покрета помоћу алгоритма инверзне кинематике као оптимизационог приступа:

- Преглед стања у области анализе људских покрета коришћењем оптимизационих алгоритама.
- Дефинисање критеријумских функција за представљање карактеристика људских покрета на кинематском нивоу.
- Развој алгоритма инверзне кинематике као оптимизационе методе са пондерисаном комбинацијом четири критеријумске функције за анализу карактеристика људских покрета.
- Процена вредности тежинских коефицијената уз помоћ генетског алгоритама.

- Тестирање развијеног алгоритма инверзне кинематике на сету од седам покрета дворучне манипулације сваки извршен од стране петнаест актера.
- Анализа човечије стратегија за обављање покрета на основу добијених вредности тежинских коефицијената.
- Анализа утицаја окружења и карактеристика актера на стратегију извршавања покрета на основу вредности тежинских коефицијената.
- Тестирање развијеног алгоритма инверзне кинематике са одређеним комбинацијама критеријумских функција за извршавање истог задатка на роботу Ромео.

7. Закључак и предлог

На основу свега претходно наведеног, Комисија сматра да мастер инжењер електротехнике и рачунарства **Марија М. Томић**, потпуно испуњава све услове за израду докторске дисертације и потврђујемо научну заснованост предложене теме „Дворучна роботска манипулација инспирисана људским вештинама“ (енг. „**Dual-Arms Robotic Manipulation Inspired by Human Skill**“). Молимо да се одобри писање докторске дисертације на енглеском језику.

Предложена тема докторске дисертације је у оквиру студијског програма на Електротехничком факултету у Београду на коме је кандидаткиња и уписана и обухвата актуелна истраживања у области хуманоидне роботике - моделирања и управљања роботима.

Наглашавамо да су докторске студије кандидаткиње Марије Томић реализоване у оквиру билатералних докторског програма између Електротехничког факултета, Универзитета у Београду и факултета „Ecole Centrale de Nantes“ у Нанту у Француској. У складу са тим предлажемо за менторе др. Christine Chevallereau, научни директор на CNRS ангажована на „Ecole Centrale de Nantes“ у Нанту у Француској и др Косту Јовановића, доцента Електротехничког факултета, Универзитета у Београду.

Београд, 26. јануар 2017. године

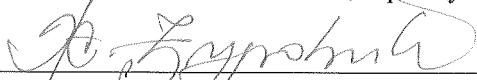
ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



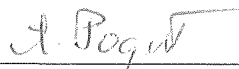
др Коста Јовановић, доцент
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



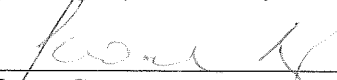
др Christine Chevallereau, Научни директор CNRS
Ecole Centrale de Nantes, Француска



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



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



др Лазар Сарановац, ванредовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

TO TEACHING-SCIENTIFIC COUNCIL

Subject: The suitability of the thesis topic and candidate Marija M. Tomić for the development of the doctoral dissertation

By decision of Teaching-scientific council of the School of Electrical Engineering, University of Belgrade number 806 from 15.11.2016, we are selected as Committee members for evaluation of the thesis topic and candidate Marija M. Tomić, MSc EE., for the development of the doctoral dissertation and scientific basis of the thesis topic: **“Dual-Arms Robotic Manipulation Inspired by Human Skill”** (srb „Дворучна роботска манипулација инспирисана људским вештинама“).

Based on the material enclosed with the candidate request, the Committee submits the following

REPORT

1. Information about the candidate

1.1. Biographical information

Marija Tomić was born on 14.07.1987. in Užice. Elementary and high school was finished in Užice. School of Electrical Engineering in Belgrade was enrolled in 2006 at the Department Signals and Systems. She graduated in 2010 with an average score of 9:02 with the thesis „Modelling, control and simulation of mobile robot platform with a robotic arm LYNXMOTION AL5A“. Master's study was enrolled in 2010 at the School of Electrical Engineering in Belgrade in the same department and finished in 2011 with an average score of 10. The topic of master's thesis was „Modeling and managing coordinated two handed manipulation of the service robot anthropomorphic structures“.

PhD studies, she enrolled in 2011 at the School of Electrical Engineering in Belgrade, module Control systems and signal processing. The following year she won a French government scholarship for doctoral studies in France and her PhD studies continue as a bilateral doctoral program between the School of Electrical Engineering in Belgrade and the „Ecole Centrale de Nantes“ in Nantes, France. During her PhD studies at the School of Electrical Engineering, Marija passed ten exams with an average score of 10:00 and listened to several courses in the field of robotics at the „Ecole Centrale de Nantes“ which is a precondition of the application of the PhD thesis.

Marija Tomić has acquired knowledge in the field of the robotics through professional practices during her primary and master studies: professional practice in „Manipal Institute of Technology“, India in 2010 (for a period of three months) and an internship in the Institute „Mihajlo Pupin“, Robotics Lab, Belgrade in 2010 (for a period of one year). After the successful completion of her professional practice, Marija Tomić has been employed at the Institute „Mihajlo Pupin“, Robotics Lab, in 2012 where she works until now at the position of Research Assistant. Within the framework of bilateral doctoral studies Marija Tomić spent eighteen months, in the period of three

years, in Institute IRCCYN, Faculty "Ecole Centrale de Nantes", Team Robotics, as a PhD student. In the same period, she followed master classes program in the field of robotics, "EMARO+" at the Faculty "Ecole Centrale de Nantes". In June 2012, she attended summer school in a field of robotics "Mesrob 2012" at the Technical University of Cluj-Napoca in Romania.

Field of scientific research of candidate includes imitation of human motions using high redundancy humanoid robots. She is author over 10 papers in scientific journals and at national and international conferences.

Some of Marija Tomić awards for the previous works and activities are:

- First prize at the international competition of student projects in fields of engineering - ICAMES in Istanbul (2011)
- The scholarship of the French government for bilateral doctoral studies between the University of Belgrade and the "Ecole Centrale de Nantes" in France (from 2012 to 2015)

1.2. Acquired scientific and research experience

Field of research of Marija Tomić is humanoid robotics, imitation of human motion and control of the redundant robotic systems.

Within these fields, Marija Tomić has participated in the following projects:

- IZ74Z0_137361/1: „Creative Alliance in Robotics Research and Education Focused on Medical and Service Robotics“, funded by the Swiss National Science Foundation (2012-2014.)
- TP-35003: “Ambient Intelligent Service Robots of Antropomorphic Characteristics“, funded by the Ministry of Education, Science and Technological Development of Republic of Serbia (2011-2016.)
- European research and development program HORIZON 2020, Coordination support activity project “Researchers’ night - FLIRT”, funded by the EU Commission (2014-2015.)

During PhD studies, she has passed 10 exams with an average score of 10.00:

	Title of the exam	Mark	ESPB
1	Multiple Target Tracking	10	9
2	Theory of Robotics Systems	10	9
3	Real-Time Systems	10	9
4	Automatic Guidance of Objects in Space	10	9
5	Intelligent Robotic Systems	10	9
6	Artificial intelligence	10	9
7	Optimal and Adaptive Stochastic Systems Control	10	9
8	Neural Networks	10	9
9	English language	10	6
10	Special Purpose Robotic Systems	10	9
	Title of the obligations		
1	Study research work I		15
2	Study research work II		15
3	Scientific-professional work		3

The results of the candidate Marija Tomić are shown through published papers as follows: 2 chapter of the monographs of the international importance, 7 papers published in the proceedings of international conferences and 5 papers published in the proceedings of national conferences.

Papers in the chapter of the monographs of the international importance (category M14):

1. **Tomić M.**, Vassallo Ch., Chevallereau Ch., Rodić A., Potkonjak V.: Arms motion of a humanoid inspired by human motion, - New Trends in Medical and Service Robotis, Springer, Vol 38, No 3, 2016, pp. 227-238. ISBN 978-3-319-05431-5, ISSN: 2211-0984, DOI: 10.1007/978-3-319-05431-5
2. Rodić A., Urukalo Đ., Vujović M., Spasojević, S., **Tomić M.**, Berns, K., Al-Darraj, S. and Zafar, Z.: Embodiment of Human Personality with EI-Robots by Mapping Behaviour Traits from Live-Model, - Advances in Robot Design and Intelligent Control (Springer), Vol 540, No 7, 2017, pp. 438-448. ISBN: 978-3-319-49058-8, DOI: 10.1007/978-3-319-49058-8_48

Papers in the proceedings of international conferences (category M33):

1. Potkonjak V., **Tomić M.**, Rodić A., Antoska V.: Human and Humanoid Motion - Distinguish Between Safe and Risky Mode of Locomotion, - IFAC Proceedings Volumes, Vol 45, No 22, 2012, pp. 524-529. <http://dx.doi.org/10.3182/20120905-3-HR-2030.00070>, ISBN: 978-3-902823-11-3
2. **Tomić M.**, Miloradović B., Janković M.: The algorithm for trajectory tracking using a combination of Neural Network and Genetic Algorithm, - 11th Symposium on Neural Network Applications in Electrical Engineering, Belgrade, Serbia, 2012, pp. 59-64, DOI:10.1109/NEUREL.2012.6419964, ISBN: 978-1-4673-1570-8
3. **Tomić M.**, Chevallereau Ch.: Conversion of Captured Human Motion to the Humanoid ROMEO for Human Imitation, - The 1st IcETRAN Conference, Vrnjačka Banja, Serbia, June, 2014. RO 2.3, ISBN 978-86-80509-70-9
4. **Tomić M.**, Vassallo Ch., Chevallereau Ch., Rodić A., Potkonjak V.: Arms motion of a humanoid inspired by human motion, - MESROB 2014, EPFL Lausanne, Switzerland, July, 2014.
5. **Tomić M.**, D. Katić, "Arms Dual-Arm Robot Tracking of the Moving Target Using the Algorithm of Inverse Kinematics", The 1st IcETRAN Conference, Vrnjačka Banja, Serbia, June, 2014. RO 1.3, ISBN 978-86-80509-70-9
6. **Tomić M.**, Rodić A., Urukalo Đ.: Solving Inverse Kinematics of Hyper-Redundant Multi-Links Flexible Robot- modeling and simulation, - The 2nd IcETRAN Conference, Srebrno jezero, Serbia, June, 2015, RO 1.3, ISBN 978-86-80509-70-9
7. Vujović M., Stevanović I., **Tomić M.**, Miloš M., Rodić A.: Mechanical design of robot head with ability to express emotional gestures, - The 2nd IcETRAN Conference, Srebrno jezero, Serbia, June, 2015, RO 3.5, ISBN 978-86-80509-70-9

Papers in the proceedings of national conferences (category M63):

1. **Tomić M.**, Chevallereau Ch.: The Circular motion of the Dual-Arms Robotics Manipulation Hands Inspired by Human Skill, - The 57th ETRAN Conference, Zlatibor, Serbia, June, 2013, RO 1.5, ISBN 978-86-80509-67-9
2. Miloradović B., **Tomić M.**, Popić S.: Primena veštačkih neuronskih mreža za rešavanje problema inverzne kinematike manipulatora sa pet stepeni slobode, - The 56th ETRAN Conference, Zlatibor, Serbia, June 2012, RO 1.8, ISBN 978-86-80509-67-9
3. **Tomić M.**, Janković M.: Solving inverse kinematics problem of ROBEO3 manipulator using genetic algorithms, - The 56th ETRAN Conference, Zlatibor, Srbija, June 2012, RO 1.6, ISBN 978-86-80509-67-9
4. Bascarević N., **Tomić M.**, Milosavljević P.: Symbiosis of programming languages Matlab and C++ for efficient robot simulation, - The 55th ETRAN Conference, Banja Vrucica, Bosnia and Herzegovina, June, 2011, RO 1.6 ISBN 978-86-80509-66-2
5. **Tomić M.**, Potkonjak V.: Čovečiji i čovekoliki hod razlike između safe i risky moda, - The 54th ETRAN Conference, Donji Milanovac, Serbia, June, 2010, RO 1.7, ISBN 978-86-80509-65-5

The candidate on 25.11.2016. at the School of Electrical Engineering in Belgrade, publicly and orally defended proposed topic of the doctoral thesis with the committee composed of:

1. Dr. Željko Đurović, full-time professor, University of Belgrade-School of the Electrical Engineering
2. Dr. Aleksandar Rodić, full Research Professor, Institute „Mihajlo Pupin“, University of Belgrade

3. Dr. Lazar Saranovac, associate professor, University of Belgrade-School of the Electrical Engineering

where the Committee concluded that the candidate has been rated as **satisfy** and fulfills the requirements for work on the proposed topic of the doctoral thesis.

1.3. Assessment of suitability of candidates to work on the proposed thesis topic

Based on the previous presentation of results of the work of the candidate Marija Tomić, the Committee agrees that the candidate has demonstrated the ability to work on the proposed thesis. According to the results, Marija Tomić demonstrated that she is the valuable and responsible candidate which has shown the ability to apply theoretical and practical knowledge successfully and present it to the scientific community. Through the participation in national and international projects and in the framework of their bilateral doctoral studies, Marija Tomić has acquired extensive knowledge in the field of robotics and, in addition, established contacts with leading domestic and foreign research institutions in the same area. Marija Tomić has completed all obligations in the context of doctoral studies: passed all the exams envisaged by the plan of the PhD studies and achieved 120 ESP points, publicly defended the proposed topic of the doctoral thesis in front of the Committee formed by the Teaching-scientific Council of School of the Electrical Engineering in Belgrade.

The proposed doctoral dissertation of the candidate Marija Tomić is in accordance with the doctoral program which she attends and is associated with the results shown through published papers. The Committee, therefore, considers that Marija Tomić satisfies all requirements for work on the proposed topic.

2. Subject and goal of the research

In recent years, the development of humanoid robotics is oriented towards the integration of robots in human environments and helping the human in his daily activities. Accordingly, the tendency is that through generations, humanoid robots increasingly take on the physical characteristics as well as the behavioral models of the human. Thanks to the development of biomechanics, medicine, physiology, robotics and neurophysiology, scientists have made a significant contribution to the modeling of the human body [1, 2]. However, humanoid robots still are far from having human characteristics. The human has around 206 bones connected to different types of elastic joints, a human motion is achieved with about 640 skeletal muscles. On the other hand, the humanoid robot has a rigid series of kinematic chains with rigid joints equipped with a limited number of sensors. Although simplified, a classic representation of humanoid robots with 7 degrees of freedom in the arm and 6 in the legs is sufficient for modeling the human body. Humanoid robot Romeo with these characteristics was used in our study [8].

In order to increase the acceptability of humanoid robots in human environments, humanoid robots must have "closely" human motion and/or inspired human skills. Since the humanoid robot has the redundant structures as a human, it is able to imitate human motion. Imitation of human motion can be achieved by a motion imitation process [3] or the imitation learning process. The imitation learning process aims to analyze the characteristics of human motion based on data obtained by recording human motions. On the other hand, the motion imitation process is based on imitation of the human motions without any analysis of the human motions characteristics. Our research is based on both approaches of the imitation of human motion.

Looking at the state of the art in the field of the imitation of human motion, we can see that the "Programming by Demonstration" is the most commonly used methods for transfer human motion into the motion of humanoids [11-13]. The imitation of human motion can also be solved using optimization algorithms on the dynamic and kinematic level. Imitation of the upper body human

motion using the dynamic equations and data obtained by motion capture system is analyzed in [4, 5]. The human motion imitation problem is solved on the kinematic level in [6, 7]. A method for transforming the recorded 3D position of markers into the trajectory of joints is proposed. The human body is modeled as a scaled model of the humanoids. Optimization techniques such as "B-spline wavelets" and "large-scale optimization" are used to generate the motion of joints. Algorithms presented in these papers are not able to achieve the imitation of human motion in real time. Thus our objective will be to propose a precise algorithm able to provide a joint evolution on line. Whatever the imitation process used, verification of the results of the imitation algorithm on a humanoid robot requires taking into account the properties of the robots such as limiting joint, working space robot ... Papers [9, 10] presented the most commonly used algorithms for calculation the workspace of the robot and generation of the robot motion into the joint limits of the robot. These algorithms are used in our research.

The process of studying the characteristics of human motion is linked to the process of the imitation human motion. Trajectories of human motion obtained by imitation algorithm are used to analyze the characteristics of human motion. During the motion, the human uses probably an optimal solution for the generation the motion, trying to minimize the criterion function which is unknown to us. Therefore, for the analysis of the characteristics of motion, the inverse optimization approaches can be used to find the criterion used. Unfortunately, the apparent criterion function that human minimizes during the motion may depend on the manner in which the motion is analyzed. In the field of biomechanics, criteria function that is most commonly used for the analysis of human motion is minimization of muscle effort [14]. In the field of robotics, minimization the moment in the joints is the most used criterion function [15]. During our research, we analyzed the influence of the individual criterion function on the human motion imitation [16]. Criteria functions are defined in the kinematic level, such as minimization of kinetic energy, minimization joint velocity, maximization manipulability and minimization deviations from the ergonomic position of the human.

Looking the ways in which human performs tasks, it is a logical understanding that human uses a combination of criteria functions instead of just one criterion. In the works [17, 18] imitation of human motion is presented as an optimization problem with the objective function that adjusts the weighted sum of criterion function: minimization of the total time, minimization of components of acceleration during motion, minimization of errors in orientation and direction during the motion to the goal. The goal of their research is to find the optimum combination of weight factors that would be able to describe any human motion. In the paper [19] the optimization algorithm based on inverse kinematics pseudo inverse is extended and minimization of deviations from the desired position of the hand and wrist were taken as criteria functions. In the presented optimization algorithms, criterion function is defined in task space. Analysis of the characteristics of human motion in joint space is presented in [20]. The combination of criterion function such as minimization displacement of the joints, minimization changes of potential energy and minimization discomfort is defined in the optimization algorithm. For each criterion function is proposed weighted factor which takes into account the influence of each joint on achieving motions. Contrarily to many studies, in the aim to use simple control law for the humanoid robot, the criterion tested will be defined essentially at velocity level (and not acceleration or torque level)

The research objectives will be organized into two connected parts: generation the algorithms for imitation recorded human motions in real time by humanoid robots; and development of optimization algorithms, such as inverse kinematics algorithm, for analysis the characteristics of human motion in order to transfer the human motion skills into the motion of the humanoid. In this study, dual-arm manipulation tasks will be analyzed that are less analyzed in literature. Each task consists of two phases: the phase of motion that involves contact between hands and equipment and phase of the motion without contact. The dual-arm manipulation tasks will be classified as translational and rotational motions, with an additional classification defined according to the relations position between the arms, proposed in the papers [21, 22]. Each of the motions will be carried out by 15 healthy subjects and recorded with the help of Vicon motion capture system.

In the first phase of the research, the algorithm for conversion of human motion to the motion of the humanoids will be defined. The algorithm will be based on tracking the markers physically placed on the human body with the virtual markers whose position is defined in a scaled model of the robot Romeo. The analytical approach to solving optimization problems will be used to define the imitation algorithm. The aim is to obtain an imitation algorithm which will be able to in real-time imitate the motion of a human. The imitation algorithm will convert human motion into the motion of the scaled model of the robot in the task and joint spaces. The obtained results will be used to generate motion of the robot Romeo during both phases of motion. The strategy of achieving contact between the robot arm and the equipment will be further analyzed.

The second phase of the research will aim to analyze the strategies of how to generate human motion. The common assumption of many optimization approaches is that during everyday tasks manipulation of human is trying to minimize unknown criteria. Accordingly, it will be necessary to define criteria that can describe the characteristics of human motion. Based on the defined criteria we will be able to achieve humanoid robot motion that contains the characteristics of human motion. The algorithm of inverse kinematics, as well as the most commonly used algorithm for generating motion of humanoid robots, can be used to imitate human motion which is the subject of this research. Based on the existing research results, the algorithm of inverse kinematics is not often used for analyzing the characteristics of human motion. The primary task of the inverse kinematics algorithm is tracking the desired trajectory of the robot end effector (in the case of dual-arm manipulation is the trajectories of the both hands). As optimization algorithm, inverse kinematics may further include a criterion function for optimization that can give the characteristics of human motion. We will take a combination of the basic criterion functions that are well known in process optimization in robotics, such as minimization of kinetic energy, minimization of joint velocity, increasing manipulability and minimization deviations from the ergonomic position of the human. Objective criteria function which will be used in the optimization algorithm will be defined as the sum of the basic criterion function with the weight coefficients which give priority to each of the criteria. This way, we want to understand and identify the optimal combination of criteria which will represent human motion and establish optimal control models that can be used to control the motion of the humanoid robot. This way, inverse kinematics algorithm for generation motion on the humanoid robot with the human skills have been defined. The resulting motion of the robot would be like a human motion which is one of the aims for better integration of robots in human environments. Also, our algorithm can find application in rehabilitation medicine. Obtained characteristics of the motion of the healthy people can be compared with the motion of the people with impairment of motor skills.

1. Köhler H., Pruzinec M., Feldmann T., Wörner A.: Automatic Human Model Parametrization from 3D Marker Data for Motion Recognition, - International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision, Plzen, Czech Republic, February 2008.
2. Kirk A. G., O'Brien J. F., Forsyth D. A.: Skeletal Parameter Estimation from Optical Motion Capture Data, - Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2005.
3. Do M., Azad P., Asfour T., Dillmann R.: Imitation of human motion on a humanoid robot using non-linear optimization, - In Humanoid Robots, 2008. Humanoids 2008. 8th IEEE-RAS International Conference on IEEE, Daejeon, Korea, 2008, pp. 545-552.
4. Ott C., Lee D., Nakamura Y.: Motion capture based human motion recognition and imitation by direct marker control, - Proceedings of IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, 2008, pp. 399-405.
5. Suleiman W. et al.: On human motion imitation by humanoid robot, - IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2008), Pasadena, California, USA, May 2008, pp. 2697-2704.
6. Ude A., Atkeson C., Riley M.: Programming full-body movements for humanoid robots by observation, Robot. Auton. Syst. (Elsevier), Vol. 47, No 2/3, 2004, pp. 93 -108.
7. Ude A., Man C., Riley M., Atkeson C.G.: Automatic Generation of Kinematic Models for the Conversion of Human Motion Capture Data into Humanoid Robot Motion, - In Proceeding of the First

- IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Georgia Institute of Technology), 2000, pp. 2223 -2228.
8. FUI national Romeo project: <http://projetromeo.com>
 9. Wenger Ph.: Performance Analysis of Robots, - Modeling, Performance Analysis and Control of Robot Manipulators. Wiley Online Library, 2010, pp. 141-183.
 10. Baerlocher, P., Boulic, R.: An inverse kinematics architecture enforcing an arbitrary number of strict priority levels, - The visual computer, Vol. 20, No 6, 2004, pp. 402-417.
 11. Calinon S., Guenter F., Billard, A: Goal-directed imitation in a humanoid robot, - In Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005, pp. 299-304.
 12. Calinon S., Billard A.: Stochastic gesture production and recognition model for a humanoid robot, - Proceedings. 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vol. 3, 2004, pp. 2769-2774.
 13. Calinon S., Billard A.: Incremental learning of gestures by imitation in a humanoid robot, - In Proceedings of the ACM/IEEE international conference on Human-robot interaction, 2007, pp. 255-262.
 14. Khatib O. et al.: Robotics-based synthesis of human motion,- Journal of Physiology-Paris, Vol. 103, No 3, 2009, pp. 211-219.
 15. Zheng Y., Yamane K.: Human motion tracking control with strict contact force constraints for floating-base humanoid robots,- 13th IEEE-RAS International Conference Humanoid Robots (Humanoids), 2013, pp. 34-41.
 16. Tomić M., Vassallo Ch., Chevallereau Ch., Rodić A., Potkonjak V.: Arms motion of a humanoid inspired by human motion, - New Trends in Medical and Service Robotis (Springer), Vol. 38, No 3, 2016, pp. 227-238.
 17. Mombaur K., Laumond JP., Yoshida E.: An optimal control model unifying holonomic and nonholonomic walking, - 8th IEEE-RAS International Conference Humanoid Robots, 2008, pp. 646-653.
 18. Mombaur K., Truong A., Laumond JP.: From human to humanoid locomotion—an inverse optimal control approach, - Autonomous robots (Springer), Vol 28, No 3, 2010, pp. 369-383.
 19. Billard A. G., Calinon S., Guenter F.: Discriminative and adaptive imitation in uni-manual and bi-manual tasks, - Robotics and Autonomous Systems(Elsevier), Vol 54, No 5, 2006, pp. 370-384.
 20. Yang J., Marler R. T., and Kim HJ., Arora J., Abdel-Malek K.: Multi-objective optimization for upper body posture prediction, - 10th AIAA/ISSMO multidisciplinary analysis and optimization conference, Vol 30, 2004.
 21. Zöllner R., Asfour T. Dillmann R.: Programming by demonstration: dual-arm manipulation tasks for humanoid robots, - IROS, 2004, pp.479-484.
 22. Krüger J., Schreck G., Surdilovic D.: Dual arm robot for flexible and cooperative assembly, - CIRP Annals-Manufacturing Technology (Elsevier), Vol 60, No 1, 2011, pp. 5-8.

3. The starting hypothesis

The starting hypotheses of the PhD theses are based on the next assumption:

- Imitation of human motion is important in order to achieve a natural interaction between human and robot, providing help in everyday tasks to the elderly and the disabled, in the physical therapy for children, and helping humans in low-level industrial tasks in the unsafe areas [1- 3].
- Each human motion can be represented as the result of an optimization process [4] and the combination of the basic criteria function using the inverse kinematics algorithm [5].
- The human usually chooses one specific strategy to generate the same motion into different environments and constraints [6, 7].
- The choice of the criterion which human uses can be modified by environmental characteristics like the size of the human with respect to the constraint of contact with the environment, a distance between the human and the environment...[8]
- The generated strategy obtained for human motion will be able to generate the best imitation of the analysed human motion with the high redundant humanoid robot [9].

1. Ayusawa K., Morisawa M., Yoshida E.: Motion retargeting for humanoid robots based on identification to preserve and reproduce human motion features,- IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2015, pp. 2774-2779.
2. Borovac B., Gnjatović M., Savić S., Raković M., Nikolić M.: Human-like Robot MARKO in the Rehabilitation of Children with Cerebral Palsy, - New Trends in Medical and Service Robots, 2016, pp. 191-203.
3. Yokoyama K. et al.: Cooperative works by a human and a humanoid robot, - IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 3, 2003, pp. 2985-2991.
4. Ude A., Atkeson C., Riley M.: Programming full-body movements for humanoid robots by observation, Robot. Auton. Syst. (Elsevier), Vol.47 No 2/3, 2004, pp. 93 -108.
5. Billard A.G., Calinon S., Guenter F.: Discriminative and adaptive imitation in uni-manual and bi-manual tasks, - Robotics and Autonomous Systems (Elsevier), Vol. 54, No 5, 2006, pp. 370-384.
6. Lardy J., Beurier G., Wang X.: Effects of rotation amplitude on arm movement when rotating a spherical object, - Ergonomics (Taylor & Francis), Vol. 55, No 12, 2012, pp. 1524-1534.
7. Potkonjak V., Popović, M., Lazarević, M., Sinanović J.: Redundancy problem in writing: from human to anthropomorphic robot arm, - IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, Vol. 28, No 6, 1998, pp. 790-805.
8. Mombaur K., Laumond JP., Yoshida E.: An optimal control model unifying holonomic and nonholonomic walking, - 8th IEEE-RAS International Conference on Humanoids, 2008, pp. 646-653.
9. Mombaur K., Truong A., Laumond JP.: From human to humanoid locomotion—an inverse optimal control approach, - Autonomous robots, Vol. 28, No 3, 2010, pp. 369-383.

4. Research methods

Methodology that will be used in the doctoral thesis begins with a systematic analysis of available algorithms for the imitation of the human motion and the optimization algorithms for analysis of the characteristics of human motions with an emphasis on imitation and analysis of dual-arm manipulation with and without contact with the equipment. The first phase of the research will be based on recording the different types of the basic dual-arm motion performed by 15 actors within the same conditions in the virtual environment. For the purposes of our study, we have chosen Vicon motion capture system that provides information on the motion of the physically placed markers on the human body. For the representation of the kinematic model of the human body, the scaled model of the humanoid robot Romeo will be used. According to the available techniques, we will improve the existing algorithm for imitation human motion by using simultaneously recorded marker motion and calculated joint motion of the actor with the aim to increase the precision of the imitation. The precise imitation of the motion is very important for performing dual-arm manipulation tasks with a contact with the equipment. The imitation algorithm will be tested on the humanoid robot Romeo for real time imitation of the human motion in the task with and without contact between hands and equipment. In the second phase of the research, we will analyze the existing criteria function which is often used in the optimization algorithm in the field of the robotics at a kinematic level. We will adapt the basic form of the inverse kinematics algorithm in order to include the criteria function such as minimization of the kinetic energy, minimization of the norm of joint velocities, minimization of the distance between the current position and the ergonomic configuration of the human and keeping the arm away from the singularity (maximization manipulability). The Lagrange multiplier will be used for the formulation the inverse kinematics algorithm with the optimization term which is a weighted combination of the criteria functions. The characteristics of the human motion will be analyzed according to the values of the weighted coefficients of each criterion. Imitation of the recorded motion with the humanoid robot Romeo will be done using the inverse kinematics algorithm and combination of the criteria functions defined with the method below.

5. Expected scientific contributions

Expected scientific contributions of the doctoral thesis are:

- The improvement of existing imitation algorithm, by taking into account of information

provided by the marker on the human body and exploitation of evaluated joint frames, with the aim to increase the accuracy of the imitation.

- Exploring the characteristics of the basic dual arm human motion which in combination can be used for generation of complex dual arm tasks.
- Analyzing the human motion only in the kinematics level without taking into account the dynamics of the motion to propose simple control strategy easy to implement on a humanoid robot.
- Using the inverse kinematics algorithm, which consists of the weighted combination of several criteria function, for analyzing the characteristics of human motion.
- Implementing explored characteristics of human motion on the humanoid in order to adapt humanoid for cooperation with a human in the cooperative task, for helping elderly persons in everyday life, for better integration the humanoid robots in the human environment.
- Analysis of the differences of human motion characteristics into joint space of the same motions in task space.
- Analysis the characteristics of the motion depending on the characteristics of the human (age, gender, physical conditions, body dimension...)

Expected contribution in terms of improving engineering practices would be reflected in the establishment of easier integration of robots in human environments in performing everyday tasks; analysis of human motion with impaired motor skills compared with the characteristics of motion of healthy people; replacing humans in performing dual-arm manipulation tasks in environments dangerous for human life (with a high level of radiation, high temperatures ...).

6. Research plan and the structure of the work

The research plan consists of two phases.

First phase: Imitation of the human motion – experimentally recording the human motions and extracting the characteristics of those motions using the imitation algorithm

- Analysing the basic motion of the dual-arm manipulation tasks and their classification into different groups according to their common characteristics (translational or rotational, asymmetrical or symmetrical motions of the hands...).
- Analysing the existing algorithms for imitation human motion.
- Analysing the corresponding kinematic model of a humanoid robot that can be used as a simplified model of the human body in imitation algorithm.
- Scaling kinematic model of the humanoid robot Romeo to the dimensions of each actor based on estimated dimensions of actors body segments.
- Development of the imitation algorithm based on the analytical approach for realizing imitation of human motion in real time using a scaled model of the robot Romeo and data obtained from the motion capture system.
- Testing the developed imitation algorithm on the set dual-arm motions with different characteristics.
- Comparative analysis of developed and existing imitation algorithms.
- Testing the results obtained from the developed imitation algorithm for the generation the same motions with the robot Romeo into the human environment.

Second phase: Analyze the human motion behavior skills using the inverse kinematics algorithm as the optimization approach

- Analysing the state of the art in the field of analysis of human motion using optimization algorithms.
- Defining criteria functions for presenting the characteristics of human motion at the kinematic level.
- Development of inverse kinematics algorithm as an optimization method with a combination of four weighted criteria functions for analysis of the characteristics of human motion.

- Evaluation of the weight coefficients using the Genetic algorithm.
- Testing the developed algorithm of inverse kinematics on the set of seven dual-arm manipulation tasks each carried out by fifteen actors.
- Analysis of human motion strategies based on the obtained values of weight coefficients.
- Analysis of the environmental impact and performances of actors on the strategy of execution motion based on the value of weight coefficients.
- Testing the developed algorithm of the inverse kinematics with the calculated combination of the criterion function for executing the same task on the robot Romeo.

7. Conclusion and proposal

Based on all of the aforementioned, the Committee considers that Marija M. Tomić, MSc EE., fulfills all the conditions for the development of doctoral dissertation and confirms the scientific basis of the proposed topic **“Dual-Arms Robotic Manipulation Inspired by Human Skill” (srb „Дворучна роботска манипулација инспирисана људским вештинама“)**. We suggest approving the writing of a doctoral dissertation in the English language.

The proposed topic of the doctoral thesis within the PhD study program at the School of Electrical Engineering in Belgrade and „Ecole Centrale de Nantes“, where the candidate is inscribed and includes current research in the field of humanoid robotics - modeling and control of robots.

We underline that the PhD study of the candidate Marija Tomić realized in the framework of the bilateral PhD program between the School of Electrical Engineering and the Faculty “Ecole Centrale de Nantes” in Nantes, France. According to this, we suggest for mentors Dr. Christine Chevallereau, a Research Director from CNRS affected into “Ecole Centrale de Nantes” in Nantes, France, and Dr. Kosta Jovanović, Assistant Professor at the School of Electrical Engineering, University of Belgrade.

Belgrade, 26. January 2017.

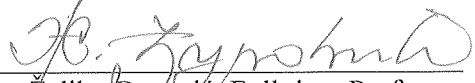
COMMITTEE MEMBERS



Dr. Kosta Jovanović, Assistant Professor
University of Belgrade-School of Electrical Engineering



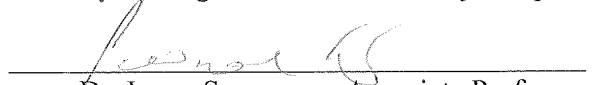
Dr. Christine Chevallereau, CNRS Research Director
Ecole Centrale de Nantes, France



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



Dr. Aleksandar Rodić, Full Research Professor
University of Belgrade-Institute "Mihajlo Pupin"



Dr. Lazar Saranovac, Associate Professor
University of Belgrade-School of the Electrical Engineering