

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Марије Томић

Одлуком Наставно-научног већа бр. 5006/11-3 од 17.04.2018. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Марије Томић под насловом

"Дворучна роботска манипулација инспирисана људским вештинама "

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

Кандидаткиња је тему докторске дисертације под називом „Дворучна роботска манипулација инспирисана људским вештинама“ пријавила Комисији за студије трећег степена на Електротехничком факултету, Универзитета у Београду, 03.11.2016. године и за менторе предложила др Косту Јовановића, доцента, и др Christine Chevallereau, научну директорку, у складу са билатералним програмом докторских студија између Електротехничког факултета, Универзитета у Београду и *École centrale de Nantes*.

Комисија за студије трећег степена разматрала је, на својој седници одржаној 08.11.2016. године, предлог теме за израду докторске дисертације и упутила предлог Комисије о оцени подобности теме и кандидата Наставно-научном већу на усвајање.

Наставно-научно веће Електротехничког факултета, на својој седници одржаној 15.11.2016. године (број одлуке 5006/11-1 од 24.11.2016), именовало је Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације у саставу:

- др Жељко Ђуровић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,
- др Лазар Сарановац, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,
- др Александар Родић, научни саветник, Универзитет у Београду - Институт Михајло Пупин.

На седници Наставно-научног већа Електротехничког факултета, одржаној 14.02.2017. године, усвојен је извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације (број одлуке 5006/11-2 од 14.02.2017).

Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду је на седници одржаној 27.02.2017. године дало сагласност на предлог теме докторске дисертације под насловом „Дворучна роботска манипулација инспирисана људским вештинама“ (број одлуке 61206-872/2-17 од 27.02.2017. године).

Кандидаткиња је предала докторску дисертацију на преглед и оцену 04.04.2018. године. Комисија за студије трећег степена потврдила је на својој седници одржаној 10.04.2018. године испуњеност потребних услова за подношење предлога Наставно-научном већу Електротехничког факултета за формирање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације.

Наставно-научно веће Факултета је на својој седници одржаној 17.04.2018. године именovalo Комисију за преглед и оцену докторске дисертације у саставу (број одлуке 5006/11-3):

- др Коста Јовановић, доцент, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,
- dr Christine Chevallereau, научни директор, *CNRS, Laboratoire des Sciences du Numérique de Nantes - LS2N*, Француска,
- др Жељко Ђуровић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,
- др Александар Родић, научни саветник, Универзитет у Београду - Институт Михајло Пупин,
- dr Yannick Aoustin, редовни професор, *Université de Nantes*, Француска,
- dr Philippe Fraisse, редовни професор, *Université de Montpellier*, Француска.

Кандидаткиња је започела докторске студије школске 2011/2012. године у пролећном семестру. На основу одлуке Наставно-научног већа бр. 545/2 од 13.3.2012. године, Студијски програм је започео у пролећном семестру школске 2011/2012, па се рок за завршетак докторских академских студија рачуна од почетка тог семестра, сагласно Статуту Универзитета у Београду и Статуту Електротехничког факултета.

По истеку законског рока за завршетак докторских академских студија, на захтев студента, одобрено је продужење рока за завршетак ових студија за још два семестра, сагласно Статуту Универзитета у Београду.

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација припада техничким наукама и ужим научним областима роботика, и управљане системима, за које су Електротехнички факултет Универзитета у Београду и *École centrale de Nantes* матични. Ментор докторског рада са Електротехничког факултета Универзитета у Београду, др Коста Јовановић је изабран у звање доцента за ужу научну област аутоматика. Др Christine Chevallereau, ментор са *École centrale de Nantes*, је научна директорка CNRS и заменица директора лабораторије LS2N (*Laboratoire des Sciences du Numérique de Nantes*). Оба ментора су аутори великог броја научних радова у истакнутим међународним часописима.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Марија Томић је рођена 14.07.1987. године у Ужицу. Основну школу и Гимназију завршила је у Ужицу. Електротехнички факултет у Београду уписала је 2006/2007. школске године на Одсеку за сигнале и системе. 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, и мастер радом под насловом „Моделирање и управљање координисаном дворучном манипулацијом сервисног робота антропоморфне структуре“. Докторске студије је уписала 2011/2012. школске године на Електротехничком факултету у Београду, Модул управљање системима и обрада сигнала. Наредне године осваја стипендију Владе Републике Француске за докторске студије у Француској и свој докторат наставља као билатерални докторски програм између Електротехничког факултета у Београду и *École centrale de Nantes* у Нанту у Француској. Током докторских студија на Електротехничком факултету положила је десет испита са просечном оценом 10.00 и слушала више курсева из области роботике на *École 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 LS2N факултета *École centrale de Nantes* у тиму „Team Robotics“ као студент докторских студија. У истом периоду на факултету *École centrale de Nantes* пратила је курсеве мастер програма из области роботике „EMARO+“.

До сада је учествовала у једном националном пројекту (ТР-35003: „Истраживање и развој амбијентално интелигентних сервисних робота антропоморфних карактеристика“, пројекат Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије, 2011.-2018. године) и два међународна пројекта (IZ74Z0_137361/1: „*Creative Alliance in Robotics Research and Education Focused on Medical and Service Robotics*“, финансиран од стране Швајцарске националне фондације за науку - *Swiss National Science Foundation*, 2012.-2014. године, и пројекта HORIZON 2020, *Coordination support activity project „Researchers' night - FLIRT”*, 2014.-2015. године).

Област научног истраживања кандидаткиње обухвата управљање хуманоидним роботима велике редунаности и имитацију људских покрета помоћу хуманоидних робота. Досадашњи резултати кандидаткиње Марије Томић су приказани кроз публиковане радове и то: 2 рада у међународним часописима, 3 поглавља у књигама, 7 радова штампаних у зборницима међународних научних скупова и 5 радова штампаних у зборницима научних скупова од националног значаја.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Дисертација под насловом „Дворучна роботска манипулација инспирисана људским вештинама“ написана је на 143 стране на енглеском језику, у складу са билатералним докторским уговором са *École centrale de Nantes*. Дисертација је организована у шест

поглавља: 1. Увод; 2. Преглед стања у области; 3. Конверзија људског покрета на кретање хуманоидног робота за задатке дворучне манипулације; 4. Дворучна манипулација инспирисана људским вештинама; 5. Алгоритам фази логике за анализу карактеристика људског кретања; 6. Закључак. На почетку дисертације дати су Сажетци тезе на енглеском, француском и српском језику, Захвалница, Листа табела, Листа слика и Садржај. Након последњег поглавља дат је списак коришћене литературе са референцама наведених по абecedном редоследу презимена аутора, прилог Информације о моторима робота ROMEO, прилог Nanavan модел људског тела, прилог Кватерниони, прилог Модификовани DH параметри за робота ROMEO и Биографија кандидата.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У уводном поглављу тезе представљена је мотивација за истраживање имитације људских покрета са хуманоидним роботима. Главни циљ имитације људских покрета је лакша интеграција хуманоидних робота у људско окружење и помоћ људима у свакодневним активностима. У циљу интеграције робота у људско окружење, роботи морају да буду налик човеку и да имају покрете сличне људском кретању. Пошто хуманоидни роботи имају редундантну структуру тела као и човек, задатак имитације људског кретања са роботом је могућ. Процеси имитације људских покрета и имитација учењем покрета представљају основне стратегије имитације. Процес имитација покрета се заснива на понављању истог покрета са роботом без претходне анализе покрета, док имитација учењем покрета обухвата анализу основних карактеристика људског кретања. У дисертацији су дефинисани алгоритми за имитацију људског покрета са хуманоидним роботом коришћењем оба приступа. Постојећи процеси имитације покрета су анализирани и унапређени са циљем да омогуће имитацију покрета на кинематском нивоу, у реалном времену и са великом прецизношћу. Процес имитације учењем покрета је у наставку коришћен за дефинисање карактеристика људског кретања и њихово преношење на покрете робота. Чињеница да човек извршава покрет на оптималан начин минимизацијом непознатих критеријумских функција мотивисала нас је да људски покрет представимо као оптимизациони процес. Критеријумске функције које су минимизирани оптимизационим алгоритмом представљају основне критеријумске функције коришћене за управљање роботима као што су: минимизација кинетичке енергије, минимизације брзине у зглобовима, минимизација одступања тренутне позиције човека од ергономичне и максимизација манипулабилности. Људско кретање је изучавано као оптимална комбинација наведених критеријумских функција. Инверзни оптимизациони алгоритам дефинисан оптималном комбинацијом критеријумских функција је представљен као метод за анализу карактеристика људских покрета. Добијене карактеристике људских покрета на кинематском нивоу су пренете на кретање хуманоидног робота. Изведени закључци о људским покретима су коришћени за дефинисање фази алгоритма за израчунавање оптималне комбинације критеријумских функција било ког покрета. На крају уводног поглавља су таксативно наведени доприноси представљеног истраживања у тези и дата је структура осталих поглавља са кратким описом.

Друго поглавље представља преглед стања у области и описује релевантне студије за истраживање обухваћено докторском дисертацијом. У првом делу овог поглавља представљени је историјат развоја хуманоидне роботике. Карактеристике хуманоидних робота су упоређиване са карактеристикама човека. Посебан нагласак је дат на упоредном приказу кинематске структуре хуманоидних робота и сличности са кинематском структуром човека. У другом делу поглавља је дат преглед стања у области анализе људског кретања. На почетку је дата дефиниција људског покрета и историјат развоја уређаја за њихово снимање и анализу. У зависности од области науке која изучава кретање човека, различите карактеристике покрета су представљене. Пошто хуманоидна роботика има за циљ

имитацију људског кретања, у наставку су представљени процеси имитације људских покрета. Имитација људских покрета може бити дефинисана у простору спољашњих координата (Картезијанском простору) или у простору унутрашњих координата (зглобова човека/робота). Имитација покрета у простору спољашњих координата даје чисту имитацију људских покрета без анализа карактеристика кретања. Имитација у простору унутрашњих координата има за циљ праћење кретања свих степени слободе у зглобовима и омогућава анализу карактеристика људских покрета. Сходно томе су приказани постојећи алгоритми за имитацију и анализу људских покрета. Такође је дат осврт на анализу људских покрета коришћењем оптимизационог приступа који је и предмет истраживања у тези. У трећем делу поглавља је анализирана стратегија коју човек користи за генерисање покрета. Анализа активације сваког од зглобова током покрета је један од основних стратегија генерисања покрета. Зглобови који имају већу ефективну инерцију генеришу глатке и велике покрете док зглобови са малом инерцијом генеришу брзо и прецизно кретање. На основу ових закључака у литератури су представљени оптимизациони алгоритми који дају ове карактеристике покрета. Такође, ниво комфорности човека током кретања представља карактеристику људских покрета. Анализа комфора човека током кретања широко је истраживана у ергономији, биомеханици и роботизи. Осврт на постојеће технике анализе комфора је дат у овом поглављу и предложен је метод који је коришћен у нашем истраживању. Изводљивост покрета је представљена као последња карактеристика људског кретања која је анализирана у тези.

У трећем поглављу је представљен процес конверзије покрета човека у покрет хуманоидног робота за задатак дворучне манипулације. Конверзиони процес се састоји из четири корака. Први корак представља анализу и снимање основних покрета дворучне манипулације. Покрети дворучне манипулације анализирани у тези су: „Одвртање вентила“, „Веслање“, „Надување душека са ручном пумпом“, „Отварање/затварање фиоке“, „Окретање волана“, „Сечење са ножем“ и „Рендање хране“. Сваки покрет је детаљно анализира и одабран са циљем да представља основан покрет дворучне манипулације. Покрети су изабрани према оси ротације и међусобном односу руку, по класификацији представљеној у литератури. Сваки од анализираних покрета се састоји од фазе у којој руке и опрема нису у контакту и од фазе у којој је контакт подразумеван. Карактеристике различитих система за снимање људских покрета су анализиране али је систем заснован на маркерима детаљно описан и коришћен у овом истраживању. У другом кораку конверзије кинематски модел робота ROMEO је коришћен за представљање кинематског модела човека. Представљен је и процес скалирања кинематског модела робота на модел човека. Дужина сегмената човека су естимиране за сваког актера и укључене у кинематски модел робота. Разлике између кинематског модела робота и човека и немоделирана кинематика је додатно анализирана са циљем да се укаже на потенцијална ограничења имитационог алгоритма. Трећи корак конверзије представља имитациони процес који има за циљ да генерише кретање робота у простору унутрашњих и спољашњих координата на основу информација о људском покрету добијених уз помоћ система за снимање покрета. Имитациони процес се заснива на праћењу кретања маркера посатвљених на тело актера (реални маркери) са маркерима дефинисаних на скалираном моделу робота ROMEO (виртуелни маркери). У процесу иницијализације скалирани модел робота је постављен у иницијалну позицију актера (актер стоји право са рукама хоризонтално испруженим испред) и позиције виртуелних маркера су дефинисане тако да се поклапају са позицијама реалних маркера. Процес иницијализације је остварен дефинисањем иницијализационог алгоритма. У наставку је дефинисан нумерички и аналитички модел имитационог процеса. Оба модела имају за циљ да минимизирају критеријумску функцију која представља разлику у 3Д позицији реалних и виртуелних маркера и разлику у 3Д естимираној позицији зглобова руку актера и скалираног модела робота. Нумерички модел је дефинисан као оптимизациони алгоритам који израчунава генерисане координате свих зглобова скалираног модела робота коришћењем

MATLAB fmincon solver са active-set функцијом која се заснива на методи секвенцијалног квадратног програмирања (SQP). Аналитички модел је заснован на инкременталном израчунавању вредности генералисаних координата коришћењем Јакобијеве матрице. Тренутна 3Д позиција и оријентација виртуелних маркера и зглобова робота као и вредности генералисаних координата су израчунате на основу њихових претходних вредности и вредности Јакобијевих матрица. Резултати добијени нумеричким и аналитичким приступима су упоређени са резултатом сличног имитационог алгоритма објашњеног у литератури. Компаративна анализа је показала да алгоритми развијени у овој тези дају неупоредиво боље резултате у праћењу позиције и оријентације зглобова руку у поређењу са сличним постојећим алгоритмом. Резултати добијени нашим имитационим алгоритмом дају велику прецизност у имитацији и могу се користити за дефинисање трајекторије руку робота за задатке са и без контакта између руку и опреме. Четврти и последњи корак конверзионог процеса се односи да генерисање покрета хуманоидног робота на основу добијених информација о кретању актера израчунатих уз помоћ имитационог алгоритма. Добијено кретање актера не може бити директно коришћено за генерисање истог покрета на роботу због величине робота и ограничења у кретању зглобова. У овом делу тезе дефинисана су два алгоритма инверзне кинематике за генерисање кретања робота. Оба алгоритма користе информације о људском покрету добијених у простору унутрашњих и спољашњих координата. Први алгоритам је дефинисан за део покрета који не обухвата контакт руку и опреме, док је други алгоритам дефинисан за део покрета где је контакт обавезан. Стратегија прелажења са једне фазе покрета у другу је објашњена. На крају овог поглавља је дата експериментална валидација резултата. Имитација покрета „Отварање/затварање фиоке“ је генерисана на роботу ROMEO-у.

Четврто поглавље представља начин на који карактеристике људских покрета могу бити анализиране. Ми смо пошли од претпоставке да људско кретање представља оптимизациони процес. Стога смо дефинисали оптимизационе алгоритме које анализирају људско кретање на кинематском нивоу. Сет критеријумских функција је дефинисан за анализу људских покрета: минимизација кинетичке енергије, минимизације брзине у зглобовима, минимизација одступања тренутне позиције човека од ергономичне и максимизација манипулабилности. На самом почетку истраживања карактеристике људског кретања представили смо коришћењем познатог управљачког алгоритма у роботизи - алгоритма инверзне кинематике. Свака критеријумска функција је појединачно укључена у алгоритам инверзне кинематике. Дошли смо до закључака која од критеријумских функција најбоље описује сваки од покрета. Са циљем да извршимо прецизнију анализу људских покрета, комбинација наведених критеријумских функција је разматрана. Инверзни оптимални алгоритам управљања који минимизира тежинску комбинацију свих критеријума је представљен. Свакој критеријумској функцији је додељен тежински коефицијент који показује колико је критеријум доминантан у анализираном покрету. За израчунавање вредности тежинских коефицијената дефинисан је генетски алгоритам. На основу добијених вредности тежинских коефицијената изведени су закључци о сваком покрету. На крају је представљена стратегија генерисања људских покрета у зависности од типа покрета, карактеристика човека и окружења. Експериментална валидација резултата добијених са алгоритмом инверзне кинематике са појединачним критеријумима и са инверзним оптималним алгоритмом управљања са оптималном комбинацијом критеријумских функција је извршена на роботу ROMEO-у.

Циљ петог поглавља је да повеже добијене закључке о карактеристикама људског кретања и да дефинише метод за њихову анализу коришћењем алгоритама вештачке интелигенције. Алгоритам фази логике је дефинисан на основу добијене анализе о карактеристикама људског покрета представљених у поглављима 3 и 4. Генералне карактеристике људских покрета су коришћене као експертско знање за дефинисање фази

правила. Алгоритам фази логики је обучаван на скупу свих анализираних покрета који су рађени од стране свих актера. Тестирање фази алгоритма је вршено на новом покрету који није био претходно анализиран. Карактеристике новог покрета добијене са фази алгоритмом су упоређене са резултатима накнадно израчунатим уз помоћ оптимизационог и генетског алгоритма.

У последњем, шестом поглављу сумирани су остварени научни доприноси и резултати, након чега су предложени даљи правци истраживања.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Интеграција робота у људско окружење је веома актуелна тема последњих година. Интензиван развој технологије довео је до софистициранијих модела хуманоидних робота које поред људског изгледа поседују и сензоре које oponашају људска чула и системе који oponашају људско понашање. Иако постоје хуманоидни роботи који су налик човеку, интеграција робота у људско окружење није у великој мери заживела. Један од разлога је то што поред изгледа робот треба да поседује и карактеристике људског кретања, резоновања, емоционалне интелигенције,... Савременост ове докторске дисертације се огледа у анализу стратегије човека за генерисање покрета и применом истих стратегија за генерисање истих покрета са хуманоидним роботима. Имитација људских покрета је доста анализирана у досадашњој литератури. Најчешће коришћен метод је програмирање кретања робота на основу демонстрације покрета (енг. *programming by demonstration*). Овај метод се заснива на показивању покрета робота који путем својих сензора покушава да генерише исти покрет без анализе карактеристика покрета. Овај приступ је веома ефикасан за имитацију великог опсега покрета који подразумевају непрецизно позиционирање зглобова робота. Значајан допринос дисертације се односи на анализу и имитацију покрета дворучне манипулације човека. Ова врста покрета је мало изучавана у литератури. Анализирани покрети дворучне манипулације се састоје од фаза са и без контакта између шака и опреме. Имитација покрета без контакта је једноставно остварљива са постојећим имитационим алгоритмима. Имитација покрета са контактом захтева велику прецизност имитације и није лако остварљива. У дисертацији су предложени алгоритми који са великом прецизношћу имитирају анализирани покрете и генеришу кретање робота које може да оствари интеракцију робота са околином. Такође, кинематски и динамички параметри покрета као што су дистрибуција покрета кроз зглобове, анализа утrophка енергије, активација мишића итд. нису анализирани и интегрисани у кретање робот. Стога је било потребно дефинисати нове методе које анализирају карактеристике покрета и на основу њих генеришу покрет робота налик људском кретању. Оригиналност ове докторске дисертације почива на анализи карактеристика људских покрета и дефинисање математичког алата који ове карактеристике пресликава на кретање робота. Једна од разлика ове тезе у односу на остале студије је анализа кретања човека у простору унутрашњих координата на кинематском нивоу. Анализа је извршена коришћењем основних критеријумских функција дефинисаних у простору унутрашњих координата које се користе као стандардне за генерисање покрета робота. На овај начин је омогућена лака примена анализираних карактеристика људског кретања на генерисање истих покрета на роботу. Последње поглавље дисертације узима у обзир савремене алгоритме вештачке интелигенције и анализира њихове могућности за дефинисање карактеристика било ког покрета дворучне манипулације узимајући у обзир анализе карактеристика људског кретања.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У овој докторској дисертацији, анализирана литература је обимна и релевантна. Наведено је укупно 145 библиографских референци. Литература садржи радове релевантне за области истраживања у тези. Приказане референце дају комплетну анализу тренутних достигнућа у представљеним областима. Списак литературе укључује и релевантне радове које је кандидаткиња публиковала као аутор или коаутор.

У дисертацији су анализирани основни покрети дворучне манипулације који су класификовани на основу међусобног односа између руку представљеног у радовима [1,2]. Кинематски модел робота ROMEO је коришћен за представљање кинематског модела човека коришћењем Denavit and Hartenberg нотације дате у раду [3]. Радови [4, 5] дају преглед имитационих процеса који се заснивају на имитацији претходно снимљених људских покрета. Имитациони процеси су дефинисани у Картезијанском и простору унутрашњих координата. Имитација кретања човека такође може бити извршена коришћењем оптимизационих алгоритама. У радовима [6-9] је дат приказ имитационих алгоритама представљених на кинематском и динамичком нивоу. У дисертацији је унапређен имитациони алгоритам представљен у радовима [8, 9] са циљем да се повећа прецизност имитације у Картезијанском простору на кинематском нивоу и да се омогући имитација људских покрета са и без контакта између руку и објеката у реалном времену. Пошто није могућа директна конверзија покрета човека на покрет робота због димензије и ограничења у кретању зглобова, алгоритми представљени у раду [10] су коришћени за прилагођавање добијеног покрета човека на покрет робота. На основу информација о људском покрету добијених уз помоћ имитационог алгоритма могуће је анализирати карактеристике људских покрета. У нашем раду [11] је представљена анализа карактеристика покрета коришћењем алгоритма инверзне кинематике и појединачних критеријумских функција. Људско кретање може бити окарактерисано као оптимизациони процес. Стога се карактеристике људског покрета могу анализирати коришћењем оптимизационог алгоритма и комбинације више критеријумских функција што је представљено у радовима [12-14]. Избор критеријумских функција је дефинисан на основу анализа карактеристика људских покрета. У радовима [14-16] је представљена анализа људских покрета посматрањем активације зглобова. Дефинисане су и критеријумске функције које описују утицај сваког зглоба на генерисање покрета. У радовима [14, 17] је анализиран ниво комфора човека током обављања покрета. Комфорност човека током обављања покрета је представљана на више начина: анализом сила у зглобовима [17] и анализом удаљености тренутне конфигурације човека од ергономичне конфигурације [14]. Други приступ, као и ергономична конфигурација човека представљена у раду [14], је коришћена у дисертацији. Остварљивост задатка манипулације је анализирана као последњи критеријум за описивање људских покрета. Манипулабилност представља меру изводљивости покрета, квалитативни однос тренутне човекове конфигурације и сингуларне конфигурације. Манипулабилност је први пут дефинисана у раду [18]. У раду [19] је представљена анализа манипулабилности робота на основу његовог радног простора, ограничења у зглобовима и међусобне колизије. Истраживања представљена у радовима [18, 19] су коришћена у дисертацији.

1. Krüger, J., Schreck, G., & Surdilovic, D. (2011). Dual arm robot for flexible and cooperative assembly. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 60(1), 5–8.
2. Zöllner, R., Asfour, T., & Dillmann, R. (2004). Programming by demonstration: dual-arm manipulation tasks for humanoid robots. In Iros (pp. 479–484).
3. Khalil, W., & Dombre, E. (2007). *Robot manipulators: modeling, performance analysis and control*. London, UK, ISTE Ltd.

4. Do, M., Azad, P., Asfour, T., & Dillmann, R. (2008). Imitation of human motion on a humanoid robot using non-linear optimization. In *Humanoid robots, 2008. humanoids 2008. 8th ieee-ras international conference on* (pp. 545–552).
5. Billard, A., Epars, Y., Calinon, S., Schaal, S., & Cheng, G. (2004). Discovering optimal imitation strategies. *Robotics and autonomous systems*, 47(2), 69–77.
6. Ott, C., Lee, D., & Nakamura, Y. (2008). Motion capture based human motion recognition and imitation by direct marker control. In *Humanoid robots, 2008. humanoids 2008. 8th ieee-ras international conference on* (pp. 399–405).
7. Suleiman, W., Yoshida, E., Kanehiro, F., Laumond, J.-P., & Monin, A. (2008). On human motion imitation by humanoid robot. In *Robotics and automation, 2008. icra 2008. ieee international conference on* (pp. 2697–2704).
8. Ude, A., Atkeson, C. G., & Riley, M. (2004). Programming full-body movements for humanoid robots by observation. *Robotics and autonomous systems*, 47(2), 93–108.
9. Ude, A., Man, C., Riley, M., & Atkeson, C. G. (2000). Automatic generation of kinematic models for the conversion of human motion capture data into humanoid robot motion (Tech. Rep.). Georgia Institute of Technology.
10. Baerlocher, P., & Boulic, R. (2004). An inverse kinematics architecture enforcing an arbitrary number of strict priority levels. *The visual computer*, 20(6), 402–417.
11. Tomic, M., Vassallo, C., Chevallereau, C., Rodic, A., & Potkonjak, V. (2016). Arm motions of a humanoid inspired by human motion. In *New trends in medical and service robots* (pp. 227–238). Springer.
12. Mombaur, K., Laumond, J.-P., & Yoshida, E. (2008). An optimal control model unifying holonomic and nonholonomic walking. In *Humanoid robots, 2008. humanoids 2008. 8th ieee-ras international conference on* (pp. 646–653).
13. Mombaur, K., Truong, A., & Laumond, J.-P. (2010). From human to humanoid locomotion—an inverse optimal control approach. *Autonomous robots*, 28(3), 369–383.
14. Yang, J., Marler, R. T., Kim, H., Arora, J., & Abdel-Malek, K. (2004). Multi-objective optimization for upper body posture prediction. In *10th aiaa/issmo multidisciplinary analysis and optimization conference* (Vol. 30).
15. Potkonjak, V., Popovic, M., Lazarevic, M., & Sinanovic, J. (1998). Redundancy problem in writing: from human to anthropomorphic robot arm. *Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on*, 28(6), 790–805.
16. Liu, C. K., Hertzmann, A., & Popovic, Z. (2005). Learning physics-based motion style with nonlinear inverse optimization. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 24(3), 1071–1081.
17. Yang, F., Ding, L., Yang, C., & Yuan, X. (2005). An algorithm for simulating human arm movement considering the comfort level. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 13(5), 437–449.
18. Yoshikawa, T. (1984). Analysis and control of robot manipulators with redundancy. In *Robotics research: the first international symposium* (pp. 735–747).
19. Vahrenkamp, N., Asfour, T., Metta, G., Sandini, G., & Dillmann, R. (2012). Manipulability analysis. In *2012 12th ieee-ras international conference on humanoid robots (humanoids 2012)* (pp. 568–573).

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Истраживање у оквиру ове докторске дисертације је засновано на следећим експерименталним, теоријским и практичним методама:

- Методе аквизиције података током спровођења експеримената: Прва фаза истраживања је заснована на снимању различитих врста основних покрета дворучне манипулације. За потребе истраживања карактеристика људског кретања, сваки од покрета је извршен од стране 15 актера под истим условима у виртуелном окружењу и снимљен коришћењем ART система. Овај систем даје информације о позицији и оријентацији маркера физички постављених на људско тело током кретања. Поред тога, ART систем естимира 3Д позиције свих зглобова тела. Информације о кретању добијене са ART системом такође омогућавају прецизну анализу људских покрета и у Картезијанском простору. Подаци о људском покрету снимљени са ART системом су коришћени за представљање карактеристика кретања у простору унутрашњих координата и даљу анализу људског кретања на кинематском нивоу.
- Модел људског тела: За представљање модела људског тела коришћен је модел хуманоидног робота ROMEO. Робот ROMEO има 37 степени слободе у телу (по 7 степени слободе у рукама, по 6 у ногама, по 2 у очима, по 1 у стопалима, 2 у врату, 2 у глави и 1 у трупцу). Оваква кинематска структура одговара упрошћеној кинематској структури човековог тела и може се користити за њено представљање. За потребе анализе задатака дворучне манипулације у дисертацији је коришћен само горњи део тела. У процесу скалирања, димензије сегмената горњег дела робота ROMEO су скалиране на димензије истих сегмената људског тела. С обзиром да кинематски модел робота ROMEO одговара моделу човека, експериментална евалуација резултата је урађена са њим.
- Алгоритми за имитацију људских покрета: На основу расположивих алгоритама за имитацију људских покрета у овој дисертацији је коришћен и унапређен алгоритам који је представио Ude [8, 9]. Овај алгоритам даје информације о људском покрету коришћењем система за снимање људског кретања заснованог на маркерима. Кретање маркера постављених на тело човека су праћени са виртуелним маркерима који су повезани на дефинисан кинематски модел човека. Услед померања коже и немоделиране кинематике човечијег тела, кретање виртуелних маркера одступа од снимљеног кретања маркера причвршћених за тело човека. Стога, добијено кретање човека није идентично са снимљеним кретањем и прецизна имитација није загарантована. У овој дисертацији је унапређен постојећи имитациони алгоритам и поред кретања маркера је праћено и естимирано кретање зглобова. На овај начин је постигнута прецизна имитација снимљеног покрета која је битна за задатке који подразумевају контакт између руку и опреме. Постојећи алгоритам је унапређен и са циљем да се омогући имитација кретања у реалном времену коришћењем аналитичког приступа.
- Оптимизациони алгоритми за анализу људског кретања: У другој фази истраживања на кинематском нивоу су анализирани карактеристике људског кретања коришћењем познатих критеријумских функција. Основни облик алгоритма инверзне кинематике је проширен и укључене су појединачне критеријумске функције (минимизација кинетичке енергије, минимизација норме брзина степени слободе у зглобовима, минимизација удаљености између тренутне позиције и ергономске конфигурације човека и максимизација манипулабилности). На овај начин је тестиран алгоритам инверзне кинематике са сваким од критеријумских функција за генерисање снимљеног покрета. У наставку је дефинисан оптимизациони алгоритам за анализу карактеристика

људског покрета. Метод Лагранжових мултипликатора је коришћен за формулисање инверзног оптимизационог алгоритма управљања са тежинском комбинацијом наведених критеријумских функција. Генетски алгоритам је коришћен за израчунавање оптималне комбинације вредности тежинских коефицијената која генерише најприближнији покрет снимљеном. На основу вредности тежинских коефицијената извршена је анализа карактеристика људских покрета.

- Алгоритам фази логике за израчунавање карактеристика људског покрета: У трећој фази је представљен алгоритам фази логике за дефинисање карактеристика људских покрета на основу вредности тежинских коефицијената добијених у другој фази. Алгоритам фази логике је формулисан за дефинисање карактеристика људских покрета без претходне анализе, на основу стеченог сазнања о анализираним покретима. Добијени закључци о људском кретању су коришћени за дефинисање фази правила.

3.4. Применљивост остварених резултата

Алгоритам за имитацију људских покрета дефинисан у дисертацији омогућава имитацију комплексних покрета дворучне манипулације који укључују покрет са и без контакта између руку и опреме и транзициони процес који остварује прецизан контакт између руку и опреме без анализе контактних сила. Имитациони алгоритам представљен у дисертацији је базиран на аналитичком приступу и омогућава имитацију људског покрета у реалном времену са великом прецизношћу. Такође, имитациони алгоритам даје информације о покрету у Картезијанском простору и простору унутрашњих координата што омогућава анализу карактеристика кретања.

Инверзни оптимизациони алгоритам за анализу људских покрета се заснива на минимизацији комбинације критеријумских функција које су најчешће коришћене за управљање роботима. Комбинација тежинских коефицијената даје информације у активацији зглобова током кретања, изводљивости покрета и комфоности човека током кретања. Стога се оптимизациони алгоритам са одговарајућом комбинацијом критеријумских функција може директно применити за генерисање истог покрета на хуманоидном роботу истог кинематског модела. Узимајући у обзир да је представљен модел хуманоидног робота редундантан, на овај начин се генерише покрет робота који има исте карактеристике кретања као човек. Представљена анализа људских покрета се може искористити у анализи људских покрета са нарушеном моториком упоређујући оптималну комбинацију тежинских коефицијената здраве и повређене особе.

Дефинисани имитациони алгоритам и инверзни оптимизациони алгоритам за анализу људских покрета генеришу кретање робота налик човеку и омогућава: бољу интеграцију робота у људско окружење, замену човека у обављању тежких или досадних послова дворучне манипулације, замену човека у извршавању задатака опасним по живот и рехабилитацију људи са моторичким потешкоћама (демонстрација нормалних покрета човека које пацијент треба да понови).

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидаткиња Марија Томић је израдом ове докторске дисертације и публикацијом седамнаест научних радова у потпуности демонстрирала способности за самосталан научно-истраживачки рад. Кандидаткиња је систематично извршила преглед релевантне литературе,

успешно идентификовала недостатке досадашњих студија и предложила решења којима се превазилазе ограничења постојећих приступа. Тема дисертације је веома актуелна и мултидисциплинарна, при чему резултати дисертације поспешују интеграцију робота у људско окружење, помоћ људима у свакодневним пословима од стране робота и доприносе замени људи у обављању тешких и ризичних послова од стране робота на начин на које те послове људи раде. Методе истраживања и приступи у реализацији су иновативни и креативни. Остварени доприноси су оригинални и потврђују способности кандидаткиње за самостални научно-истраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Научни доприноси ове докторске дисертације су следећи:

- Побољшан је постојећи алгоритам имитације, узимајући у обзир информације о кретању маркера и зглобова актера и на тај начин повећана је тачности имитације,
- Истраживане су недовољно истражене карактеристике основних покрета дворучне манипулације, са и без контакта између руку и опреме,
- Анализирани су људски покрети на нивоу кинематике, без узимања у обзир динамике кретања, представљањем једноставне управљачке стратегије која се лако имплементира на хуманоидном роботу,
- Коришћени су алгоритам инверзне кинематике и инверзни оптимизациони алгоритам (који садрже пондерисану комбинацију основних критеријумских функција) за анализу карактеристика људских покрета,
- Добијене карактеристике људских покрета су имплементирани на хуманоидном роботу кроз генерисање његовог кретања у циљу прилагођавања хуманоида за сарадњу са људима у кооперативним задацима и за бољу интеграцију хуманоидних робота у животну средину човека,
- Анализиране су различите карактеристике људских покрета у простору унутрашњих координата за исте покрете у Картезијанском простору,
- Анализиране су карактеристике кретања у зависности од карактеристика човека (старост, пол, физичка кондиција, димензије тела...).

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Основни циљ истраживања представљеног у овој дисертацији је имитација и анализа карактеристика покрета дворучне манипулације за задатке које обухватају фазе са и без контакта између руку и опреме. Ова врста покрета није довољно истражена у литератури. Главна предност дефинисаног имитационог алгоритма је велика прецизност имитације покрета у Картезијанском простору што је од суштинског значаја за генерисање покрета који захтевају контакт између руку и опреме. Поред тога имитациони алгоритам генерише трајекторије кретања сваког степена слободе у простору унутрашњих координата што омогућава даљу анализу покрета. Релевантне студије се углавном фокусирају на имитацији

покрета без контакта између рукуи опремегде прецизна имитација није неопходна. У другом делу ове тезе предложени су алгоритми инверзне кинематике у комбинацији са четири критеријумске функције за анализу карактеристика људских покрета. Критеријумске функције су дефинисане у простору унутрашњих координата на кинематском нивоу у складу са карактеристикама људских покрета као што су активација зглобова, ергономичност и изводљивост покрета. У већини других студија, анализа људског кретањајеизвршена у Картезијанском простору посматрањем трајекторија руку или ногуили протеклог времена. Алгоритам инверзне кинематике са сваком критеријумском функцијом појединачно је коришћен за генерисање покрета скалираног моделом робота REOMEO-а.Анализом добијених резултата су показана својства сваког од критеријума да генерише покрет сличан снимљеном људском покрету. Са циљем проширења анализе карактеристика људског кретања, дефинисан је оптимизациони алгоритам који минимизира пондерисану сумуових критеријумских функција. Добијена је оптимална комбинација критеријумских функција која генерише покрет најприближнији снимљеном покрету. Вредности тежинских фактора дају представу о томе колико је нека од карактеристика заступљена у анализираном покрету. У постојећој литератури представљени скуп карактеристика људских покрета и њихова комбинација није била предмет истраживања. На самом крају тезе представљен је алгоритам фази логике за анализукарактеристика људског кретања базираног на добијеним закључцима. Алгоритми фази логике нису, до сада, често коришћени за представљање и анализу ове врсте проблема. Главни допринос ове тезе се огледау анализи скупакарактеристика људског кретања у простору унутрашњих координата и директној примени представљеног инверзног оптимизационог алгоритма са представљеним критеријумским функцијама за преношење стратегије кретања човека на хуманоидне роботе и генерисање кретања хуманоида. Један од недостатака истраживања чији су резултати приказани у овој дисертацији је још обимнија анализа људских покрета која подразумева снимање значајно већег броја различитих покрета са већим бројем актера. Анализа карактеристика људског кретања се може проширити анализом динамичких карактеристика.Такође, различити алгоритми вештачке интелигенције се могу тестирати за анализу карактеристика људских покрета коришћењем добијених резултата представљених у тези.

4.3. Верификација научних доприноса

Научни доприноси докторске дисертације су верификовани следећим радовима:

Категорија M23:

1. **Tomić M.**, Chevallereau Ch., Jovanović K., Potkonjak V., Rodić A.: Human to humanoid motion conversion for dual arm manipulation tasks, *Robotica*, 2018, pp. 1-21, DOI:10.1017/S0263574718000309, ISSN: 0263-5747, IF: 1.554
2. **Tomić M.**, Jovanović K., Chevallereau Ch., Potkonjak V., Rodić A.: Toward optimal mapping of human dual-arm motion to humanoid motion for tasks involving contact with the environment, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol 15(1), 2018, p.1729881418757377. DOI: 10.1177/1729881418757377, ISSN: 1729-8814, IF: 0.987

Категорија M14:

1. **M. Tomić**, Ch. Vassallo, Ch. Chevallereau, A. Rodić, V. Potkonjak, "Arms motion of a humanoid inspired by human motion", *New Trends in Medical and Service Robotis*, Springer, April, 2015. DOI: 10.1007/978-3-319-23832-6_19, ISSN: 2211-0984
2. A. Rodić, Đ. Urukalo, M. Vujović, S. Spasojević, **M. Tomić**, K. Berns, S. Al-Darraj, and Z. Zafar, "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.DOI: 10.1007/978-3-319-49058-8_48, ISSN: 2211-0984

3. I. Stevanović, A. Rodić, M. Jovanović., **M. Tomić**, “Building of Hyper-redundant Under-Actuated Soft Robotic Arm with 20DOF”, Advances in Service and Industrial Robotics, Mechanisms and Machine Science 49 (Springer), 2017, pp. 681-688, DOI: 10.1007/978-3-319-61276-8_72, ISSN: 2211-0984

Категорија M33:

1. V. Potkonjak, **M. Tomić**, A. Rodić, V. Antoska, “Human and Humanoid Motion - Distinguish Between Safe and Risky Mode of Locomotion”, 10th International IFAC Symposium on Robot Control, Dubrovnik, Hrvatska, Septembar, 2012.DOI: 10.3182/20120905-3-HR-2030.00070, ISSN: 1474-6670
2. **M. Tomić**, B. Miloradović, M. Janković, “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, Jun 2012.ISBN: 978-1-4673-1571-5
3. **M. Tomić**, Ch. Chevallereau, “Conversion of Captured Human Motion to the Humanoid ROMEO for Human Imitation ”, The 1st IcETRAN Conference, Vrnjačka Banja, Srbija, Jun, 2014.ISBN: 978-86-80509-70-9
4. **M. Tomić**, Ch. Vassallo, Ch. Chevallereau, A. Rodić, V. Potkonjak, “Arms motion of a humanoid inspired by human motion”, MESROB 2014, EPFL Lausanne, Švajcarska, Jul, 2014.ISBN: 9783319238319
5. **M. Tomić**, 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.ISBN: 978-86-80509-70-9
6. **M. Tomić**, A. Rodić and Đ. Urukalo, “Solving Inverse Kinematics of Hyper-Redundant Multi-Links Flexible Robot- modeling and simulation”, The 2nd IcETRAN Conference, Srebrno jezero, Serbia, Jun, 2015.ISBN: 978-86-80509-71-6
7. M. Vujović, I. Stevanović, **M. Tomić**, M. Miloš, A. Rodić, “Mechanical design of robot head with ability to express emotional gestures”, The 2nd IcETRAN Conference, Srebrno jezero, Serbia, Jun, 2015.ISBN: 978-86-80509-71-6

Категорија M63:

1. **M. Tomić**, Ch. Chevallereau, “The Circular motion of the Dual-Arms Robotics Manipulation Hands Inspired by Human Skill”, The 57th ETRAN Conference, Zlatibor, Srbija, Jun, 2013.ISBN: 978-86-805009-68-6
2. B. Miloradović, **M. Tomić**, S. Popić, “Primena veštačkih neuronskih mreža za rešavanje problema inverzne kinematike manipulatora sa pet stepeni slobode”, The 56th ETRAN Conference, Zlatibor, Srbija, Jun 2012.ISBN 978-86-80509-67-9
3. **M. Tomić**, M. Janković, “Solving inverse kinematics problem of ROBEO3 manipulator using genetic algorithms”, The 56th ETRAN Conference, Zlatibor, Srbija, Jun 2012.ISBN 978-86-80509-67-9
4. N. Bascarević, **M. Tomić**, P. Milosavljević, “Symbiosis of programming languages Matlab and C++ for efficient robot simulation”, The 55th ETRAN Conference, Banja Vrucica, Bosna i Hercegovina, Jun, 2011.ISBN: 978-86-80509-66-2
5. **M. Tomić**, V. Potkonjak, “Čovečiji i čovekoliki hod razlike između safe i risky moda”, The 54th ETRAN Conference, Donji Milanovac, Srbija, Jun, 2010.ISBN 978-86-80509-65-5

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу свега изложеног, Комисија сматра да докторска дисертација кандидаткиње Марије Томић испуњава све законске, формалне и суштинске услове, као и све критеријуме који се уобичајено примењују приликом вредновања докторске дисертације. Наведени научни

доприноси се односе на побољшање интеграције робота у људско окружење. Резултати истраживања у оквиру ове докторске дисертације се огледају у преношење стратегија покрета човека на планирање кретања хуманоидних робота и на анализу карактеристика људског кретања. Сви наведени резултати су верификовани у публикацијама кандидаткиње, а неки од њих су и експериментално демонстрирани на хуманоидном роботу РОМЕО. Узимајући у обзир све наведено, Комисија сматра да докторска дисертација Марије Томић садржи оригиналне научне доприносе у области генерисања кретања хуманоидних робота имитацијом људских покрета, као и анализи карактеристика људских покрета и њиховом преношењу на кретање и управљање хуманоидним роботима. Стога Комисија са задовољством предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да се докторска дисертација под називом „Дворучна роботска манипулација инспирисана људским вештинама“ прихвати, изложи на увид јавности и упуту на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

Београд, 03.05.2018. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



др Коста Јовановић, доцент
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



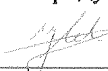
dr Christine Chevallereau, научни директор
CNRS, Laboratoire des Sciences du Numérique de Nantes - LS2N, Француска



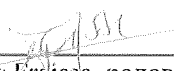
др Жељко Ђуровић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



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



dr Yannick Aoustin, редовни професор
Université de Nantes, Француска



dr Philippe Fraisse, редовни професор
Université de Montpellier, Француска

University of Belgrade
School of Electrical Engineering

TO THE ACADEMIC COUNCIL

**SUBJECT: REPORT ON COMPLETED DOCTORAL DISSERTATION OF CANDIDATE
MARIJA TOMIĆ**

By the Decision of the Academic Council of the School of Electrical Engineering, Reg. No. 5006/11-3, from April, 17th, 2018, we were appointed the members of the Commission for examination, evaluation and defence of doctoral dissertation of the candidate Marija Tomić with the title

"Dual-arm robotic manipulation inspired by human skills"

After examination of the submitted thesis and accompanying material and interview with the candidate, the Commission made the following

R E P O R T

1. INTRODUCTION

1.1. Chronology of the dissertation approval and preparation

The candidate submitted the doctoral thesis with the title „Dual-arm robotic manipulation inspired by human skills“ to the Commission for the third-level studies at the School of Electrical Engineering, University of Belgrade on November, 3rd, 2016 and proposed Dr. Kosta Jovanović, Assistant Professor and Dr. Christine Chevallereau, research director, as dissertation supervisors in accordance with the bilateral program of doctoral studies between the School of Electrical Engineering, University of Belgrade and Ecole Centrale de Nantes.

The Commission for the third-level studies considered the proposal of the thesis topic for dissertation preparation on its session held on November, 8th 2016 and forwarded the proposal of the Commission on the evaluation of the suitability of the topic and the candidate to the Academic Council.

The Academic Council of the School of Electrical Engineering appointed the Commission for conditions evaluation and acceptance of the doctoral dissertation topic on the session held on November, 15th 2016 (the Decision No. 5006/11-1 from November, 24th 2016), composed of:

- Dr. Željko Đurović, Full Professor, University of Belgrade – School of Electrical Engineering,
- Dr. Lazar Saranovac, Associated Professor, University of Belgrade – School of Electrical Engineering,
- Dr. Aleksandar Rodić, Scientific Advisor, University of Belgrade – Mihajlo Pupin Institute.

The Academic Council of the School of Electrical Engineering adopted the Report on the conditions evaluation and acceptance of the doctoral dissertation topic of the Commission on the session held on February, 14th 2017(the Decision No. 5006/11-2 from February, 14th2017).

The Council of the technical sciences scientific areas of the University of Belgrade, on the session from February, 27th 2017,assented to the proposal of the doctoral dissertation topic entitled "Dual-arm robotic manipulation inspired by human skills" (the Decision No.61206-872/2-17).

The candidate submitted the doctoral dissertation for examination and evaluation on April, 4th 2018. The Commission for the third-level studies confirmed the fulfilment of all necessary conditions for submitting the proposal to the Academic Council of the School of Electrical Engineering for forming the Commission for examination and evaluation of the doctoral dissertation on the session held on April, 10th 2018.

On the session held on April, 17th, 2018, The Academic Council of the School of Electrical Engineering appointed the Commission for examination and evaluation of doctoral dissertation, composed of (the Decision No's 5006/11-3):

- Dr. Kosta Jovanović, Assistant Professor, University of Belgrade – School of Electrical Engineering,
- Dr. Christine Chevallereau, Research Director, CNRS, Laboratory of Digital Sciences of Nantes - LS2N, France,
- Dr. Željko Đurović, Full Professor, University of Belgrade – School of Electrical Engineering,
- Dr. Aleksandar Rodić, Scientific Advisor, University of Belgrade – Mihajlo Pupin Institute.
- Dr. Yannick Aoustin, Full Professor, University of Nantes, France,
- Dr. Philippe Fraisse, Full Professor, University of Montpellier, France.

The candidate started doctoral study program in the spring semester of the academic year 2011/2012.Based on the Decision of the Academic Council No. 545/2 from 13/03/2012, the study program started in the spring semester of the academic year 2011/2012, so the deadline for completion of doctoral academic studies was calculated from the beginning of that semester, in accordance with the Statute of the University of Belgrade and the Statute of the Faculty of Electrical Engineering.

Upon expiry of the legally prescribed period for the doctoral academic studies completion, the extension of the deadline for the dissertation completion was granted for another two semesters at the request of the candidate in accordance with the Statute of the University of Belgrade.

1.2. The doctoral dissertation scientific area

The doctoral dissertation belongs to the technical sciences and the research areas of robotics, and control systems, for which the School of Electrical Engineering of the University of Belgrade and the Ecole Centrale de Nantes are specialized. The thesis supervisor from the School of Electrical Engineering of the University of Belgrade, Dr. Kosta Jovanović is an assistant professor for the scientific area of Automation and Control Systems. The thesis supervisor from Ecole Centrale de Nantes, Dr. Christine Chevallereau is a scientific director of the CNRS in Robotics and deputy director of the LS2N (Laboratory of Digital Sciences of Nantes). Both supervisors are the authors of a large number of scientific papers in the international journals.

1.3. Biography of the candidate

Marija Tomić was born on the 14th of July, 1987 in Užice. She finished the elementary school and the high school in Užice. She enrolled the School of Electrical Engineering in Belgrade in the 2006/2007 academic year, at the Department of Signals and Systems. She graduated in 2010 with the average grade of 9.02 with the thesis “Modelling, control and simulation of mobile robot platform with a robotic arm LYNXMOTION AL5A”. She enrolled the master studies in 2010 at the School of Electrical Engineering in Belgrade in the same Department and received the master degree in 2011 with the average grade of 10.00. The topic of the master thesis was “Modelling and managing the coordinated dual-arm manipulation of the service robot anthropomorphic structures”. She enrolled the PhD studies in 2011/2012 academic year at the School of Electrical Engineering in Belgrade, the Module of the Control Systems and Signal Processing. The following year she was awarded the scholarship of the French government for doctoral studies in France and she continued her PhD studies as a bilateral doctoral program between the School of Electrical Engineering in Belgrade and the Ecole Centrale de Nantes in Nantes, France. During the PhD studies at the School of Electrical Engineering, Marija Tomić passed ten exams with an average grade of 10.00 and attended several courses in the field of robotics at the Ecole Centrale de Nantes as a precondition of the application of the PhD thesis.

Marija Tomić has acquired knowledge in the field of the robotics through the internships during her primary and master studies: the internship in Manipal Institute of Technology, India in 2010 (for a period of three months) and an internship in the Institute Mihajlo Pupin, Center for Robotics, Belgrade in 2010 (for a period of one year). After the successful completion of the internship, Marija Tomić was employed at the Institute Mihajlo Pupin, Center for Robotics, in 2012 where she has been working until now at the position of the Research Assistant. Within the bilateral doctoral studies Mar

Until now, she participated in one national project (TR-35003: “Research and development of ambient intelligent service robots of anthropomorphic characteristics”, Funded by The Ministry of Education, Science and Technological Development of Republic of Serbia, 2011-2018) and two international projects of bilateral academic collaboration (IZ74Z0_137361/1: “Creative Alliance in Robotics Research and Education Focused on Medical and Service Robotics”, supported by the Swiss National Scientific Foundation, 2011-2014, and the European research and development program HORIZON 2020, Coordination support activity project “Researchers’ night - FLIRT” supported by the European research and development program, 2014-2015).

The research area of the candidate Marija Tomić includes control of humanoid robots of high redundancy and imitation of human motions using humanoid robots. The research results of Marija Tomić have been presented through the published papers: 2 papers in international journals, 3 book chapters, 7 papers published in proceedings of international scientific meetings and 5 papers published in proceedings of scientific meetings of national importance.

2. DESCRIPTION OF DISSERTATION

2.1. Dissertation content

Dissertation with the title “Dual-arm robotic manipulation inspired by human skills” has 143 pages in English language due to the bilateral doctoral agreement with the Ecole Centrale de Nantes. The dissertation is organized in the following six chapters: 1. Introduction; 2. State of the art; 3. Human to humanoid movement conversion for dual-arm manipulation tasks; 4. Dual-arm manipulation inspired by human skills; 5. Fuzzy logic algorithms for the analysis of human motion behaviours; 6.

Conclusion. At the beginning of the dissertation, there are the Abstract in English, French and Serbian language, Acknowledgement, List of tables, List of figures and Contents. The last chapter is followed by the list of the used literature with references listed in the alphabetical order of the authors' surnames and appendices: ROMEO robot motor information, Hanavan model of the human body, Quaternions, Modified DH parameters of the ROMEO robot, and the Biography of the candidate.

2.2. A brief of overview of thesis chapters

The introductory chapter of the thesis presents the motivation for exploring the imitation of human movements with humanoid robots. The main goal of human movements imitation is the easier integration of humanoid robots into the human environment and helping people in everyday activities. To facilitate the integration of robots into the human environment, robots can be like human beings and have movements similar to those of humans. Since humanoid robots have a redundant body structure as well as a human, the task of imitating human movement with a robot is possible. The imitation processes and imitation by learning represent the basic imitation strategies. The imitation process is based on repetition of the same movement with the robot without prior analysis of the movement, while the imitation by learning encompasses an analysis of the basic characteristics of human movement. The dissertation defines algorithms for imitation of human movement with humanoid robot using both approaches. The existing imitation processes are analysed and improved in order to enable the imitation of the movement at the kinematic level, in real time and with high precision. The imitation by learning is used further to define the characteristics of human movement and transfer to robot movements. The fact that a person performs the movement in an optimal way by minimizing the unknown criteria functions has motivated us to present the human movement as an optimization process. The criteria functions minimized by the optimization algorithm are the basic criteria functions used for controlling robots, such as: minimizing kinetic energy, minimizing the velocity in the joints, minimizing the deviation of the human current position from the ergonomic one and maximizing manipulability. Human movement has been studied as an optimal combination of the above mentioned criteria functions. The inverse optimization algorithm defined by the optimal combination of criteria functions is presented as a method for analysing the characteristics of human movements. The acquired characteristics of human movements at the kinematic level are transferred to the movement of humanoid robots. The conclusions about the human movements are used to define the fuzzy algorithm for calculating the optimal combination of the criteria functions of any movement. At the end of the introductory chapter, the contributions of the presented research within the thesis are presented in detail, as well as the structure of other chapters with a brief description.

The second chapter presents an overview of the state-of-the-art in the research area and describes the studies relevant to the research covered by the doctoral dissertation. The first part of this chapter presents the history of the development of the humanoid robotics. The characteristics of humanoid robots are compared with the characteristics of a human. A special emphasis is given to the comparative overview of the kinematic structure of humanoid robots and similarities to the kinematic structure of a human. The second part of the chapter gives an overview of the state in the area of human movement analysis. First, the definition of the human movement and the history of development of the device for its recording and analysis are given. Depending on the field of science that studies the human movement, the different characteristics of the movement are presented. Since the humanoid robotics aims to imitate the human movement, the process of imitation of human movements is presented. The imitation of human movements can be defined in the task space (Cartesian space) or in the joint space. The imitation of movements in the task space gives a clear imitation of human movements without analysing the characteristics of the movement. The imitation in the joint space aims at monitoring the movement of all degrees of freedom in the

joints and enables the analysis of the human movement characteristics. Accordingly, the existing algorithms for imitation and analysis of human movements are presented. The chapter also gives an overview of the human movement analysis using the optimization approach that is also the subject of the research in the thesis. The third part of the chapter analyses the strategy that a person uses to generate the movement. An analysis of the activation of each of the joints during movement is one of the basic strategies for generating the movement. The joints that have a higher effective inertia generate smooth and large movements while the low-inertia joints generate fast and precise movement. Based on these conclusions, the literature presents optimization algorithms that give these movement characteristics. Also, the level of human comfort during movement is another characteristic of human movements. The analysis of human comfort during movement has been widely studied in ergonomics, biomechanics and robotics. An overview of the existing comfort analysis techniques is given in this chapter and the method used in our research is proposed. The movement possibility is presented as the last characteristic of human movement, which is analysed in the thesis.

The third chapter presents the process of human movement conversion into the movement of a humanoid robot for the task of dual-arm manipulation. The conversion process consists of four steps. The first step is to analyse and record the basic movements of the dual-arm manipulation. The movements of the dual-arm manipulations analysed in the thesis are: "Rotation of the valves", "Rotation of the canoe paddles", "Inflating a mattress using a pumps", "Opening/closing the drawer", "Rotation of a steering wheel", "Cutting with a knife" and "Grating of food". Each movement is thoroughly analysed and selected in order to represent a basic movement of the dual-arm manipulation. The movements are selected according to the axis of rotation and the mutual relation of the arms, according to the classification presented in the literature. Each of the analysed movements consists of a phase in which the arms and equipment are not in contact, and a phase in which the contact is implied. The characteristics of different systems for recording human movements are analysed, but the system based on markers is described in detail and used in this research. In the second step of the conversion, the kinematic model of the robot ROMEO is used to represent the kinematic model of a human. The process of scaling the kinematic model of robot on the human model is also presented. The length of human segments is estimated for each actor and included in the kinematic model of the robot. The differences between the kinematic model of the robot and human and the unmodulated kinematics are further analysed in order to point out to the potential limitations of the imitation algorithm. The third step of the conversion is an imitation process that aims to generate the movement of the robot in the task and joint spaces based on information about the human movement obtained using the movement recording system. The imitation process is based on tracking the movement of markers placed on the body of the actors (real markers) with markers defined on the scaled model of the robot ROMEO (virtual markers). In the initialization process, the scaled robot model is placed in the initial position of the actor (the actor stands straight with the arms horizontally stretched out) and the positions of the virtual markers are defined so that they match the positions of the real markers. The initialization process is realized by defining an initialization algorithm. The numerical and analytical model of the imitation process is defined as follows. The both models aim to minimize the criteria function that represents the difference in the 3D position of real and virtual markers and the difference in the 3D estimated position of the arm joint of the actor and a scaled robot model. The numerical model is defined as an optimization algorithm that calculates the generalized coordinates of all the joints of a scaled robot model using the MATLAB `fmincon` solver with an active-set function based on the sequential quadratic programming (SQP) method. The analytical model is based on an incremental calculation of the values of the generalized coordinates using the Jacobian matrix. The current 3D position and orientation of the virtual markers and robot joints as well as the values of the generalized coordinates are calculated on the basis of their previous values and values of the Jacobian matrices. The results obtained by numerical and analytical approaches are compared with the results of a similar imitation algorithm described in the literature. The comparative analysis shows that the

algorithms developed in this thesis give better results in monitoring the position and orientation of the joints comparing to the similar existing algorithm. The results obtained by our imitation algorithm give high precision in imitation and can be used to define the trajectory of the robot arm for tasks with and without contact between the arms and the equipment. The fourth and final step of the conversion process is to generate the movement of the humanoid robot based on the obtained information on the actor movements calculated using the imitation algorithm. The acquired movement of the actor cannot be directly used to generate the same movement on the robot due to the size of the robot and the limitation in the movement of the joints. In this part of the thesis, two inverse kinematics algorithms are defined to generate the robot movement. The both algorithms use the information on human movement obtained in the task and joint spaces. The first algorithm is defined for a part of a movement that does not include contact between arms and equipment, while the second algorithm is defined for the part of the movement where the contact is required. The transition strategy from one phase of the movement to another is explained. At the end of this chapter, the experimental validation of results is given. The imitation movement "Opening/closing the drawer" is generated on the robot ROMEO.

The fourth chapter presents the method in which the characteristics of the human movements can be analysed. Our assumption is that human movement is an optimization process. Therefore, we have defined optimization algorithms that analyse human movement at the kinematic level. The set of criteria functions is defined for the analysis of human movements: minimization of kinetic energy, minimization of velocity in the joints, minimization of the deviation of the current position from the ergonomic one and maximization of manipulability. At the very beginning of the research we presented the characteristics of human movement using a known control algorithm in the robotics - algorithm of inverse kinematics. Each criteria function is individually included in the inverse kinematics algorithm. We have concluded which of the criteria functions best describes each of the movements. In order to perform a more precise analysis of human movements, the combination of the mentioned criteria function has been considered. An inverse optimal control algorithm that minimizes the weight combination of all criteria is presented. A weight coefficient is assigned to each criterion functions that shows how much the criterion is dominant in the analysed movement. A genetic algorithm is defined for calculating the values of weight coefficients. On the basis of the obtained weight coefficients values, the conclusions about each movement were drawn. Finally, the strategy of generating human movements is presented, depending on the type of movement, the characteristics of human and the environment. The experimental validation of the results obtained with the inverse kinematics algorithm with individual criteria and with the inverse optimal control algorithm with the optimal combination of criteria functions has been performed on the robot ROMEO.

The aim of the fifth chapter is to link the obtained conclusions about the characteristics of human movement and to define a method for their analysis using artificial intelligence algorithms. The fuzzy logic algorithm is defined on the basis of the collected analysis of the characteristics of the human movement presented in Chapters 3 and 4. The general characteristics of human movements are used as expert knowledge to define the fuzzy rules. The fuzzy logic algorithm is trained on the set of all analysed movements made by all actors. Testing the fuzzy algorithm has been performed on a new movement that was not previously analysed. The characteristics of the new movement obtained with the fuzzy algorithm are compared with the results calculated subsequently using the optimization and genetic algorithm.

In the last, sixth chapter, the scientific contributions and results are summarized, and afterwards the further research directions are proposed.

3. DISSERTATION EVALUATION

3.1. State-of-the-art and originality

The integration of robots into the human environment is an up-to-date topic in recent years. The great development of technology has led to more sophisticated models of humanoid robots that, besides human appearance, also have sensors that imitate human senses and control systems that resemble human behavior patterns. Although there are humanoid robots that resemble humans, the integration of robots into the human environment has not come to a great extent. One of the reasons is that, in addition to the appearance, a robot should also have the characteristics of human movement, reasoning, emotional intelligence, etc. The modernity of this doctoral dissertation is reflected in the analysis of the human strategy for generating movement and applying the same strategies for generating the same movements with humanoid robots. The imitation of human movements has been largely analysed in the literature so far. The most commonly used method is programming of robot movement based on the movement demonstration (programming by demonstration). This method is based on presenting the movement to a robot that attempts to generate the same movement through its sensors without analysing the characteristics of the movement. This approach is very effective for imitating a large range of movements that involve the inaccurate positioning of robot joints. A significant contribution of the dissertation is the analysis and imitation of the movement of the dual-arm manipulation of a human. This type of movement has not been studied a lot in the literature. The analysed movements of the dual-arm manipulation consist of phases with and without contact between the arm and the equipment. Imitation of the movement without contact is easily achievable with the existing imitation algorithms. Imitation of the movement with the contact requires high precision of imitation and is not easily realized. The dissertation proposes algorithms that accurately simulate the analysed movements and generate the movement of robots that can realize the interaction of robots with equipment. Also, the kinematic and dynamic parameters of the movement, such as movement distribution through the joints, energy consumption analysis, muscle activation and similar, are not analysed and integrated into the robot movement. Therefore, it was necessary to define new methods that analyse the characteristics of the movement and, based on them, generate robot's movements similar to human. The originality of this doctoral dissertation relies on the analysis of the characteristics of human movements and the definition of a mathematical tool that maps these characteristics to the movement of robots. One of the differences in this thesis comparing to other studies is the analysis of the movement of a human in the joint space at the kinematic level. The analysis was performed using basic criteria functions defined in the joint space used as standard for generating robot movements. In this way, it is easy to apply the analysed characteristics of human movement to the generation of the same movements on the robot. The last chapter of the dissertation takes into account modern algorithms of artificial intelligence and analyses their possibilities to define the characteristics of any movement of the dual-arm manipulation taking into account the analysis of the characteristics of the human movement.

3.2. Review of the used literature

In this doctoral dissertation, the analysed literature is extensive and relevant. A total of 145 bibliographical references are cited. The literature contains papers relevant for the research areas in the thesis. The presented references give a complete analysis of the current achievements in the presented areas. The list of literature includes relevant papers that the candidate has published as an author or co-author.

The dissertation analyses the basic movements of the dual-arm manipulation, which are classified according to the mutual relationship between the arms presented in the papers [1, 2]. The kinematic model of ROMEO robot is used to represent the kinematic model of a human using the Denavit and Hartenberg notations given in the paper [3]. The papers [4, 5] give an overview of imitation processes based on the imitation of the previously recorded human movements. The imitation processes are defined in the Cartesian space and in the joint space. Imitation of the human movement can also be performed using optimization algorithms. The papers [6-9] give an overview of imitation algorithms presented at the kinematic and dynamic levels. The dissertation enhanced the imitation algorithm presented in the papers [8, 9] in order to increase the precision of imitation in the Cartesian space at the kinematic level and to enable the imitation of the human movements with and without contact between arms and equipment in the real time. Since it is not possible to directly convert the movement of a human to the movement of a robot due to the dimension and limitation of the movement of the joints, the algorithms presented in the paper [10] are used to adjust the obtained movement of a human to the movement of a robot. Based on the information about the human movement obtained with the help of an imitation algorithm, it is possible to analyse the characteristics of the human movements. In our paper [11], an analysis of the movement characteristics is presented using the inverse kinematics algorithm and individual criteria functions. The human movement can be characterized as an optimization process. Therefore, the characteristics of the human movement can be analysed using the optimization algorithm and a combination of several criteria functions, which is presented in the papers [12-14]. The choice of the criteria functions is defined on the basis of the analysis of the human movement characteristic. In the papers [14-16], an analysis of the human movements is presented by observing the activation of the joints. The criteria functions that describe the influence of each joint on the movement generation are also defined. In the papers [14, 17], the level of comfort of a human during the movement is analysed. The comfort of a human during the movement is presented in several ways: by analysing the force in the joints [17] and by analysing the deviation of the current configuration of a human from an ergonomic configuration [14]. The second approach, as well as the ergonomic configuration of the human presented in [14], is used in the dissertation. The feasibility of the manipulation task is analysed as the last criterion for describing the human movements. The manipulability is a measure of the movement feasibility, a qualitative relation between the current human configuration and the singular configuration. The manipulability was first defined in the paper [18]. In the paper [19], an analysis of the robot manipulability is presented on the basis of its working space, joints limitations, and mutual collisions. The researches presented in the papers [18, 19] are implemented in the dissertation.

1. Krüger, J., Schreck, G., & Surdilovic, D. (2011). Dual arm robot for flexible and cooperative assembly. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 60(1), 5–8.
2. Zöllner, R., Asfour, T., & Dillmann, R. (2004). Programming by demonstration: dual-arm manipulation tasks for humanoid robots. In Iros (pp. 479–484).
3. Khalil, W., & Dombre, E. (2007). Robot manipulators: modeling, performance analysis and control. London, UK, ISTE Ltd.
4. Do, M., Azad, P., Asfour, T., & Dillmann, R. (2008). Imitation of human motion on a humanoid robot using non-linear optimization. In *Humanoid robots, 2008. humanoids 2008. 8th ieee-ras international conference on* (pp. 545–552).
5. Billard, A., Epars, Y., Calinon, S., Schaal, S., & Cheng, G. (2004). Discovering optimal imitation strategies. *Robotics and autonomous systems*, 47(2), 69–77.
6. Ott, C., Lee, D., & Nakamura, Y. (2008). Motion capture based human motion recognition and imitation by direct marker control. In *Humanoid robots, 2008. humanoids 2008. 8th ieee-ras international conference on* (pp. 399–405).

7. Suleiman, W., Yoshida, E., Kanehiro, F., Laumond, J.-P., & Monin, A. (2008). On human motion imitation by humanoid robot. In *Robotics and automation, 2008. icra 2008. IEEE international conference on* (pp. 2697–2704).
8. Ude, A., Atkeson, C. G., & Riley, M. (2004). Programming full-body movements for humanoid robots by observation. *Robotics and autonomous systems*, 47(2), 93–108.
9. Ude, A., Man, C., Riley, M., & Atkeson, C. G. (2000). Automatic generation of kinematic models for the conversion of human motion capture data into humanoid robot motion (Tech. Rep.). Georgia Institute of Technology.
10. Baerlocher, P., & Boulic, R. (2004). An inverse kinematics architecture enforcing an arbitrary number of strict priority levels. *The visual computer*, 20(6), 402–417.
11. Tomic, M., Vassallo, C., Chevallereau, C., Rodic, A., & Potkonjak, V. (2016). Arm motions of a humanoid inspired by human motion. In *New trends in medical and service robots* (pp. 227–238). Springer.
12. Mombaur, K., Laumond, J.-P., & Yoshida, E. (2008). An optimal control model unifying holonomic and nonholonomic walking. In *Humanoid robots, 2008. humanoids 2008. 8th IEEE-RAS international conference on* (pp. 646–653).
13. Mombaur, K., Truong, A., & Laumond, J.-P. (2010). From human to humanoid locomotion—an inverse optimal control approach. *Autonomous robots*, 28(3), 369–383.
14. Yang, J., Marler, R. T., Kim, H., Arora, J., & Abdel-Malek, K. (2004). Multi-objective optimization for upper body posture prediction. In *10th AIAA/ISSMO multidisciplinary analysis and optimization conference* (Vol. 30).
15. Potkonjak, V., Popovic, M., Lazarevic, M., & Sinanovic, J. (1998). Redundancy problem in writing: from human to anthropomorphic robot arm. *Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on*, 28(6), 790–805.
16. Liu, C. K., Hertzmann, A., & Popovic, Z. (2005). Learning physics-based motion style with nonlinear inverse optimization. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 24(3), 1071–1081.
17. Yang, F., Ding, L., Yang, C., & Yuan, X. (2005). An algorithm for simulating human arm movement considering the comfort level. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 13(5), 437–449.
18. Yoshikawa, T. (1984). Analysis and control of robot manipulators with redundancy. In *Robotics research: the first international symposium* (pp. 735–747).
19. Vahrenkamp, N., Asfour, T., Metta, G., Sandini, G., & Dillmann, R. (2012). Manipulability analysis. In *2012 12th IEEE-RAS international conference on humanoid robots (humanoids 2012)* (pp. 568–573).

3.3. Description and adequacy of applied scientific methods

Research in the scope of this doctoral dissertation is based on the following experimental, theoretical and practical methods:

- The methods of data acquisition during the experiment implementation: The first phase of the research is based on recording the various types of the basic dual-arm manipulation movements. For the purposes of the research of the human movement characteristics, each movement was performed by 15 actors under the same conditions in a virtual environment and recorded using the ART system. This system provides information on the position and

orientation of the markers physically placed on the human body during the movement. In addition, ART system estimates the 3D positions of all joints of the body. The movement information obtained with the ART system enables a precise analysis of the human movements in the Cartesian space as well. The human movement data recorded with the ART system are used to represent the movement characteristics in the joint space and further analysis of the human movements at the kinematic level.

- The human body model: The humanoid robot model ROMEO is used to represent the human body model. Robot ROMEO has 37 degrees of freedom in the body (per 7 degrees of freedom in the arms, per 6 in the legs, per 2 in the eyes, per 1 in the feet, 2 in the neck, 2 in the head and 1 in the body). Such a kinematic structure corresponds to the simplified kinematic structure of the human body and can be used to represent it. For the purpose of analysing the tasks of the dual-arm manipulation in the dissertation, only the upper part of the body is used. In the scaling process, the segment dimensions of the upper part of the robot ROMEO are scaled to the dimensions of the same segments of the human body. Since the kinematic robot model ROMEO corresponds to the human model, an experimental evaluation of the results is carried out with it.
- The algorithms for human movement imitation: Based on the available algorithms for the human movement imitation, an improved algorithm introduced by Ude [8, 9] is used in this dissertation. This algorithm provides information on the human movement using a marker-based recording system for human movement. The movement of markers placed on the human body is followed by virtual markers that are linked to a defined kinematic model of a human. Due to the movement of the skin and the unmodulated kinematics of the human body, the movement of virtual markers deviates from the recorded movement of markers attached to the human body. Therefore, the obtained movement of a person is not identical with the recorded movement and precise imitation is not guaranteed. In this dissertation, the existing imitation algorithm is improved and, in addition to the movement of the markers, the estimated movement of the joints is also monitored. This way, the precise imitation of the recorded motion is achieved, which is important for tasks that involve contact between the arms and the equipment. The existing algorithm has been improved in order to enable imitation of the real-time movement using an analytical approach.
- The optimization algorithms for the analysis of the human movement: In the second phase of the research at the kinematic level, the human movement characteristics were analysed using known criteria functions. The basic form of the inverse kinematics algorithm is expanded and individual criteria are included (minimization of kinetic energy, minimization of the velocity norm for degrees of freedom in the joints, minimization of deviation between the current position and ergonomic configuration of human and maximization of manipulability). In this way, an inverse kinematics algorithm has been tested with each of the criteria functions for generating a recorded movement. There is an optimization algorithm for analysing the human movement characteristics further in the paper. The Lagrange multipliers method is used to formulate an inverse optimization control algorithm with a weight combination of the listed criteria functions. The genetic algorithm is used to calculate the optimal combination of values of weight coefficients that generate the movement that is the most closely related to the recorded movement. Based on the values of the weight coefficients, the analysis of the human movement characteristics has been performed.
- The fuzzy logic algorithm for calculating the human movement characteristics: In the third phase, the fuzzy logic algorithm for defining the human movement characteristics based on the values of the weight coefficients obtained in the second phase is presented. The fuzzy logic algorithm is formulated to define the characteristics of the human movements without

previous analysis, based on the acquired knowledge of the analysed movements. The conclusions about human movement are used to define the fuzzy rules.

3.4. Applicability of the dissertation results

The algorithm for imitation of human movements defined in the dissertation allows the imitation of complex movements of dual-arm manipulation involving movement with and without contact between the arm and the equipment and a transition process that achieves precise contact between the arm and the equipment without analysing the contact forces. The imitation algorithm presented in the dissertation is based on an analytical approach and allows the imitation of the human movement in real time with great precision. Also, the imitation algorithm provides information about the movement in the Cartesian space and the joint space, which enables the analysis of the characteristics of the movement.

An inverse optimization algorithm for the analysis of human movements is based on minimizing the combination of the criteria functions most commonly used for the control of robots. The combination of weight coefficients gives information about the activation of joints during movement, feasibility of movement and comfort of the person during movement. Therefore, the optimization algorithm with the appropriate combination of criteria functions can be directly applied to generate the same movement on the humanoid robot of the same kinematic model. Taking into account that the humanoid robot model is redundant, in this way, a robot movement is generated that has the same characteristics of movement as a human being. The presented analysis of human movements can be used in the analysis of human movements with disturbed motor skills comparing the optimal combination of weight coefficients of a healthy and injured person.

A defined imitation algorithm and an inverse optimization algorithm for the analysis of human movements generate the movement of a human-like robot and enables: better integration of robots into the human environment, replacement of a human in performing difficult or boring tasks of dual-arm manipulation, replacement of a human in performing life-threatening tasks and rehabilitation of people with motor disabilities (demonstration of normal movements of a person to be repeated by the patient).

3.5. Evaluation of the candidate's achieved capabilities for independent scientific work

Candidate Marija Tomić has fully demonstrated the ability for independent scientific work by completion of this doctoral dissertation and publication of seventeen scientific papers. The candidate carried out a systematic review of the relevant literature, successfully identifying the shortcomings of the previous studies. She proposed solutions that overcome the limitations of the existing approaches. The topic of the dissertation is very up-to-date and multidisciplinary, while the results of the dissertation enhancing the better integration of robots in the human environment, helping people in daily activities and replacing people in the difficult and risky jobs in the way people do. Research methods and developed approaches are innovative and creative. The achieved contributions are original and confirm the candidate's ability for independent scientific research work.

4. ACHIEVED SCIENTIFIC CONTRIBUTION

4.1. Overview of the achieved scientific contributions

Scientific contributions of this doctoral dissertation are the following:

- The existing imitation algorithm has been improved, taking into account information on the movement of markers and joints of the actors, and the accuracy of imitation has been increased,
- The insufficiently investigated characteristics of the basic movements of dual-arm manipulation are investigated, with and without contact between hands and equipment,
- The human movements at the level of kinematics are analysed, without taking into account the movement dynamics, by presenting a simple control strategy that is easily implemented on a humanoid robot,
- An inverse kinematics algorithm and an inverse optimization algorithm (containing a weighted combination of basic criteria functions) are used to analyse the characteristics of human movements,
- The acquired characteristics of human movements have been implemented on a humanoid robot motion generation in order to adapt humanoids to human cooperation in cooperative tasks and to better integrate humanoid robots into the human environment,
- The different characteristics of human movements in the joint space for the same movements in Cartesian space are analysed,
- The characteristics of the movement are analysed according to the characteristics of a person (age, gender, physical fitness, body dimensions, etc.).

4.2. Critical analysis of the research results

The objective of the research presented in this dissertation is to imitate and analyse the characteristics of the dual-arm manipulation movement for tasks that involve phases with and without contact between hands and equipment. This kind of movement has not been sufficiently explored in the literature. The main advantage of the defined imitation algorithm is the high precision of the imitation of the movement in the Cartesian space, which is essential for generating movements that require contact between hands and equipment. In addition, the imitation algorithm generates trajectories of the movement of each degree of freedom in the joint space, which enables further analysis of the movement. Relevant studies mainly focus on imitation of the movement without contact between hands and equipment where precise imitation is not necessary. In the second part of this thesis, the inverse kinematics algorithms are combined with four criteria functions for analysing the characteristics of human movements. Criteria functions are defined in the joint space at the kinematic level in accordance with the characteristics of human movements such as joint activation, ergonomics and possibility of the movement. In most studies, the analysis of human movement is defined in the Cartesian space by observing the trajectory of the arm or foot of the past time. The inverse kinematics algorithm with each criteria function was individually used to generate a movement scaled by the ROMEO robot model. The analysis of the obtained results shows the properties of each of the criteria to generate a movement similar to the recorded human movement. In order to extend the analysis of the characteristics of human movement, an optimization algorithm is defined which minimizes the weighted sum of these criteria functions. An optimal combination of criteria functions is achieved which generates the movement most closely to the recorded movement. Values of the weight factors give an idea of how much of the characteristics are present in the analysed movement. In the present literature, the presented set of characteristics of human movements and their combination has not been the subject of research. At

the very end of the thesis, the fuzzy logic algorithm for analysing the characteristics of human movement based on the conclusions obtained is presented. The fuzzy logic algorithms have not been used so far to present and analyse this type of problem. The main contribution of this thesis is reflected in the analysis of the characteristics of human movement in the joint space and the direct application of the introduced inverse optimization algorithm with the presented criteria functions for transferring the human movement strategy to humanoid robots. One of the disadvantages of the research whose results are shown in this dissertation is the more extensive analysis of human movements, which implies taking a significantly larger number of different movements with a larger number of actors. The analysis of the characteristics of human movement can be extended by analysing the dynamic characteristics. Also, various algorithms of artificial intelligence can be tested for the analysis of the characteristics of human movements using the obtained results presented in the thesis.

4.3. Verification of the scientific contributions

Scientific contributions of this doctoral dissertation are verified based on the following publications:

Category M23:

1. **M. Tomić**, Ch. Chevallereau, K. Jovanović, V. Potkonjak, A. Rodić, "Human to humanoid motion conversion for dual arm manipulation tasks", *Robotica*, 2018, pp. 1-21, DOI:10.1017/S0263574718000309, ISSN: 0263-5747, IF: 1.554
2. **M. Tomić**, K. Jovanović, Ch. Chevallereau, V. Potkonjak, A. Rodić, "Toward optimal mapping of human dual-arm motion to humanoid motion for tasks involving contact with the environment", *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol 15(1), 2018, p.1729881418757377. DOI: 10.1177/1729881418757377, ISSN: 1729-8814, IF: 0.987

Category M14:

1. **M. Tomić**, Ch. Vassallo, Ch. Chevallereau, A. Rodić, V. Potkonjak, "Arms motion of a humanoid inspired by human motion", *New Trends in Medical and Service Robotis*, Springer, April, 2015. DOI: 10.1007/978-3-319-23832-6_19, ISSN: 2211-0984
2. A. Rodić, Đ. Urukalo, M. Vujović, S. Spasojević, **M. Tomić**, K. Berns, S. Al-Darraj, and Z. Zafar, "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. DOI: 10.1007/978-3-319-49058-8_48, ISSN: 2211-0984
3. I. Stevanović, A. Rodić, M. Jovanović, **M. Tomić**, "Building of Hyper-redundant Under-Actuated Soft Robotic Arm with 20DOF", *Advances in Service and Industrial Robotics, Mechanisms and Machine Science* 49 (Springer), 2017, pp. 681-688, DOI: 10.1007/978-3-319-61276-8_72, ISSN: 2211-0984

Category M33:

1. V. Potkonjak, **M. Tomić**, A. Rodić, V. Antoska, "Human and Humanoid Motion - Distinguish Between Safe and Risky Mode of Locomotion", 10th International IFAC Symposium on Robot Control, Dubrovnik, Hrvatska, Septembar, 2012. DOI: 10.3182/20120905-3-HR-2030.00070, ISSN: 1474-6670
2. **M. Tomić**, B. Miloradović, M. Janković, "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, Jun 2012.ISBN: 978-1-4673-1571-5

3. **M. Tomić**, Ch. Chevallereau, "Conversion of Captured Human Motion to the Humanoid ROMEO for Human Imitation ", The 1st IcETRAN Conference, Vrnjačka Banja, Srbija, Jun, 2014.ISBN: 978-86-80509-70-9
4. **M. Tomić**, Ch. Vassallo, Ch. Chevallereau, A. Rodić, V. Potkonjak, "Arms motion of a humanoid inspired by human motion", MESROB 2014, EPFL Lausanne, Švajcarska, Jul, 2014.ISBN: 9783319238319
5. **M. Tomić**, 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.ISBN: 978-86-80509-70-9
6. **M. Tomić**, A. Rodić and Đ. Urukalo,"Solving Inverse Kinematics of Hyper-Redundant Multi-Links Flexible Robot- modeling and simulation", The 2nd IcETRAN Conference, Srebrnojezero, Serbia, Jun, 2015.ISBN: 978-86-80509-71-6
7. M. Vujović, I. Stevanović, **M. Tomić**, M. Miloš, A. Rodić, "Mechanical design of robot head with ability to express emotional gestures", The 2nd IcETRAN Conference, Srebrnojezero, Serbia, Jun, 2015.ISBN: 978-86-80509-71-6

Category M63:

1. **M. Tomić**, Ch. Chevallereau, "The Circular motion of the Dual-Arms Robotics Manipulation Hands Inspired by Human Skill", The 57th ETRAN Conference, Zlatibor, Srbija, Jun, 2013.ISBN: 978-86-805009-68-6
2. B. Miloradović, **M. Tomić**, S. Popić, "Primena veštačkih neuronskih mreža za rešavanje problema inverzne kinematike manipulatora sa pet stepeni slobode", The 56th ETRAN Conference, Zlatibor, Srbija, Jun 2012.ISBN 978-86-80509-67-9
3. **M. Tomić**, M. Janković, "Solving inverse kinematics problem of ROBEO3 manipulator using genetic algorithms", The 56th ETRAN Conference, Zlatibor, Srbija, Jun 2012.ISBN 978-86-80509-67-9
4. N. Bascarević, **M. Tomić**, P. Milosavljević, "Symbiosis of programming languages Matlab and C++ for efficient robot simulation", The 55th ETRAN Conference, Banja Vrucica, Bosna i Hercegovina, Jun, 2011.ISBN: 978-86-80509-66-2
5. **M. Tomić**, V. Potkonjak, "Čovečiji i čovekoliki hod razlike između safe i risky moda", The 54th ETRAN Conference, Donji Milanovac, Srbija, Jun, 2010.ISBN 978-86-80509-65-5

5. CONCLUSION AND PROPOSAL

Based on everything exposed above, the Commission considers that doctoral dissertation of the candidate Marija Tomić fully meets all legal, formal and essential requirements, as well as all criteria that are usually applied when evaluating the doctoral dissertation. The core scientific contribution of the thesis leads toward better integration of robots in the human environment. The main research results from this doctoral dissertation are transfer of the human movement strategy to the humanoid motion generation and analysis of the characteristics of human movement. All results are verified in publications, while some of them are experimentally verified on humanoid robot ROMEO. Taking all this into account, the Commission considers that the doctoral dissertation of Marija Tomić contains the original scientific achievements that contribute to the area of imitation of

the human movements with the humanoid robots, analysis of the human movement characteristics and its transfer to the movement and control of humanoid robots. Therefore, the Commission is pleased to propose to the Academic Council of the School of Electrical Engineering of the University of Belgrade to accept the doctoral dissertation entitled "Dual-arm robotic manipulation inspired by human skills", present it to the public and forward it for the final acceptance to the Council of scientific areas of technical sciences at the University of Belgrade.

Belgrade, May 3rd, 2018

COMMITTEE MEMBERS



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



Dr. Christine Chevallereau, Research Director
CNRS, Laboratory of Digital Sciences of Nantes - LS2N, France



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



Dr. Aleksandar Rodić Scientific Advisor
University of Belgrade – Mihailo Pupin Institute



Dr. Yannick Aoustin, Full professor
University of Nantes, France



Dr. Philippe Fraisse, Full professor
University of Montpellier, France