

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Софије Спасојевић

Одлуком Наставно-научног већа бр. 5014/11-3 од 22. септембра 2017. године и 5014/11-3/2 од 20. октобра 2017. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Софије Спасојевић под насловом

### **"Квантитативна анализа покрета у рехабилитацији неуролошких поремећаја коришћењем визуелних и носивих сензора"**

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 „Квантитативна анализа покрета у рехабилитацији неуролошких поремећаја коришћењем визуелних и носивих сензора“ пријавила Комисији за студије трећег степена на Електротехничком факултету, Универзитета у Београду, 03.11.2016. године и за менторе предложила проф. др Жељка Ђуровића и проф. др Jose Santos-Victor-а у складу са билатералним програмом докторских студија између Електротехничког факултета, Универзитета у Београду и Високог Техничког Института, Универзитета у Лисабону.

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 5014/11-1 од 24.11.2016), именовало је Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације у саставу: проф. др Бранко Ковачевић, проф. др Дејан Раковић и научни саветник др Александар Родић.

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 5014/11-2 од 14.02.2017).

Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду је на седници од 27.02.2017. године дало сагласност на предлог теме докторске дисертације под насловом „Квантитативна

анализа покрета у рехабилитацији неуролошких поремећаја коришћењем визуелних и носивих сензора“ (број одлуке 61206-871/2-17).

Кандидаткиња је предала докторску дисертацију на преглед и оцену 31.08.2017. године. Комисија за студије трећег степена потврдила је на својој седници одржаној 05.09.2017. 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 својим седницама, одржаним 12.09.2017. и 10.10.2017. године именовало Комисију за преглед и оцену докторске дисертације у саставу: проф. др Жељко Ђуровић (Електротехнички факултет), проф. др Jose Santos-Victor (Високи Технички Институт, Универзитет у Лисабону), проф. др Бранко Ковачевић (Електротехнички факултет), научни саветник др Александар Родић (Институт Михајло Пупин), проф. др Jorge Marques (Високи Технички Институт, Универзитет у Лисабону), и проф. др Luis Alexandre (University Beira Interior), број одлука 5014/11-3 и 5014/11-3/2.

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.

## 1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација припада техничким наукама и ужим научним областима обраде сигнала, машинског учења и компјутерске визије, за које су Електротехнички факултет Универзитета у Београду и Високи Технички Институт Универзитета у Лисабону матични. Ментор докторског рада са Електротехничког факултета Универзитета у Београду, проф. др Жељко Ђуровић је изабран у звање редовног професора за научне области обраде сигнала и управљања системима. Проф. др Jose Santos-Victor, ментор са Високог Техничког Института Универзитета у Лисабону је изабран у звање редовног професора за научне области компјутерске визије и машинског учења. Оба ментора су аутори великог броја научних радова у истакнутим међународним часописима.

## 1.3. Биографски подаци о кандидату

Софија Спасојевић, мастер инжењер електротехнике и рачунарства, рођена је 07.09.1987. године у Шапцу. Основну школу и гимназију завршила је у Шапцу као један од најбољих ученика. Електротехнички факултет у Београду уписала је 2006/2007. школске године. Дипломирала је 2010. године на Одсеку сигнали и системи са просечном оценом 8.91 током студија и оценом 10 на дипломском. Школске 2010/2011. године уписала је мастер студије на Електротехничком факултету у Београду. Мастер студије је завршила 2011. године са просечном оценом 10 и оценом на мастер раду 10. Школске 2011/2012. године уписала је докторске студије на Електротехничком факултету у Београду, на Одсеку за управљање системима и обраду сигнала. У јануару 2012. године, засновала је радни однос у Институту Михајло Пупин, Центар за роботiku, где је запослена и данас на позицији истраживач сарадник. У јулу 2013. године уписала је билатералне докторске студије између Електротехничког факултета у Београду и Високог Техничког Института у Лисабону.

До сада је учествовала у једном националном пројекту (ИИИ-44008: Развој робота као средства за превазилажење препрека у развоју деце са поремећајима, Министарство образовања, науке и технолошког развоја Републике Србије, 2011-2017) и пет међународних пројеката билатералне академске сарадње (1. **CARE-robotics** - Creative Alliance in Robotics Research and Education Focused on Medical and Service Robotics, подржан од стране швајцарске националне научне фондације, 2011-2014; 2. **COLBAR** - Synthesis of Collaborative

Behavior Attributes with Service Robots Based on Visually-Motor Human-Machine Interaction, пројекат билатералне академске сарадње између Високог Техничког Института у Лисабону и Института Михајло Пупин у Београду, 2013-2014; 3. Researchers' night – FLIRT, ЕУ пројекат подржан од стране европског програма за истраживање и развој (Horizon 2020), 2014-2015; 4. Advanced perception and learning for cognitive heterogeneous robots, пројекат билатералне академске сарадње између Института Јожеф Штефан у Љубљани и Института Михајло Пупин у Београду, 2015 и 5. **EIrobots** - Emotionally Intelligent Robots: Building attributes of artificial emotional intelligence aimed to make robots feel and sociable as humans, подржан од стране фондације Alexander von Humboldt у сарадњи са Институтом за информатику Универзитета у Кајзерслаутерну, 2015-2017.

Област истраживања Софије Спасојевић обухвата обраду сигнала, машинско учење, анализу података и компјутерску визију. Досадашњи резултати кандидата приказани су кроз неколико публикација и то: 2 рада у истакнутим међународним часописима, 5 поглавља у књигама, 5 радова на међународним конференцијама и 6 радова на домаћим конференцијама.

## **2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ**

### 2.1. Садржај дисертације

Дисертација под насловом “Квантитативна анализа покрета у рехабилитацији неуролошких поремећаја коришћењем визуелних и носивих сензора” написана је на 107 страна на енглеском језику, због билатералног докторског програма са Високим Техничким Институтом, Универзитета у Лисабону. Дисертација је организована у следећих седам поглавља: 1. Увод; 2. Литература и релевантне студије; 3. Квантитативна процена покрета широког опсега код Паркинсонове болести коришћењем Кинект уређаја; 4. Квантитативна процена покрета шаке код Паркинсонове болести коришћењем сензорске рукавице; 5. Квантитативна процена покрета руку / шаке код Паркинсонове болести коришћењем бежичне наруквице; 6. Квантитативни приступ у праћењу напретка код пацијената након шлога заснован на Кинект-у и ЕМГ подацима; 7. Закључак и будући рад. На почетку дисертације дати су Резиме на енглеском, португалском и српском језику, Захвалница, Листа акронима и Садржај. Иза последњег поглавља дат је списак коришћене литературе са 155 референци наведених по абecedном редоследу презимена аутора и Биографија кандидата.

### 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Уводно поглавље се састоји из три дела. У првом делу је описана мотивација за истраживање спроведено у тези, као и предмет и значај истраживања. Предмет истраживања је развој сензорског система и приступа за анализу и квантификацију рехабилитационих покрета пацијената, оболелих од неуролошких болести (Паркинсонова болест и шлог). Евалуација учинка пацијената приликом обављања покрета код Паркинсонове болести и шлога се заснива на субјективним проценама неуролога и терапеута и недовољно прецизним клиничким скалама, које само медицински стручњаци могу да протумаче. Са друге стране, конвенционална рехабилитациона терапија често подразумева дуготрајан, напоран и једноличан процес опоравка, од кога пацијенти лако одустају. Као последица наведених чињеница, постоји изражена потреба да се у поступак традиционалне дијагностике, мониторинга и рехабилитације уведу нове сензорске технике које би повећале мотивацију пацијената током терапије и побољшале квалитет евалуација неуролога и терапеута коришћењем објективних приступа. Дат је кратак осврт на сензорске системе и методе коришћене до сада за аквизицију и анализу рехабилитационих покрета. У овом делу су наведени и главни циљеви ове дисертације: (1) Развој приступачног и преносивог рехабилитационог сензорског система, погодног за коришћење у кућним условима; (2) Развој

приступа за квантификацију покрета пацијената и (3) Дизајн нових индикатора перформансе покрета (ИПП) издвојених из сензорских сигнала.

У другом делу уводног поглавља дат је опис Паркинсонове болести и шлога са медицинске тачке гледишта. Наведени су основни симптоми болести, начин лечења и ток опоравка. Објашњени су различити стадијуми болести и клиничке методе на основу којих доктори и терапеути прате стање пацијената. Ове информације су од великог значаја за развој приступа за квантификацију покрета, а поготово за дизајн индикатора перформансе покрета који одражавају симптоме болести.

У трећем делу уводног поглавља дата је структура поглавља у наставку тезе и кратак опис о чему ће бити речи у наредним поглављима.

Друго поглавље представља преглед стања у области и описује студије релевантне за истраживање обухваћено докторском дисертацијом. Дат је преглед различитих типова сензора и сензорских система који се користе за аквизицију покрета – сензори базирани на визији (са маркерима који се постављају на тело и без маркера) и носиви сензори који се постављају на руку или шаку. Анализирају се сензорски системи са применом у Паркинсоновој болести и након шлога за следеће групе покрета: (1) ход и покрети широког опсега горњег дела и (2) покрети руке и шаке. Посебан нагласак је на методама за генерисање релевантних обележја која се добијају из сензорских сигнала. Истакнути су недостаци досадашњих рехабилитационих система и ограничења метода за процесирање сензорских сигнала у циљу издвајања индикатора перформансе покрета. Објашњено је на који начин истраживање у овој докторској дисертацији превазилази недостатке и ограничења релевантних студија у смислу: (1) коришћења комбинованог сензорског система како би се обухватили сви покрети од интереса за разматрану болест и (2) дефинисања нових, клинички оријентисаних индикатора перформансе покрета на основу којих се може вршити објективна евалуација перформансе пацијената.

Треће поглавље фокусирано је на квантификацију хода и покрета широког опсега горњег дела тела коришћењем Кинект сензора код пацијената који болују од Паркинсонове болести. Кинект сензор је базиран на визији и користи технику прикупљања информација без маркера који би се постављали на тело. Током обављања покрета, Кинект прикупља 3Д координате за 15 карактеристичних зглобова, а могу се снимити и видео секвенце. Индикатори перформансе покрета, добијени на основу података са сензора, су дефинисани у договору са неурологом и терапеутима и подељени су у две групе: (1) стандардни индикатори перформансе покрета који се рачунају застарелим техникама (брзина и опсег покрета) и (2) ново-предложени индикатори, клинички оријентисани и специфични за Паркинсонову болест (кофицијент симетрије и мера ригидности). Предложени индикатори перформансе покрета су тестирани у идентификовању клиничких група од интереса (здрави/болесни и различити стадијуми болести). Показано је да ИПП-а добијени на основу података са Кинект-а могу успешно да класификују здраве и болесне, али не и различите стадијуме болести. Разлог лежи у чињеници да су симптоми Паркинсонове болести израженији у покретима шаке него приликом хода и крупних покрета. Због тога се у наредном поглављу акценат ставља на квантификацију покрета шаке. Покрети пацијената током експеримента се прикупљају у секвенци од неколико узастопних понављања, али се анализирају појединачно. Због тога је у оквиру овог поглавља предложен метод за аутоматску сегментацију покрета заснован на принципу детекције догађаја и Гаусовских процеса.

Четврто поглавље бави се евалуацијом покрета шаке коришћењем сензорске рукавице код Паркинсонових пацијената. Излази сензорске рукавице су угаони подаци за 18 зглобова прстију и шаке. Издвојени индикатори перформансе који карактеришу покрете шаке се добијају на два начина: (1) директно или након процесирања из сензорских сигнала и (2) индиректно - коришћењем модела шаке, који се поред тога користи и за визуализацију и верификацију података са сензора. Након формирања прелиминарног сета индикатора перформансе покрета, следи њихова анализа по следећим критеријумима: (1) интерна конзистентност и поузданост мерења; (2) статистичка евалуација према демографским и

клиничким параметрима; (3) идентификовање клиничких група од интереса (здрави/болесни и различити стадијуми болести) и (4) корелација са клиничким скалама. Обележја која не задовољавају статистичке критеријуме су избачена из даље анализе. Преостала обележја се односе на опсег покрета метакарпалних и проксималних зглобова прстију, угаоне брзине адукционих сензора (смештени између прстију) и параметре брзине и убрзања изведене из модела шаке. Идентификоване су групе индикатора које су од интереса за сваки од горе наведених критеријума. Подаци са сензорске рукавице су информативнији од података са Кинект-а и показали су могућност класификације између стадијума болести.

Пето поглавље закључује евалуацију покрета код Паркинсонових пацијената анализом покрета руку. Покрети руке и шаке се снимају коришћењем бежичне наруквице која се поставља на подлактицу. Уређај даје податке о мишићној активности (са осам ЕМГ канала) и инерцијалне податке (са акцелерометра, жироскопа или магнетометра). Обзиром да сензорска рукавица описана у претходном поглављу има високу цену и да је дизајнирана само за десну руку, бежична наруквица се разматра као њена погодна алтернатива. Поред тога, клинички протоколи у Паркинсоновој болести укључују тестирање и евалуацију покрета руку, а нарушена мишићна активност је једна од карактеристика Паркинсонове болести. Поред квантификације покрета руку, нагласак у овом поглављу је и на објективној евалуацији симптома брадикинезије (успорености покрета) и процени разлике у перформансама здраве и болесне руке. Обзиром да су ЕМГ сигнали високо нестационарни, они се процесирају применом прозорског приступа, при чему се индикатори рачунају за сваки прозор. Исти приступ примењен је и за сигнале са акцелерометра и жироскопа. На овај начин добија се и податак о еволуцији индикатора током извршавања покрета. На крају поглавља, дефинишу се најрелевантнији индикатори према клиничким критеријумима.

У претходна три поглавља, фокус је био на анализи и квантификацији покрета пацијената који болују од Паркинсонове болести. Шесто поглавље се бави објективном евалуацијом покрета код пацијената који се опорављају након шлога. Концепт анализе покрета је другачији због природе болести и тока опоравка. Пацијенти након шлога, уз адекватну рехабилитациону терапију, могу да остваре значајна побољшања у кратком временском интервалу. Због тога је анализа конципирана индивидуално и фокусирана на праћење промена код сваког пацијента током времена (мониторинг). Анализирају се покрети широког опсега горњег дела тела помоћу Кинект-а и покрети руке и шаке помоћу бежичне наруквице. Неки од предложених индикатора перформансе покрета су исти као и случају Паркинсонових пацијената, а предложени су и нови индикатори, специфични за третман шлога. Поред идентификације индикатора перформансе покрета од интереса за релевантне клиничке критеријуме, развијена је и апликација за складиштење, визуализацију и интерпретацију сензорских мерења. Апликација укључује личне профиле пацијената, како би се пратило њихово стање током времена и омогућила примена система у кућној рехабилитацији.

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

### **3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ**

#### **3.1. Савременост и оригиналност**

Паркинсонова болест и шлог су водећи узроци моторних поремећаја и најчешћа неуролошка обољења након Алцхајмерове болести. Шлог је генерално други најчешћи узрок смрти, а трећи када се разматрају земље развијеног света. Рана дијагностика, одговарајућа рехабилитациона терапија и адекватан мониторинг могу значајно да побољшају стање пацијента и омогуће бољи квалитет живота. Конвенционална рехабилитациона терапија у болничком окружењу подразумева дуготрајан, напоран и једноличан процес опоравка, од кога пацијенти лако одустају. Асистенција других особа је често неопходна пацијентима, што повећава укупне трошкове. Са друге стране, процена стања пацијената код

Паркинсонове болести и шлога се заснива на субјективним оценама неуролога и терапеута и на недовољно прецизним клиничким скалама.

Као последица наведених чињеница, постоји изражена потреба да се у поступак традиционалне дијагностике, мониторинга и рехабилитације уведу нове сензорске технике које би побољшале квалитет евалуација неуролога и терапеута коришћењем објективних приступа, а истовремено пружиле могућност кућне рехабилитације. Због тога је примена сензорских система и информационих технологија у медицини последњих година веома актуелна тема, а тек од недавно се разматра и званично увођење таквих система у медицинске протоколе. Докази савремености теме су и многобројни научни скупови и мултидисциплинарни часописи посвећени овој тематици, као и све већи број европских пројеката који финансирају истраживања овог типа, обзиром на значајан друштвени утицај. Оригиналност ове докторске дисертације почива на оствареним резултатима истраживања и доприносима који превазилазе оквире досадашњих студија. Један од доприноса ове тезе у односу на остале студије које се баве сличном тематиком је предлог приступачног, комбинованог рехабилитационог система за анализу свих група рехабилитационих покрета од интереса за конкретну неуролошку болест. Други значајан допринос се односи на предлог нових индикатора перформансе покрета који нису до сада разматрани у литератури. Предложени индикатори су издвојени из сензорских сигнала, дефинисани у договору са докторима и специфични су за конкретну неуролошку болест. Такође, у корелацији су са клиничким скалама, а релевантни су и по другим клиничким критеријумима. Коначно, за праћење стања пацијента након шлога, предложен је интерактивни систем за рехабилитацију заједно са методом за евалуацију покрета, који би се могао користити како у болничком, тако и у кућном окружењу.

### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У овој докторској дисертацији, анализирана литература је обимна и релевантна. Наведено је укупно 155 библиографских референци. Литература се већином садржи од радова новијег датума, обзиром да су коришћене сензорске технологије доступне на тржишту свега неколико година. Овај податак такође потврђује актуелност теме и истраживања обухваћеног овом докторском тезом. Списак литературе укључује и релевантне радове које је кандидаткиња публиковала као аутор или коаутор.

Радови [1-4] дају увид у медицински аспект Паркинсонове болести и шлога и важеће клиничке протоколе који се примењују током лечења. Преглед сензорских система који се користе за аквизицију покрета, са нагласком на системе коришћене у рехабилитацији је дат у радовима [5-8]. Приступачни визуелни системи са техником снимања без маркера су описани у [9-11]. Показано је да такви системи поседују задовољавајућу тачност за примене у рехабилитацији [11, 12]. Примери рехабилитационих система и приступа за квантификацију покрета који се заснивају на Кинект уређају су описани у [13, 14], међутим, недовољан број студија се бави конкретним случајем Паркинсонове болести [15, 16] и шлога [17, 18].

Појединачни сензори чији се излазни сигнали користе за квантификацију финих покрета шаке и прстију, описани су у [19-23] док су сензорске рукавице које се користе за ове сврхе наведене и анализирани у [24, 25].

Бежична наруквица је најновији од свих сензора, предвиђених за развој сензорског система. Релативно скоро се појавила на тржишту и постоји само неколико концептуалних научних радова [26, 27] у којима су је аутори тестирали за аквизицију покрета, док је примена овог сензора у третману пацијената након шлога наведена у [28, 29].

1. Jankovic J. Parkinson's disease: clinical features and diagnosis. *J Neurol, Neurosurgery and Psychiatry* 2008; 79 (4): 368–376.

2. Goetz C, Poewe W, Rascol O, et al. Movement Disorder Society Task Force report on the Hoehn and Yahr staging scale: Status and Recommendations, *Mov Disord* 2004; 19(9): 1020-1028.

3. Goetz C, Tilley B, Shaftman S, et al. Movement Disorder Society-Sponsored Revision of the Unified Parkinson's Disease Rating Scale (MDS-UPDRS): Scale Presentation and Clinimetric Testing Results. *Mov Disord* 2008; 23 (15): 2129-2170.
4. Fugl-Meyer AR, Jaasko L, Leyman I, and et al. The post-stroke hemiplegic patient. I. a method for evaluation of physical performance. *Scandinavian journal of rehabilitation medicine*, 7(1):13-31, 1974.
5. Stamford JA, Schmidt PN, Friedl KE. What Engineering Technology Could Do for Quality of Life in Parkinson's Disease: A Review of Current Needs and Opportunities. *IEEE J Biomed Health Inform* 2015; 19 (6): 1862-1872.
6. Zhou H, Hu H. Human motion tracking for rehabilitation – A survey. *Biomed Signal Process Control* 2008; 3 (1): 1–18.
7. Parisi F, Ferrari G, Giuberti M, et al. Body-Sensor-Network-Based Kinematic Characterization and Comparative Outlook of UPDRS Scoring in Leg Agility, Sit-to-Stand, and Gait Tasks in Parkinson's Disease. *IEEE J Biomed Health Inform* 2015; 19 (6): 1777-1793.
8. Patel S, Park H, Bonato P, et al. A review of wearable sensors and systems with application in rehabilitation. *J Neuroeng Rehabil* 2012; 9:21.
9. Gonzalez-Jorge H, Riveiro B, Vazquez-Fernandez E, et al. Metrological evaluation of Microsoft Kinect and Asus Xtion sensors. *Measurement* 2013; 46 (6): 1800-1806.
10. Gonçalves AR, Gouveia ER, Cameirão MS, et. al. Automating senior fitness testing through gesture detection with depth sensors. *IET International Conference on Technologies for Active and Assisted Living (TechAAL)*; 2015 Nov. 5; London, UK.
11. Antón D, Goñi A, Illarramendi A. Exercise Recognition for Kinect-based Telerehabilitation. *Methods Inf Med* 2015; 54 (2): 145-155.
12. Khoshelham K, Elberink S. Accuracy and resolution of Kinect depth data for indoor mapping applications. *Sensors* 2012; 12 (2): 1437–1454.
13. Chang Y, Han W, Tsai Y. A Kinect-based upper limb rehabilitation system to assist people with cerebral palsy. *Res Dev Disabil* 2013; 34 (11): 3654–3659.
14. Gama A, Chaves T, Figueiredo L, et al. Guidance and Movement Correction Based on Therapeutics Movements for Motor Rehabilitation Support Systems. 14th Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR); 2012 May 28-31; Rio de Janeiro, Brasil. *IEEE*; 2012. pp. 191-200.
15. Galna B, Barry G, Jackson D, et al. Accuracy of the Microsoft Kinect sensor for measuring movement in people with Parkinson's disease. *Gait and Posture* 2014; 39 (4): 1062-1068.
16. Galna B, Jackson D, Schofield G, et al. Retraining function in people with Parkinson's disease using the Microsoft Kinect: game design and pilot testing. *J Neuroeng Rehabil* 2014; 11-60.
17. Esfahlani SS and Thompson T. Intelligent physiotherapy through procedural content generation. In *Twelfth Artificial Intelligence and Interactive Digital Entertainment Conference*, 2016.
18. Bao X, Mao Y, Lin Q, et al. Mechanism of kinect-based virtual reality training for motor functional recovery of upper limbs after subacute stroke. *Neural regeneration research*, 8(31):2904, 2013.
19. LeMoyné R, Coroian C, Mastroianni T. Quantification of Parkinson's disease characteristics using wireless accelerometers. *International Conference on Complex Medical Engineering (ICME)*; 2009 April 9-11; Tempe, AZ. *IEEE*; 2009. pp. 1-5.
20. Salarian A, Russmann H, Wider, C, et al. Quantification of tremor and bradykinesia in Parkinson's disease using a novel ambulatory monitoring system. *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 2007; 54 (2): 313–322.
21. Shima K, Tsuji T, Kandori A, et al. Measurement and Evaluation of Finger Tapping Movements Using Log-linearized Gaussian Mixture Networks. *Sensors* 2009; 9 (3): 2187-2201.
22. Niazmand K, Tonn K, Kalaras A, et al. Quantitative Evaluation of Parkinson's Disease using sensor based smart Glove. 24th International Symposium on Computer-Based Medical Systems (CBMS); 2011 June 27-30; Bristol, UK. *IEEE*; 2011. pp. 1-8.
23. Hanson M, Powell H, Frysinger R, et al. Teager Energy Assessment of Tremor Severity in Clinical Application of Wearable Inertial Sensors. *IEEE/NIH Life Science Systems and Applications Workshop (LISA)*; 2007 Nov. 8-9; Bethesda, MD. *IEEE*; 2007. pp. 136-139.
24. Su Y, Allen CR, Geng D, et al. 3-D Motion System ("Data-Gloves"): Application for Parkinson's disease. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2003; 52 (3): 662-674.
25. Morrow K, Docan C, Burdea G, et al. Low-cost Virtual Rehabilitation of the Hand for Patients Post-Stroke. *International IEEE Workshop on Virtual Rehabilitation* 2006; New York, NY. *IEEE*; 2006. pp. 6-10.
26. S. Mithileysh and R. Sharanya. Myo armband for physiotherapy healthcare: A case study using gesture recognition application. In *Proceedings of the 8th International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS)*, pages 1-6, 2016.
27. AM. Qamar, Khan AR., SO. Husain, and et al. A multi-sensory gesture-based occupational therapy environment for controlling home appliances. In *Proceedings of the 5th ACM on International Conference on Multimedia Retrieval*, pages 671-674, 2015.
28. Hidayat AA, Zainal A. and Happyanto DC. Lovett scaling with flex sensor and myo armband for monitoring finger muscles therapy of poststroke people. *EMITTER International Journal of Engineering Technology*, 3(2), 2016.
29. Oboe R, Tonin A, Koyo Y, et al. Robotic finger rehabilitation system for stroke patient using surface emg armband. In *Industrial Electronics Society, IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE*, pages 785-790. *IEEE*, 2016.

### 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: Неопходан услов за аквизицију података је калибрација сензора. Сваки од коришћених сензора има дефинисан поступак калибрације. Након калибрације, приступа се аквизицији покрета према дефинисаним експерименталним протоколима. Експерименти су спроведени у клиничком окружењу и укључивали су групу Паркинсонових пацијената, пацијената који се опорављају од шлога и адекватну контролну групу здравих особа.
- Методе предобrade сигнала: (1) Филтрирање сигнала како би се одстранио шум мерења; (2) Сегментација – у случају неких сензора, покрети се понављају више пута за редом и складиште заједно у једном сигналу, а анализирају се појединачно. Због тога је неопходно применити алгоритам сегментације сигнала на појединачне покрете.
- Методе екстракције релевантних обележја, односно индикатора перформансе покрета (ИПП) из сигнала: (1) Директан приступ – издвајање ИПП-а директно из сензорских сигнала или након примене адекватних модификација сигнала; (2) Индиректан приступ – издвајање ИПП-а из развијеног модела шаке на основу естимације потребних параметара – овај метод се примењује само у случају ИПП-а издвојених из сигнала снимљених помоћу сензорске рукавице; (3) Прозорски приступ – подела сигнала на клизеће прозоре, при чему се ИПП-а рачунају за сваки издвојени подскуп. На овај начин постоји увид у временску еволуцију ИПП-а током покрета. Овај приступ се користи за анализу сигнала добијених са бежичне наруквице – ЕМГ сигнала, као и сигнала са акцелерометра и жироскопа.
- Методе селекције ИПП (релевантних обележја): Током процедуре издвајања ИПП могу се појавити одређена обележја која нису релевантна или имају прилично занемарљив утицај на конкретну анализу и постављени проблем. Због тога се примењују технике селекције обележја, како би се задржала само она обележја од високог значаја.
- Статистичке методе: Статистичке методе се примењују кроз статистичку анализу између група од интереса (пацијенти и контролни субјекти, као и групе различитих стадијума болести) у контексту сета издвојених ИПП (релевантних обележја).
- Методе машинског учења: Системи одлучивања за подршку дијагностике и мониторинга на основу добијених вектора обележја се пројектују коришћењем одговарајућих класификатора. Додатно, примењују се технике редукције димензија вектора обележја, како би се испитале перформансе класификатора у новом простору редукованих димензија и одредила обележја са највећим утицајем на класификацију група од интереса.
- Испитивање корелације: Веома важна ставка код клиничких студија у којима се предлажу алтернативне технике и употреба нових показатеља учинка пацијената (у овом случају ИПП-а) је испитивање постојања корелације између ново-предложених ИПП-а и клиничких скала и тестова.
- Развој интерактивне апликације у склопу рехабилитационог система: Апликација је намењена за складиштење, визуелизацију и интерпретацију сензорских мерења и издвојених индикатора перформансе покрета. Апликација укључује личне профиле пацијената, како би се пратило њихово стање током времена и омогућила примена система у кућној рехабилитацији. Такође, на овај начин је омогућена стална комуникација између пацијената и доктора.

### 3.4. Применљивост остварених резултата



Предложени сензорски систем и развијени методи за квантификацију и објективну евалуацију рехабилитационих покрета имају велики потенцијал за примену у клиничким протоколима. Обзиром да се доктори приликом процене стања пацијената ослањају на субјективне методе и недовољно прецизне клиничке скале и тестове, примена сензорских технологија и објективних приступа би обезбедила значајну подршку медицинској пракси и традиционалној рехабилитационој терапији.

Методи идентификације релевантних индикатора перформансе покрета су експериментално верификовани за Паркинсонове пацијенте и пацијенте који се опорављају након шлога. Међутим, исти концепт се уз извесне адаптације може применити и на друге типове неуролошких болести и моторних поремећаја.

Веома значајна примена остварених резултата ове докторске дисертације се огледа у могућностима коришћења система заједно са приступом за квантификацију покрета у кућној рехабилитацији. Последњих година, концепт кућне рехабилитације постаје све заступљенији, обзиром на ограничену покретљивост пацијената и укупне трошкове спровођења рехабилитационих терапија у болничком окружењу.

Резултати истраживања су проистекли из сталне колаборације са докторима и засновани су на подацима прикупљеним током експерименталних тестирања са пацијентима. Међутим, за укључивање предложених метода у клиничке протоколе, потребна су додатна испитивања, као и стручно мишљење медицинских експерата и сагласности надлежних установа.

### 3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидаткиња Софија Спасојевић је израдом ове докторске дисертације и публикацијом осамнаест 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 имају велики потенцијал за конкретне примене у медицинској пракси и рехабилитационој терапији. 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:

- Преглед и систематизација постојећих система рехабилитације који се заснивају на визуелним и носивим сензорима, са посебним освртом на оне који су примењиви код Паркинсонове болести и током опоравка након шлога.
- Развој приступачног, преносног и бежичног сензорског система, погодног за кућну рехабилитацију, који је безбедан и комфоран за примену код пацијената.
- Развој приступа (алгоритама) за анализу и квантификацију покрета:
  - Примена нових, прецизнијих техника за израчунавање постојећих рехабилитационих мера (нпр. брзине и опсега покрета);
  - Предлог нових релевантних обележја помоћу којих се покрети могу описати (индикатори перформансе покрета - ИПП);
  - Развој алгоритама за екстракцију ИПП-а директно из добијених сензорских сигнала или из сигнала обрађених применом адекватних техника;

- Анализа релевантности издвојених ИПП-а за конкретну неуролошку болест и испитивање корелисаности предложених ИПП-а са важећим клиничким тестовима и скалама прописаним за посматрану неуролошку болест.
- Пројектовање система одлучивања између клиничких група (контролна група и пацијенти и различите фазе болести) на основу дефинисаног сета ИПП-а.
- Развој нових техника за подршку клиничких евалуација током дијагностике и мониторинга пацијената.

#### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Основне предности сензорског система за рехабилитацију предложеног у овој дисертацији у односу на системе разматране у досадашњим студијама су приступачност, преносивост и комбиновани сензорски подаци за објективну евалуацију свих покрета од интереса за конкретну неуролошку болест. Релевантне студије се углавном фокусирају на одређену групу покрета и користе изоловане сензоре који не могу адекватно да опишу покрете пацијената.

Највећи допринос тезе је предлог нових индикатора перформансе покрета који нису до сада разматрани у доступној литератури. Предложени индикатори одражавају симптоме болести, а могу се користити и као подршка клиничким евалуацијама током дијагностике и мониторинга болести. Такође, они су у корелацији са клиничким тестовима и скалама, што представља неопходан услов за њихово евентуално укључење у клиничке протоколе. Индикатори перформансе покрета добијају се на основу ново-предложених алгоритама процесирања сензорских сигнала.

Већини студија недостаје стратегија за укључивање сензорских мерења у клиничке протоколе и експериментална верификација добијених резултата. У овој тези, предложени су начини на које индикатори перформансе покрета могу побољшати клиничке евалуације: (1) пројектовање система одлучивања између клиничких група од интереса (пацијенти и контролна група и различите фазе болести); (2) објективна процена разлике у перформанси здраве и болесне руке и (3) развој интерактивне апликације за складиштење, визуализацију и интерпретацију сензорских мерења коју могу користити пацијенти у кућној рехабилитацији и доктори у болничком окружењу. Сви добијени резултати су проистекли из експерименталних сензорских и клиничких мерења на узорку од преко 50 пацијената.

Један од недостатака истраживања чији су резултати приказани у овој дисертацији јесте обимнија верификација предложених решења која би подразумевала значајно већи број пацијената и постојање временске дистанце. Надамо се да ће резултати, до којих се у оквиру ове тезе дошло, заживети у медицинској пракси рехабилитације пацијената оболелих од Паркинсонове болести и у рехабилитацији пацијената након доживљеног шлога, и да ће време које долази посведочити о примењивости и сврсисходности таквих метода.

#### 4.3. Верификација научних доприноса

Научни доприноси докторске дисертације су верификовани следећим радовима:

##### Категорија M22:

1. **S. Spasojević**, T. Ilić, S. Milanović, V. Potkonjak, A. Rodić, and J. Santos-Victor. Combined vision and wearable sensors-based system for movement analysis in rehabilitation. In *Methods of Information in Medicine journal*, 56(2):95-111, 2017. (IF=1.772), (ISSN: 0026-1270), (DOI: 10.3414/ME16-02-0013). Schattauer.
2. **S. Spasojević**, T. Ilić, I. Stojković, V. Potkonjak, A. Rodić, and J. Santos-Victor. Quantitative Assessment of the Arm/Hand Movements in Parkinson's Disease Using a Wireless Armband Device. *Frontiers in Neurology*, 8(388):1-15, 2017. (IF=3.552), (ISSN: 1664-2295), (DOI: 10.3389/fneur.2017.00388).

#### Kategorija M14:

1. Rodić, Đ. Urukalo, M. Vujović, **S. Spasojević** et al. Embodiment of Human Personality with EI-Robots by Mapping Behaviour Traits from Live-Model. *Advances in Robot Design and Intelligent Control: Proceedings of the 25th Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region (RAAD16)*, vol. 540 (pp. 438-448), 2016.
2. **S. Spasojević**, R. Ventura, J. Santos-Victor et al. Automatic Segmentation of Therapeutic Exercises Motion Data with a Predictive Event Approach. *New Trends in Medical and Service Robots 2016* (pp. 217-225). Springer International Publishing.
3. **S. Spasojević**, J. Santos-Victor, T. Ilić et. al. A Vision-Based System for Movement Analysis in Medical Applications: The Example of Parkinson Disease. *Computer Vision Systems 2015* (pp. 424-434). Springer International Publishing.
4. D. Katić, P. Radulović, **S. Spasojević** et al. Advanced Gesture and Pose Recognition Algorithms using Computational Intelligence and Microsoft KINECT Sensor. *New Trends in Medical and Service Robots 2014* (pp. 193-207). Springer International Publishing.
5. Rodić, B. Miloradović, S. Popić, **S. Spasojević** et al. Development of Modular Compliant Anthropomorphic Robot Hand. *New Trends in Medical and Service Robots 2014* (pp. 205-219). Springer International Publishing.

#### Kategorija M33:

1. **S. Spasojević**, N. Ilić, A. Rodić, J. Santos-Victor. Kinect-based application for progress monitoring of the stroke patients. In *Proceedings of IcETAN2017, IcETAN 2017, Kladovo, Serbia, June 2017, ROI2.6*, pp. 1-5.
2. **S. Spasojević**, M. Vujović, A. Rodić. Robot head motion control using hand gestures. In *Proceedings of IcETAN2015, IcETAN 2015, Srebrno jezero, Serbia, June 2015, ROI1.4*, pp. 1-5.
3. **S. Spasojević**, R. Ventura. Automatic gesture segmentation based on a predictive event segmentation approach. 19th edition of the Portuguese Conference on Pattern Recognition (RecPad), Lisbon, November, 2013.
4. **S. Spasojević**, M. Šušić, Ž. Đurović. Recognition and Classification of Geometric Shapes using Neural Networks. 11th Symposium on Neural Network Applications in Electrical Engineering (NEUREL), Belgrade, Serbia, September 2012 (pp. 71-76). IEEE.
5. M. Šušić, S. Maksimović, **S. Spasojević**, Ž. Đurović. Recognition and Classification of Deaf Signs using Neural Networks. 11th Symposium on Neural Network Applications in Electrical Engineering (NEUREL), Belgrade, Serbia, September 2012 (pp. 65-70). IEEE.

#### Kategorija M63:

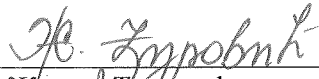
1. **S. Spasojević**, B. Karan. Application of Kinect-type sensor in acquisition of hand joint trajectories. *The 57th ETRAN Conference, Zlatibor, Serbia, Jun 2013, RO3.2* pp. 1-4.
2. **S. Spasojević**, S. Mitrović, M. Šušić, Ž. Đurović. Application of digital image processing for recognition of geometric shapes. 9th Conference of Digital speech and image processing, Kovacica, Serbia, October 2012, B1.4 pp. 1-4.
3. M. Šušić, S. Maksimović, **S. Spasojević**, Ž. Đurović. One approach for deaf signs recognition from digital images. 9th Conference of Digital speech and image processing, Kovacica, Serbia, October 2012, B1.6 pp. 1-4.
4. **S. Spasojević**, Ž. Đurović, "Recognition and classification of geometric shapes in 2D plane", *The 56th ETRAN Conference, Zlatibor, Serbia, Jun 2012, RO2.3* pp. 1-4.
5. M. Šušić, **S. Spasojević**, B. Karan. 3D data acquisition and practical calibration of Microsoft Kinect camera, *The 56th ETRAN Conference, Zlatibor, Serbia, Jun 2012, RO2.4* pp. 1-4.
6. **S. Spasojević**, M. Šušić. 3D reconstruction of the robot environment based on images obtained using stereo camera, *The 55th ETRAN Conference, Banja Vrucica, Bosnia and Herzegovina, Jun 2011, RO2.3* pp. 1-4.

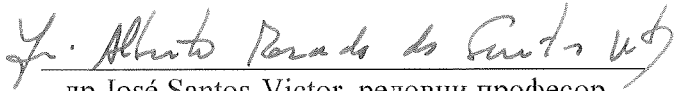
## 5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

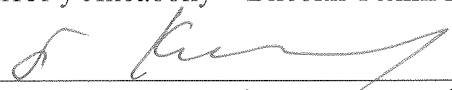
На основу свега изложеног, Комисија сматра да докторска дисертација кандидаткиње Софије Спасојевић испуњава све законске, формалне и суштинске услове, као и све критеријуме који се уобичајено примењују приликом вредновања докторске дисертације. Наведени научни доприноси у контексту предложеног комбинованог сензорског система за рехабилитацију код неуролошких болести се пре свега односе на развијени приступ за објективну евалуацију покрета уз нове предложене индикаторе перформансе покрета. Резултати истраживања у оквиру ове докторске дисертације се могу применити у клиничким протоколима рехабилитације као подршка традиционалној медицинској пракси. Узимајући у обзир све наведено, Комисија сматра да докторска дисертација Софије Спасојевић садржи оригиналне научне доприносе у области примене техника обраде сигнала, машинског учења и анализе података у медицини. Стога Комисија са задовољством предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да се докторска дисертација под називом "Квантитативна анализа покрета у рехабилитацији неуролошких поремећаја коришћењем визуелних и носивих сензора" прихвати, изложи на увид јавности и упуту на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.


Београд, 19.10.2017. године

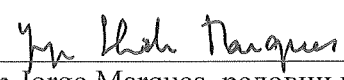
### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ


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

  
др José Santos-Victor, редовни професор  
Универзитет у Лисабону – Високи Технички Институт

  
др Бранко Ковачевић, редовни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

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

  
др Jorge Marques, редовни професор  
Универзитет у Лисабону – Високи Технички Институт

  
др Luís Alexandre, редовни професор  
Универзитет Beira Interior

## TO TEACHING-SCIENTIFIC COUNCIL

**Subject:** Report about completed doctoral dissertation of candidate Sofija Spasojević

By decision of Teaching-scientific council of the School of Electrical Engineering number 5014/11-3 from September, 22<sup>nd</sup>, 2017 and 5014/11-3/2 from October, 20<sup>th</sup>, 2017, we are selected as Committee members for examination, evaluation and defense of doctoral dissertation of candidate Sofija Spasojević with the title

**"Quantitative movement analysis in the rehabilitation of neurological disorders using vision and wearable sensors"**

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

### REPORT

#### 1. INTRODUCTION

##### 1.1. Chronology of approval and dissertation work

The candidate has submitted the thesis topic with the title „Quantitative movement analysis in the rehabilitation of neurological disorders using vision and wearable sensors“ to the Commission for the third-level studies at the School of Electrical Engineering, University of Belgrade on November, 3<sup>rd</sup>, 2016. Prof. dr Zeljko Djurovic and prof. dr Jose Santos-Victor are proposed as thesis supervisors in accordance with the bilateral program of doctoral studies between the School of Electrical Engineering, University of Belgrade and Instituto Superior Técnico, University of Lisbon.

Commission for the third-level studies considered the proposal of the thesis topic for dissertation work on its meeting organized on November, 8<sup>th</sup> 2016 and forwarded the proposal of the Committee for evaluation of the suitability of the thesis topic and candidate to the Teaching-scientific council.

Teaching-scientific council of the School of Electrical Engineering on its meeting organized on November, 15<sup>th</sup> 2016 (decision number 5014/11-1 from November, 24<sup>th</sup> 2016) declared the Committee for evaluation of the conditions and acceptance of the doctoral dissertation topic, composed from: prof. dr Branko Kovacevic, prof. dr Dejan Rakovic and scientific advisor dr Aleksandar Rodic.

On the meeting of Teaching-scientific council of the School of Electrical Engineering, organized on February, 14<sup>th</sup> 2017, the report of the Committee for evaluation of the conditions and acceptance of the doctoral dissertation topic has been accepted (decision number 5014/11-2 from February, 14<sup>th</sup> 2017).

Council of scientific areas of technical sciences of the University of Belgrade, on its meeting organized on February, 27<sup>th</sup> 2017 gave the consent to the proposal of doctoral dissertation topic with the title "Quantitative movement analysis in the rehabilitation of neurological disorders using vision and wearable sensors" (decision number 61206-871/2-17).

The candidate has submitted the doctoral dissertation for examination and evaluation on August, 31<sup>st</sup> 2017.

Commission for the third-level studies, on its meeting organized on September, 5<sup>th</sup> 2017, has confirmed the fulfillment of all necessary conditions for proposal submission to the Teaching-scientific council of the School of Electrical Engineering for forming the Committee for examination and evaluation of doctoral dissertation.

Teaching-scientific council of the School of Electrical Engineering, on its meetings organized on September, 12<sup>th</sup>, 2017 and October, 10<sup>th</sup> 2017, declared the Committee for examination and evaluation of doctoral dissertation, composed from: prof. dr Zeljko Djurovic (School of Electrical Engineering), prof. dr Jose Santos-Victor (Instituto Superior Técnico, University of Lisbon), prof. dr Branko Kovacevic (School of Electrical Engineering), scientific advisor dr Aleksandar Rodic (Mihailo Pupin Institute), prof. dr Jorge Marques (Instituto Superior Técnico, University of Lisbon), and prof. dr Luis Alexandre (University Beira Interior), decision numbers 5014/11-3 and 5014/11-3/2.

Based on the decision of the Teaching-Scientific 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 is 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.

## 1.2. Scientific areas of doctoral dissertation

The doctoral dissertation belongs to Technical sciences and research areas of signal processing, machine learning and computer vision, for which the School of Electrical Engineering, University of Belgrade and the Instituto Superior Técnico, University of Lisbon are specialized.

Thesis supervisor from the School of Electrical Engineering, University of Belgrade, prof. dr Zeljko Djurovic is full professor for scientific areas of signal processing and machine learning. Thesis supervisor from the Instituto Superior Técnico, University of Lisbon, prof. dr Jose Santos-Victor is full professor for scientific areas of computer vision and machine learning. Both supervisors are authors of large number of scientific papers in the international journals.

## 1.3. Biographical data

Sofija Spasojević, MSc in Electrical Engineering, is born on September, 7<sup>th</sup>, 1987 in Sabac, Republic of Serbia. She finished the primary and high school in Sabac as one of the best students. She enrolled the School of Electrical Engineering in Belgrade in the academic year 2006/2007. She graduated in 2010 at the Department for Systems and Signals with the average grade 8.91 and grade 10 at the graduate thesis. In the academic year 2010/2011 she enrolled the master studies on the School of Electrical Engineering in Belgrade. She finished master studies in 2011 with the average grade 10 and grade 10 at the master thesis. In the academic year 2011/2012 she enrolled the PhD studies on the School of Electrical Engineering in Belgrade at the Department for system control and signal processing. In January 2012, she got the employment at the Mihailo Pupin Institute, Laboratory for robotics, where she is employed also today at the position research associate. In July 2013 she started the bilateral doctoral program between the School of Electrical Engineering in Belgrade and the Instituto Superior Técnico in Lisbon.

Until now, she participated in one national project (III-44008: Design of Robot as Assistive Technology in Treatment of Children with Developmental Disorders, The Ministry of Education, Science and Technological Development of Republic of Serbia, 2011-2017) and five international projects of bilateral academic collaboration (1. CARE-robotics - Creative Alliance in Robotics Research and Education Focused on Medical and Service Robotics, supported by Swiss National Scientific Foundation, 2011-2014; 2. COLBAR - Synthesis of Collaborative Behavior Attributes

with Service Robots Based on Visually-Motor Human-Machine Interaction, project of bilateral academic collaboration between Mihailo Pupin Institute in Belgrade and Instituto Superior Técnico, Lisbon, Portugal, 2013-2014; 3. Researchers' night – FLIRT, supported by European research and development program (HORIZON 2020), 2014-2015; 4. Advanced perception and learning for cognitive heterogeneous robots, project of bilateral academic collaboration between Mihailo Pupin Institute in Belgrade and Jozef Stefan Institute, Ljubljana, Slovenia, 2015 and 5. ERobots - Emotionally Intelligent Robots: Building attributes of artificial emotional intelligence aimed to make robots feel and sociable as humans, supported by Research Group Linkage Program, Alexander von Humboldt Foundation in collaboration with the Institute for Informatics, University of Kaiserslautern, Germany, 2015-2017).

Research areas of candidate Sofija Spasojevic are signal processing, machine learning, data analysis and computer vision. Results of her research are published through eighteen papers: two papers in international journals, five book chapters, five papers presented at international conferences and six papers presented at domestic conferences.

## **2. DESCRIPTION OF DISSERTATION**

### 2.1. Dissertation content

Dissertation with the title “Quantitative movement analysis in the rehabilitation of neurological disorders using vision and wearable sensors” is written on 107 pages in English language due to the bilateral doctoral program with the Instituto Superior Técnico, University of Lisbon. Dissertation is organized in the following seven chapters: 1. Introduction; 2. Background and Related Work; 3. Quantitative assessment of the full-body movements in Parkinson's disease using Kinect device; 4. Quantitative assessment of the hand movements in Parkinson's disease using the data glove; 5. Quantitative assessment of the arm / hand movements in Parkinson's disease using wireless armband device; 6. Kinect and EMG-based quantitative approach for progress monitoring of the stroke patients 7. Conclusions and future work. At the beginning of dissertation, the Abstract in English, Portuguese and Serbian language, Acknowledgement, List of acronyms and Contents are written. After the last chapter, the reference list is presented with 155 references listed by the surname of the author and Curriculum vitae of the candidate.

### 2.2. A brief of overview of thesis chapters

The introductory chapter consists of three parts. The first part describes the motivation for research carried out in the thesis, as well as the subject and importance of the research. The research subject is the development of the sensory system and approach for the analysis and quantification of rehabilitation movements of patients suffering from neurological diseases (Parkinson's disease and stroke). Evaluation of patients' output during the movement performance at Parkinson's disease and stroke is based on the subjective evaluations of neurologists and therapists and imprecise clinical scales, which only medical experts can interpret. On the other hand, conventional rehabilitation therapy often involves a long, exhausting and tedious recovery process, from which patients can easily give up. As a consequence of the above mentioned facts, there is a clear need of introducing new sensory techniques into the traditional diagnostic, monitoring and rehabilitation procedure. This would increase patient motivation during the therapy and improve the quality of neurologists' and therapists' evaluations using objective approaches. A brief overview of the sensory systems and methods used for the acquisition and analysis of rehabilitation movements so far is presented. This section lists the main goals of this dissertation: (1) Developing an affordable and portable rehabilitation sensory system, suitable for use in home environment; (2) Developing the approach for movement quantification and (3) Design of new movement performance indicators (MPIs) extracted from the sensor signals.

In the second part of the introductory chapter, the medical background of the Parkinson's disease and stroke is presented. The basic disease symptoms, the treatment and the course of recovery are described. Different stages of the disease and clinical methods, which doctors and therapists use to

monitor the patients' condition, have been explained. This information is of great importance for the development of the approach for movement quantification, and in particular for the design of movement performance indicators that reflect the disease symptoms.

The third part of the introductory chapter provides the thesis structure and a brief description of topics that will be discussed in the following chapters.

The second chapter presents the state of the art and describes the relevant studies in the context of research conducted in the doctoral dissertation. An overview of the various types of sensors and sensor systems used for the movement acquisition is presented – vision-based sensors (with markers placed on the body and without markers) and wearable sensors that are attached to the arm or hand. Sensory systems used specifically in the Parkinson's disease and stroke for the following groups of movements are analyzed: (1) gait and large range upper body movements, and (2) arm/hand movements. The special emphasis is on methods for extracting the relevant features from the sensor signals. The disadvantages of the existing rehabilitation systems and the limitations of the methods for the sensor signal processing towards delivering the movement performance indicators are successfully addressed. It is explained how the research in this doctoral dissertation overcomes the disadvantages and limitations of relevant studies in terms of: (1) the use of the combined sensor system intended to include all movements of interest for the particular neurological disorder, and (2) defining the new, clinically oriented movement performance indicators for an objective evaluation of the patient performance.

The third chapter focuses on the quantification of the gait and large range upper body movements based on the data from Kinect device for Parkinson's patients. The Kinect device is a vision-based sensor that uses the technique without markers for data collection. During the movement performance, Kinect collects 3D coordinates for 15 characteristic joints, whether the video sequences can be recorded, as well. Movement performance indicators, derived from the sensor data, are defined in agreement with neurologists and therapists and they are divided into two groups: (1) standard movement performance indicators that are calculated using outdated techniques (speed and range of motion) and (2) newly-proposed indicators, clinically oriented and Parkinson's disease-specific (symmetry ratio and rigidity measure). The proposed movement performance indicators have been tested for identifying clinical groups of interest (healthy subjects / patients and different disease stages). It has been shown that MPIs derived from the Kinect data can successfully classify patients and controls, but not different stages of the disease. The reason lies in the fact that the Parkinson's disease symptoms are more visible in the hand movements than in the gait and large range movements. Therefore, in the next chapter, the emphasis is on the quantification of the hand movements.

During the experiments, patients' movements are collected in sequences of several consecutive repetitions, but they are analyzed individually. Consequently, a method for automatic motion segmentation, based on the event detection and Gaussian processes is proposed within this chapter.

The fourth chapter deals with the evaluation of the hand movements in Parkinson's patients using the data glove. Data glove outputs angular data for eighteen hand and finger joints. Extracted movement performance indicators that characterize hand movements are obtained in two ways: (1) directly from the sensor signals or after the signal processing and (2) indirectly - using the hand model, which is also used for visualization and verification of the sensor data. After the formation of the preliminary set of movement performance indicators, they are analyzed according to the following criteria: (1) internal consistency and reliability of measurements; (2) statistical evaluation according to demographic and clinical parameters; (3) identifying clinical groups of interest (healthy subjects/patients and different disease stages) and (4) correlation with clinical scales. Indicators that do not meet the statistical criteria are excluded from further analysis. The remaining indicators refer to the range of metacarpal and proximal finger joints, the angular velocity of the abduction sensors (located between the fingers), and the velocity and acceleration parameters derived from the hand model. Groups of indicators, relevant for each of the above-mentioned criteria are identified. Sensor glove data are more informative than Kinect data, demonstrating the possibility of classification between the disease stages, as well.



The fifth chapter concludes the movement evaluation of Parkinson's patients by analyzing the arm/hand movements. Arm/hand movements are recorded using a wireless armband sensor that is placed on the forearm. The device provides muscle activity data (from eight EMG channels) and inertial data (from an accelerometer, gyroscope, and magnetometer). Due to the high cost of the data glove described in the previous chapter and its right-hand design, the wireless armband sensor is considered as suitable, affordable alternative for the data glove. In addition, clinical protocols in Parkinson's disease include testing and evaluation of the arm/hand movements, and the impaired muscle activity is one of the Parkinson's disease characteristics. In addition to the arm/hand movement quantification, the emphasis in this chapter is on the objective evaluation of the bradykinesia symptom (slow movements) and the assessment of the performance differences between healthy and affected hand. Since EMG signals are highly non-stationary, they are processed using a window approach, whereby the indicators are counted within each window. The same approach was applied to signals from accelerometer and gyroscope. In such way, the time evolution of indicators during the movement is obtained. At the end of the chapter, the most relevant movement performance indicators are identified, according to the clinical criteria of interest.

In the previous three chapters, the emphasis was on the movement analysis and quantification in Parkinson's disease patients. The sixth chapter deals with an objective movement evaluations in stroke patients. The concept of motion analysis is different due to the disease specifics and recovery process. Patients who survived the stroke, with an adequate rehabilitation therapy, can achieve significant improvements in a short time interval. Therefore, the analysis is patient-oriented and focused only on the progress monitoring over time. The two groups of the examined movements are large range upper body movements acquired with the Kinect and arm/hand movements collected using the wireless armband sensor. Some of the proposed movement performance indicators are the same as in the case of Parkinson's patients. Additionally, new movement performance indicators, that are specific for the treatment of the stroke, are proposed. Along with the identification of movement performance indicators for the relevant clinical criteria, the application for storage, visualization, and interpretation of the sensor measurements has been developed. The application includes personal patient profiles in order to monitor their condition and to allow the application of the system in home rehabilitation.

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

### **3. DISSERTATION EVALUATION**

#### 3.1. Contemporaneity and originality

Parkinson's disease and stroke are the leading causes of motor disability and the most common neurological disorders after Alzheimer's disease. The stroke is generally the second most common cause of death and the third, taking into account the countries of the developed world. Early diagnosis, appropriate rehabilitation therapy, and adequate monitoring can significantly improve the patient's condition and enable a better quality of life. Conventional rehabilitation therapy in a hospital setting implies a long-lasting, exhausting and tedious recovery process, from which patients can easily give up. The assistance of other people to patients is often necessary, which increases total costs. On the other hand, the assessment of patients' condition in Parkinson's disease and stroke is based on the subjective evaluations of neurologists and therapists and imprecise clinical scales.

As a consequence of the above-mentioned facts, there is a clear need of introducing new sensory techniques into the procedures of traditional diagnostics, monitoring, and rehabilitation. They would improve the quality of neurologists' and therapists' evaluations using objective approaches, while providing the possibility of home rehabilitation. Therefore, in recent years, the application of sensory systems and information technologies in medicine is a very actual topic. Such technologies

have only recently been considered for inclusion into medical protocols. The evidences for the contemporaneity of the topic are also numerous scientific meetings and multidisciplinary journals focused on this topic, as well as an increasing number of European projects that fund such research topics, given the significant impact on society.

The originality of this doctoral dissertation is based on the research results and contributions that go beyond the framework of previous studies. One of the contributions of this thesis, in relation to other studies dealing with similar topics, is the proposal of an affordable, combined rehabilitation system for the analysis of all relevant groups of rehabilitation movements for the particular neurological disease. Another significant contribution relates to the proposal of new movement performance indicators that have not been considered in the literature so far. The proposed indicators are extracted from the sensory signals, defined in agreement with the doctors, and are specific to the particular neurological disorder. They are correlated with clinical scales and are also relevant to other clinical criteria. Finally, in order to monitor the condition of the patient after a stroke, an interactive rehabilitation system is proposed along with the motion evaluation method, which could be used in both, the hospital and home environments.

### 3.2. Review of the used literature

In this doctoral dissertation, the analyzed literature is extensive and relevant. A total of 155 bibliographic references have been cited. The literature is mostly composed of the recent studies, since the used sensor technologies have appeared on the market only a few years ago. This fact additionally confirms the actuality of the topic and research in this doctoral thesis. The list of literature includes papers related to the thesis research that the candidate has published as an author or co-author.

Papers [1-4] give the insight about medical aspects of Parkinson's disease and stroke and official clinical protocols used during the treatment. An overview of the sensor systems used for the movement acquisition, with an emphasis on systems used in rehabilitation, is given in [5-8]. Affordable visual systems without markers are described in [9-11]. It has been shown that such systems have a satisfactory accuracy for rehabilitation applications [11, 12]. Some examples of rehabilitation systems and approaches for movement quantification based on the Kinect device are described in [13, 14]. However, an insufficient number of studies deal with a specific case of Parkinson's disease [15, 16] and stroke [17, 18].

Isolated sensors whose output signals are used to quantify fine hand and finger movements are described in [19-23], while the sensor gloves used for these purposes are listed and analysed in [24, 25].

The wireless bracelet is the newest of all sensors intended for the sensor system. It has appeared on the market recently, and there are only a few conceptual studies [26, 27] in which the authors have tested it for the movement acquisition. The particular application of this sensor in the treatment of patients after a stroke was considered in [28, 29].

1. Jankovic J. Parkinson's disease: clinical features and diagnosis. *J Neurol, Neurosurgery and Psychiatry* 2008; 79 (4): 368–376.
2. Goetz C, Poewe W, Rascol O, et al. Movement Disorder Society Task Force report on the Hoehn and Yahr staging scale: Status and Recommendations, *Mov Disord* 2004; 19(9): 1020-1028.
3. Goetz C, Tilley B, Shaftman S, et al. Movement Disorder Society-Sponsored Revision of the Unified Parkinson's Disease Rating Scale (MDS-UPDRS): Scale Presentation and Clinimetric Testing Results. *Mov Disord* 2008; 23 (15): 2129-2170.
4. Fugl-Meyer AR, Jaasko L, Leyman I, and et al. The post-stroke hemiplegic patient. I. a method for evaluation of physical performance. *Scandinavian journal of rehabilitation medicine*, 7(1):13-31, 1974.
5. Stamford JA, Schmidt PN, Friedl KE. What Engineering Technology Could Do for Quality of Life in Parkinson's Disease: A Review of Current Needs and Opportunities. *IEEE J Biomed Health Inform* 2015; 19 (6): 1862-1872.
6. Zhou H, Hu H. Human motion tracking for rehabilitation – A survey. *Biomed Signal Process Control* 2008; 3 (1): 1–18.

7. Parisi F, Ferrari G, Giuberti M, et al. Body-Sensor-Network-Based Kinematic Characterization and Comparative Outlook of UPDRS Scoring in Leg Agility, Sit-to-Stand, and Gait Tasks in Parkinson's Disease. *IEEE J Biomed Health Inform* 2015; 19 (6): 1777-1793.
8. Patel S, Park H, Bonato P, et al. A review of wearable sensors and systems with application in rehabilitation. *J Neuroeng Rehabil* 2012; 9:21.
9. Gonzalez-Jorge H, Riveiro B, Vazquez-Fernandez E, et al. Metrological evaluation of Microsoft Kinect and Asus Xtion sensors. *Measurement* 2013; 46 (6): 1800-1806.
10. Gonçalves AR, Gouveia ER, Cameirão MS, et. al. Automating senior fitness testing through gesture detection with depth sensors. *IET International Conference on Technologies for Active and Assisted Living (TechAAL)*; 2015 Nov. 5; London, UK.
11. Antón D, Goñi A, Illarramendi A. Exercise Recognition for Kinect-based Telerehabilitation. *Methods Inf Med* 2015; 54 (2): 145-155.
12. Khoshelham K, Elberink S. Accuracy and resolution of Kinect depth data for indoor mapping applications. *Sensors* 2012; 12 (2): 1437-1454.
13. Chang Y, Han W, Tsai Y. A Kinect-based upper limb rehabilitation system to assist people with cerebral palsy. *Res Dev Disabil* 2013; 34 (11): 3654-3659.
14. Gama A, Chaves T, Figueiredo L, et al. Guidance and Movement Correction Based on Therapeutics Movements for Motor Rehabilitation Support Systems. 14th Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR); 2012 May 28-31; Rio de Janeiro, Brasil. *IEEE*; 2012. pp. 191-200.
15. Galna B, Barry G, Jackson D, et al. Accuracy of the Microsoft Kinect sensor for measuring movement in people with Parkinson's disease. *Gait and Posture* 2014; 39 (4): 1062-1068.
16. Galna B, Jackson D, Schofield G, et al. Retraining function in people with Parkinson's disease using the Microsoft Kinect: game design and pilot testing. *J Neuroeng Rehabil* 2014; 11-60.
17. Esfahlani SS and Thompson T. Intelligent physiotherapy through procedural content generation. In *Twelfth Artificial Intelligence and Interactive Digital Entertainment Conference*, 2016.
18. Bao X, Mao Y, Lin Q, et al. Mechanism of kinect-based virtual reality training for motor functional recovery of upper limbs after subacute stroke. *Neural regeneration research*, 8(31):2904, 2013.
19. LeMoyne R, Coroian C, Mastroianni T. Quantification of Parkinson's disease characteristics using wireless accelerometers. *International Conference on Complex Medical Engineering (ICME)*; 2009 April 9-11; Tempe, AZ. *IEEE*; 2009. pp. 1-5.
20. Salarian A, Russmann H, Wider, C, et al. Quantification of tremor and bradykinesia in Parkinson's disease using a novel ambulatory monitoring system. *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 2007; 54 (2): 313-322.
21. Shima K, Tsuji T, Kandori A, et al. Measurement and Evaluation of Finger Tapping Movements Using Log-linearized Gaussian Mixture Networks. *Sensors* 2009; 9 (3): 2187-2201.
22. Niazmand K, Tonn K, Kalaras A, et al. Quantitative Evaluation of Parkinson's Disease using sensor based smart Glove. 24th International Symposium on Computer-Based Medical Systems (CBMS); 2011 June 27-30; Bristol, UK. *IEEE*; 2011. pp. 1-8.
23. Hanson M, Powell H, Frysinger R, et al. Teager Energy Assessment of Tremor Severity in Clinical Application of Wearable Inertial Sensors. *IEEE/NIH Life Science Systems and Applications Workshop (LISA)*; 2007 Nov. 8-9; Bethesda, MD. *IEEE*; 2007. pp. 136-139.
24. Su Y, Allen CR, Geng D, et al. 3-D Motion System ("Data-Gloves"): Application for Parkinson's disease. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2003; 52 (3): 662-674.
25. Morrow K, Docan C, Burdea G, et al. Low-cost Virtual Rehabilitation of the Hand for Patients Post-Stroke. *International IEEE Workshop on Virtual Rehabilitation* 2006; New York, NY. *IEEE*; 2006. pp. 6-10.
26. S. Mithileysh and R. Sharanya. Myo armband for physiotherapy healthcare: A case study using gesture recognition application. In *Proceedings of the 8th International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS)*, pages 1-6, 2016.
27. AM. Qamar, Khan AR., SO. Husain, and et al. A multi-sensory gesture-based occupational therapy environment for controlling home appliances. In *Proceedings of the 5th ACM on International Conference on Multimedia Retrieval*, pages 671-674, 2015.
28. Hidayat AA, Zainal A. and Happyanto DC. Lovett scaling with flex sensor and myo armband for monitoring finger muscles therapy of poststroke people. *EMITTER International Journal of Engineering Technology*, 3(2), 2016.
29. Oboe R, Tonin A, Koyo Y, et al. Robotic finger rehabilitation system for stroke patient using surface emg armband. In *Industrial Electronics Society, IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE*, pages 785-790. *IEEE*, 2016.

### 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:

- Data acquisition methods during experiments performance: the precondition for data acquisition is the sensor calibration. Each of the employed sensors has a defined calibration

procedure. After the calibration, the acquisition of the movements is performed based on the defined protocols. Experiments are conducted in the clinical environment including patients with Parkinson disease, stroke patients and the adequate control group of healthy subjects.

- Methods of the signal preprocessing: (1) Signal filtering in order to remove the measurement noise; (2) Segmentation – in the case of some sensors, the movements are repeated few times and stored in one signals, but they are analyzed separately. Consequently, the segmentation algorithm is applied in order to divide the signal into the corresponding movement units.
- Feature extraction methods (i.e. extraction of the movement performance indicators (MPI) from the sensor signals): (1) The direct approach - MPIs extraction directly from the generated sensor signal or from the signal after additional processing; (2) The indirect approach – extracting the MPIs from the hand model based on the parameter estimation – this method applies only in the case of MPIs extracted from the signals collected using the sensor glove; (3) Window approach: This method implies the division of the signal to sliding windows and calculating the particular MPI value inside each window. The main benefit of the window analysis is the temporal evolution of MPIs during the movement. This approach has been applied to the signals obtained from the wireless bracelet – EMG signals and signals from the accelerometer and gyroscope.
- Feature selection methods (i.e. the selection of MPIs): During the feature extraction procedure, it may appear that certain MPIs are not relevant or have a negligible effect on the particular analysis or defined problem. Therefore, the techniques of the feature selection are applied, in order to maintain only the highly relevant MPIs.
- Statistical methods: The statistical methods are applied through the statistical analysis between groups of interest (patients and control subjects, as well as the different disease stage groups) in the context of the extracted MPIs.
- Machine learning methods: Decision-making systems for supporting the diagnosis and monitoring evaluations are based on the obtained feature vectors (MPIs organized into corresponding vectors) and designed using appropriate classifiers. In addition, techniques for the dimensionality reduction of the feature vectors are applied, in order to examine the performance of the classifiers in the new space of reduced dimensions and determine the MPIs with the greatest impact on the classification between groups of interest.
- Correlation examination: A very important issue in the clinical studies, which suggest alternative techniques and the use of new indicators of patient's performance (in this case MPIs), is the examination of a correlation between the newly-proposed MPIs and valid clinical scales and tests.
- Design of the software application as an integral part of the rehabilitation system: The application is intended for storing, visualization and interpretation of the sensor data and movement performance indicators. The application includes personal patient profiles for the insight about patients' condition over time and to enable the system usage in the home rehabilitation. Additionally, the constant communication between doctors and patients would be enabled through this application.

#### 3.4. Applicability of the dissertation results

The proposed sensor system and developed methods for quantification and objective evaluation of the rehabilitation movements have great potential for application in clinical protocols. Common medical practice implies the use of subjective methods and imprecise clinical scales and tests by doctors for assessing patients' condition. Hence, the use of sensory technologies and objective approaches would provide significant support to medical practice and traditional rehabilitation therapy.

Methods of identifying the relevant movement performance indicators have been experimentally verified for Parkinson's patients and patients recovering from the stroke. However, the same concept, with slightly adaptations can be applied to other types of neurological and motor disorders. A very significant application of the doctoral dissertation results is reflected in the possibility of using the system together with the approach for movement quantification in home rehabilitation. Recent years, the concept of home rehabilitation has become more and more prominent, given the limited mobility of patients and the overall cost of rehabilitation therapy in a hospital setting. The research results have arisen from a constant collaboration with doctors and they are based on the data collected during experiments with patients. However, for the inclusion of the proposed methods into clinical protocols, additional tests, as well as the opinions of medical experts and corresponding approvals of the competent institutions, need to be provided.

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

Candidate Sofija Spasojević has fully demonstrated the ability for independent scientific work by completion of this doctoral dissertation and publication of eighteen 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 existing approaches. The topic of the dissertation is very actual and multidisciplinary, while the dissertation results have a great potential for practical applications of sensor technologies in medical practice and rehabilitation therapy. 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 thesis are the following:

- Review and systematization of the existing vision-based and wearable-based rehabilitation systems, with special emphasis on the ones applied in Parkinson's disease and for recovery after stroke.
- The development of the low-cost, portable and wireless sensor system, suitable for home rehabilitation, safe and comfortable for use in patients.
- Developing approaches (algorithms) for the movement analysis and quantification:
  - The use of novel, more precise techniques to access the existing rehabilitation measures (e.g. the movement speed and range of motion);
  - Proposal of new relevant movement features in order to describe the movements (movement performance indicators - MPIs);
  - The development of an algorithm for extracting MPIs directly from the sensor signals or after application of appropriate signal processing techniques;
- Determining the relevance of the extracted MPIs for a specific neurological disorder in the terms of the correlation testing between the proposed MPIs and valid clinical tests and scales for a particular neurological disorder.
- The design of a decision-making system among clinical groups of interest (control group and patients and different disease stages), based on a defined set of MPIs.
- The development of new techniques to support the clinical evaluations during diagnosis and monitoring of patients.

### 4.2. Critical analysis of the research results

The main advantages of the sensor rehabilitation system proposed in this dissertation compared to the systems considered in the previous studies are affordability, portability and combined sensor data for the objective evaluation of all movements of interest for a specific neurological disorder. Relevant studies mainly focus on a particular group of movements and use isolated sensors that cannot adequately describe patient movements.

The major contribution of the thesis is the proposal of new movement performance indicators, so far not considered in the available literature. The suggested indicators reflect the disease symptoms and can be used to support clinical evaluations for diagnostics and monitoring purposes. Additionally, they are in correlation with clinical tests and scales, which is a necessary condition for their possible inclusion into clinical protocols. Movement performance indicators are obtained based on newly proposed algorithms of the sensor signal processing.

The majority of studies lack the strategies for inclusion sensory measurements into clinical protocols and experimental verification of the obtained results. In this thesis, the suggested ways in which movement performance indicators can improve clinical evaluations are the following: (1) design of decision-making system between clinical groups of interest (patients and control group and different disease stages); (2) an objective assessment of the performance differences between healthy and affected hand; and (3) the development of an interactive application for the storage, visualization and interpretation of sensory measurements that can be used by patients in home rehabilitation and by doctors in hospital settings. All obtained results were derived from experimental data - sensory and clinical measurements on a sample of more than 50 patients.

One of the disadvantages of the research results presented in this dissertation is a need for more extensive verification of the proposed methods that would involve a significantly larger number of patients and more time distance experiments. We hope that the results conducted within this doctoral dissertation will find a way to the medical practice of rehabilitation of patients suffering from Parkinson's disease and in the rehabilitation of patients after the experienced stroke and that the time will testify about the applicability and purposefulness of such methods.

#### 4.3. Verification of scientific contributions

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

##### Category M22:

1. **S. Spasojević**, T. Ilić, S. Milanović, V. Potkonjak, A. Rodić, and J. Santos-Victor. Combined vision and wearable sensors-based system for movement analysis in rehabilitation. In *Methods of Information in Medicine journal*, 56(2):95-111, 2017. (IF=1.772), (ISSN: 0026-1270), (DOI: 10.3414/ME16-02-0013). Schattauer.
2. **S. Spasojević**, T. Ilić, I. Stojković, V. Potkonjak, A. Rodić, and J. Santos-Victor. Quantitative Assessment of the Arm/Hand Movements in Parkinson's Disease Using a Wireless Armband Device. *Frontiers in Neurology*, 8(388):1-15, 2017. (IF=3.552), (ISSN: 1664-2295), (DOI: 10.3389/fneur.2017.00388).

##### Category M14:

1. A. Rodić, Đ. Urukalo, M. Vujović, **S. Spasojević** et al. Embodiment of Human Personality with EI-Robots by Mapping Behaviour Traits from Live-Model. *Advances in Robot Design and Intelligent Control: Proceedings of the 25th Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region (RAAD16)*, vol. 540 (pp. 438-448), 2016.
2. **S. Spasojević**, R. Ventura, J. Santos-Victor et al. Automatic Segmentation of Therapeutic Exercises Motion Data with a Predictive Event Approach. *New Trends in Medical and Service Robots 2016* (pp. 217-225). Springer International Publishing.

3. **S. Spasojević**, J. Santos-Victor, T. Ilić et. al. A Vision-Based System for Movement Analysis in Medical Applications: The Example of Parkinson Disease. *Computer Vision Systems 2015* (pp. 424-434). Springer International Publishing.
4. D. Katić, P. Radulović, **S. Spasojević** et al. Advanced Gesture and Pose Recognition Algorithms using Computational Intelligence and Microsoft KINECT Sensor. *New Trends in Medical and Service Robots 2014* (pp. 193-207). Springer International Publishing.
5. A. Rodić, B. Miloradović, S. Popić, **S. Spasojević** et al. Development of Modular Compliant Anthropomorphic Robot Hand. *New Trends in Medical and Service Robots 2014* (pp. 205-219). Springer International Publishing.

#### Category M33:

1. **S. Spasojević**, N. Ilić, A. Rodić, J. Santos-Victor. Kinect-based application for progress monitoring of the stroke patients. In *Proceedings of IcETAN2017, IcETAN 2017, Kladovo, Serbia, June 2017, ROI2.6*, pp. 1-5.
2. **S. Spasojević**, M. Vujović, A. Rodić. Robot head motion control using hand gestures. In *Proceedings of IcETAN2015, IcETAN 2015, Srebrno jezero, Serbia, June 2015, ROI1.4*, pp. 1-5.
3. **S. Spasojević**, R. Ventura. Automatic gesture segmentation based on a predictive event segmentation approach. 19th edition of the Portuguese Conference on Pattern Recognition (RecPad), Lisbon, November, 2013.
4. **S. Spasojević**, M. Šušić, Ž. Đurović. Recognition and Classification of Geometric Shapes using Neural Networks. 11th Symposium on Neural Network Applications in Electrical Engineering (NEUREL), Belgrade, Serbia, September 2012 (pp. 71-76). IEEE.
5. M. Šušić, S. Maksimović, **S. Spasojević**, Ž. Đurović. Recognition and Classification of Deaf Signs using Neural Networks. 11th Symposium on Neural Network Applications in Electrical Engineering (NEUREL), Belgrade, Serbia, September 2012 (pp. 65-70). IEEE.

#### Category M63:

1. **S. Spasojević**, B. Karan. Application of Kinect-type sensor in acquisition of hand joint trajectories. The 57th ETRAN Conference, Zlatibor, Serbia, Jun 2013, RO3.2 pp. 1-4.
2. **S. Spasojević**, S. Mitrović, M. Šušić, Ž. Đurović. Application of digital image processing for recognition of geometric shapes. 9th Conference of Digital speech and image processing, Kovacica, Serbia, October 2012, B1.4 pp. 1-4.
3. M. Šušić, S. Maksimović, **S. Spasojević**, Ž. Đurović. One approach for deaf signs recognition from digital images. 9th Conference of Digital speech and image processing, Kovacica, Serbia, October 2012, B1.6 pp. 1-4.
4. **S. Spasojević**, Ž. Đurović, "Recognition and classification of geometric shapes in 2D plane", The 56th ETRAN Conference, Zlatibor, Serbia, Jun 2012, RO2.3 pp. 1-4.
5. M. Šušić, **S. Spasojević**, B. Karan. 3D data acquisition and practical calibration of Microsoft Kinect camera, The 56th ETRAN Conference, Zlatibor, Serbia, Jun 2012, RO2.4 pp. 1-4.
6. **S. Spasojević**, M. Šušić. 3D reconstruction of the robot environment based on images obtained using stereo camera, The 55th ETRAN Conference, Banja Vrucica, Bosnia and Herzegovina, Jun 2011, RO2.3 pp. 1-4.

## 5. CONCLUSION AND PROPOSAL

Based on all items mentioned above, the Committee considers that doctoral dissertation of candidate Sofija Spasojević fully meets all legal, formal and essential requirements, as well as all criteria that are usually applied when evaluating the doctoral dissertation. Specified expected and attained scientific contributions made by doctoral candidate, in the

context of the proposed combined sensor system for rehabilitation in neurological disorders primarily relate to the developed approach for objective movement evaluation based on the newly proposed movement performance indicators. Research results from this doctoral dissertation can be applied in clinical rehabilitation protocols to support the traditional medical practice. Taking all this into account, the Commission considers that the dissertation of Sofija Spasojevic contains original scientific contributions in the field of application of signal processing techniques, machine learning and data analysis in medicine. Therefore, the Commission is pleased to propose to the Teaching-Scientific Council of the Faculty of Electrical Engineering, University of Belgrade to accept the doctoral dissertation entitled "Quantitative analysis of movements in the rehabilitation of neurological disorders using visual and wearable sensors", present it to the public and forward it for the final acceptance to the Council of scientific areas of technical sciences of University of Belgrade.

Belgrade, October, 19<sup>th</sup> 2017.

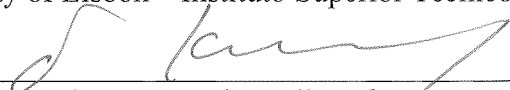
#### COMMITTEE MEMBERS




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



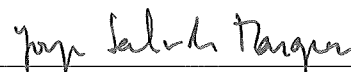
dr José Santos-Victor, Full professor  
University of Lisbon – Instituto Superior Técnico



dr Branko Kovačević, Full professor  
University of Belgrade – School of Electrical Engineering



dr Aleksandar Rodić, Research Fellow  
University of Belgrade – Mihailo Pupin Institute



dr Jorge Marques, Associate professor  
University of Lisbon – Instituto Superior Técnico



dr Luís Alexandre, Full professor  
University Beira Interior