

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Подобност теме и кандидаткиње Софије С. Спасојевић за израду докторске дисертације

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета бр. 5014/11-1 од 24.11.2016, године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидаткиње Софије Спасојевић за израду докторске дисертације и научне заснованости теме **„Квантитативна анализа покрета у рехабилитацији неуролошких поремећаја коришћењем визуелних и носивих сензора”** (енг. „Quantitative movement analysis in the rehabilitation of neurological disorders using vision and wearable sensors”).

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидаткиње, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Софија Спасојевић, мастер инжењер електротехнике, рођена је 07.09.1987. године у Шапцу, Република Србија, од оца Слободана и мајке Вере. 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.

У оквиру билатералних академских пројеката боравила је на Високом Техничком Институту у Лисабону, Институту Јожеф Штефан у Љубљани и Истраживачкој лабораторији за роботiku Универзитета Кајзерслаутерн у Немачкој.

1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Области научног истраживања кандидаткиње обухватају компјутерску визију, обраду сигнала и машинско учење. У оквиру ових области Софија Спасојевић је до сада учествовала на следећим пројектима:

Рд. бр.	Пројекат	Институције	Време трајања пројекта
1.	Пројекат ИИИ-44008: Развој робота као средства за превазилажење препрека у развоју деце са поремећајима. Министарство образовања, науке и технолошког развоја Републике Србије.	Институт Михајло Пупин и партнерске институције из Србије	(2011-2016)
2.	Swiss National Scientific Foundation SNSF IP SCOPES project “Creative Alliance in Robotics Research and Education Focused on Medical and Service Robotics (CARE-robotics)” , Project ID: IZ74Z0_137361/1, SNSF SCOPES IP	Институт Михајло Пупин и партнерске институције из Швајцарске и Румуније	(2011-2014)
3.	Synthesis of Collaborative Behavior Attributes with Service Robots Based on Visually-Motor Human-Machine Interaction (COLBAR) , Bilateral reserch project between Serbia and Portugal, Ministry of Education, Science and Technology of Republic Serbia and Ministry of Science of Portugal	Институт Михајло Пупин и Високи Технички Институт, Лисабон, Португалија	(2013-2014)
4.	European research and development program HORIZON 2020, Coordination support activity project “Researchers’ night - FLIRT” , EU Commission	Институт Михајло Пупин и партнерске институције из Србије	(2014-2015)
5.	International project of bilateral academic collaboration with Jožef Štefan Institute (Ljubljana, Slovenia): Advanced perception and learning for cognitive heterogeneous robots.	Институт Михајло Пупин и Институт Јожеф Штефан, Љубљана, Словенија	(2015)
6.	Research Group Linkage Program, Alexander von Humboldt Foundation, “Building attributes of artificial emotional intelligence aimed to make robots feel and sociable as humans (Emotionally Intelligent Robots - EIrobots)” , Contract no. 3.4-IP-DEU/112623, University of Kaiserslautern, Institute for informatics, Robotics department.	Институт Михајло Пупин и Универзитет Кајзерслаутерн, Немачка	(2015-2017)

На Електротехничком факултету у Београду положила је свих 10 испита предвиђених планом и програмом докторских студија са просечном оценом 10,00:

Рд. бр.	Назив испита	Оцена	ЕСПБ
1	Вештачка интелигенција	10	9
2	Технике обраде и препознавања говорног сигнала	10	9
3	Теорија роботских система	10	9
4	Класификација и естимација сигнала	10	9
5	Неуралне мреже	10	9
6	Софтверски системи за рад у реалном времену	10	9
7	Оптимални и адаптивни стохастички системи	10	9
8	Интелигентни роботски системи	10	9
9	Специјални роботски системи	10	9
10	Енглески језик	10	6
	Назив обавезе		
1	Студијски истраживачки рад I		15
2	Студијски истраживачки рад II		15
3	Научно стручни рад		3

На Високом Техничком Институту у Лисабону положила је два испита са оценом 17 и 18 (од 20):

Рд. бр.	Назив испита	Оцена	ЕСПБ
1	Естимација и класификација	17	6
2	Биометрија	18	6

Досадашњи резултати кандидаткиње Софије Спасојевић су приказани кроз публиковане радове и то: 1 рад у научном часопису међународног значаја (са импакт фактором), 4 рада у поглављима монографије међународног значаја, 4 рада штампана у зборницима међународних научних скупова, и 6 радова штампаних у зборницима научних скупова од националног значаја.

Радови у научним часописима међународног значаја:

1. (M21 – IF 2.248 за 2014.) S. Spasojević, T. Ilić, S. Milanović et. al. Combined vision and wearable sensors-based system for movement analysis in rehabilitation. Methods of Information in Medicine journal. (ISSN: 0026-1270, DOI: <https://doi.org/10.3414/ME16-02-0013>)

Радови у поглављима монографије међународног значаја:

1. (M14) 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 (ISSN: 2211-0984).
2. (M14) 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 (ISSN: 0302-9743).
3. (M14) 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 (ISSN: 2211-0984).
4. (M14) 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 (ISSN: 2211-0984).

Радови у зборницима међународних научних скупова:

1. (M33) **S. Spasojević**, M. Vujović, A. Rodić. Robot head motion control using hand gestures. Zbornik radova sa 2. IcETRAN konferencije, Srebrno jezero, Srbija, Jun 2015, RO11.4 str. 1-5.
2. (M33) **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.
3. (M33) **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.
4. (M33) 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.

Радови у зборницима научних скупова од националног значаја:

1. (M63) **S. Spasojević**, B. Karan. Primena senzora tipa Kinect u snimanju trajektorija zglobova šake. Zbornik radova sa 57. konferencije ETRAN, Zlatibor, Srbija, Jun 2013, RO3.2 str. 1-4.
2. (M63) **S. Spasojević**, S. Mitrović, M. Šušić, Ž. Đurović. Primena digitalne obrade slike u prepoznavanju geometrijskih oblika. Zbornik radova sa 9. konferencije obrade govora i slike, Kovačica, Srbija, Oktobar 2012, B1.4 str. 1-4.
3. (M63) M. Šušić, S. Maksimović, **S. Spasojević**, Ž. Đurović. Jedan pristup u prepoznavanju znakova gluvonemih osoba sa slike. Zbornik radova sa 9. konferencije obrade govora i slike, Kovačica, Srbija, Oktobar 2012, B1.6 str. 1-4.
4. (M63) **S. Spasojević**, Ž. Đurović. Prepoznavanje i klasifikacija geometrijskih oblika u 2D ravni. Zbornik radova sa 56. konferencije ETRAN, Zlatibor, Srbija, Jun 2012, RO2.3 str. 1-4.
5. (M63) M. Šušić, **S. Spasojević**, B. Karan. Akvizicija 3D podataka i praktična kalibracija Microsoft Kinect kamere. Zbornik radova sa 56. konferencije ETRAN, Zlatibor, Srbija, Jun 2012, RO2.4 str. 1-4.
6. (M63) **S. Spasojević**, M. Šušić. Rekonstrukcija 3D okoline robota na osnovu slika sa stereo kamere. Zbornik radova sa 55. konferencije ETRAN, Banja Vrućica, Bosna i Hercegovina, Jun 2011, RO2.3 str. 1-4.

Кандидаткиња је 06.12.2016. године на Електротехничком факултету у Београду јавно усмено бранила предложену тему докторске дисертације пред комисијом у саставу:

1. др Бранко Ковачевић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,
2. др Александар Родић, научни саветник, Универзитет у Београду – Институт Михајло Пупин,
3. др Дејан Раковић, редовни професор у пензији, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,

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

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

На основу свих претходно приказаних резултата кандидаткиње, комисија констатује да је Софија Спасојевић:

- положила 12 испита предвиђених планом и програмом докторских студија на оба факултета (Електротехнички факултет у Београду (10) и Високи Технички Институт у Лисабону (2)) и извршила све обавезе, чиме је сакупила 132 (120+12) ЕСПБ бодова,
- учествовала на укупно шест академских пројекта - националних и међународних (билатералних),
- јавно 06.12.2016. год. одбранила тему докторске дисертације, пред комисијом формираном од стране Наставно-научног већа Електротехничког факултета у Београду,
- публиковала 15 радова у научним часописима и научним конференцијама, чиме је приказала квалификације и афинитет за научно-истраживачки рад.

Комисија је сагласна да је кандидаткиња показала способности за рад на предложеној теми докторске дисертације. Постигнутим резултатима Софија Спасојевић је демонстрирала способност да своја теоријска и практична знања успешно примени, а у складу са тим и представи научној јавности.

Предложена тема докторске дисертације кандидаткиње Софије Спасојевић је у складу са резултатима приказаним кроз публиковане радове, где је евидентно да ти радови чине срж предложеног истраживања које се очекује да буде допуњено кроз будући рад кандидаткиње и израду ове докторске дисертације. Стога Комисија сматра да Софија Спасојевић задовољава све услове за рад на предложеној теми.

2. Предмет и циљ истраживања

У оквиру докторске тезе, кандидаткиња се бави развојем сензорског система за анализу и квантификацију рехабилитационих покрета пацијената, оболелих од неуролошких болести. Експерименталну групу чине пацијенти који имају дијагнозу Паркинсонове болести [1] и пацијенти који се опорављају од последица шлога. Експериментални протоколи (сетови покрета за испитивање) се дефинишу под супервизијом неуролога и представљају делове устаљених клиничких протокола који се примењују током лечења неуролошких болести.

Евалуација учинка пацијената приликом обављања покрета код Паркинсонове болести се заснива на субјективним проценама неуролога и терапеута и недовољно прецизним клиничким скалама, као што су Hoehn & Yahr (HY) [2] и Unified Parkinson's Disease Rating Scale (UPDRS) [3]. 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 [4] које би повећале мотивацију пацијената током терапије и побољшале квалитет евалуација неуролога и терапеута коришћењем објективнијих приступа. Генерални циљеви ове дисертације су: (1) Развој приступачног и преносивог рехабилитационог сензорског система, погодног за коришћење у кућним условима и (2) Развој приступа за квантификацију покрета пацијената. Приступ је заснован на аквизицији покрета коришћењем различитих типова сензора и одговарајућој анализи података и сигнала добијених са сензора, при чему ће се предложени објективни индикатори перформансе покрета (ИПП) извојити, тестирати и верификовати.

Истраживање у оквиру ове докторске дисертације подразумева детаљну анализу свих покрета од интереса за изабране неуролошке болести, који се деле на покрете крупне и fine моторике. За сваку групу покрета биће обезбеђен адекватни тип сензора за аквизицију података. Истраживање ће обухватити квантификацију три различите групе рехабилитационих покрета према важећим клиничким протоколима: (г1) ход и покрети широког опсега горњег дела тела; (г2) фини покрети шаке и прстију и (г3) покрети руку, хватање и премештање објеката.

У доступној литератури описана су три различита приступа за аквизицију људских покрета. Први приступ укључује системе засноване на маркерима [5] који дају тачна мерења, али су ти системи са друге стране изузетно компликовани, непреносиви и скупи. Други приступ је коришћење носивих сензора [6, 7] који се намештају пацијентима на одређене делове тела. Трећи приступ подразумева јефтине и преносиве системе за аквизицију података без маркера, као што су Кинект уређај и Xtion [8-10]. Перформансе наведених јефтинијих система су теститране у неколико студија и показано је да поседују задовољавајућу тачност за примене у рехабилитацији [10, 11]. Неки примери рехабилитационих система који се заснивају на Кинект уређају су описани у [12, 13], међутим нема довољно студија које се баве конкретним случајем Паркинсонове болести [14, 15].

Избор сензора који ће бити коришћени у овој докторској дисертацији такође се заснива и на следећим принципима: (1) Коришћење неинвазивних метода аквизиције података у циљу

већег комфора пацијената приликом обављања покрета; (2) Преносивост и мала тежина сензора, како би се омогућило коришћења система у кућној рехабилитацији; (3) Бежична конекција сензора и рачунара за прикупљање података, како покрети пацијената не би били лимитирани и условљени ограниченим простором; (4) Ниска цена сензора, како би систем био доступан за широку примену.

Сензори који су планирани за аквизицију података се деле на визуелне и носиве сензоре. Од визуелних сензора изабран је Кинект уређај, намењен за аквизицију (г1) - хода и покрета широког опсега горњег дела тела. Предност Кинект-а у односу на остале визуелне системе за снимање покрета је коришћење технике без стављања маркера на тело, што директно утиче на већи комфор пацијената. Од носивих сензора за истраживање су планирани сензорска рукавица, која се ставља на шаку и служи за аквизицију (г2) - финих покрета шаке и прстију и сензорска наруквица (Мио сензор), која се ставља на подлактицу и користи за снимање (г3) - покрета руку, хватања и премештања објеката. Оба сензора су лагана, еластична, прилагодљива и подесива свакој шаки и подлактици. Такође, ови носиви сензори имају бежичну комуникацију са рачунаром за прикупљање података (bluetooth веза).

Циљ ове докторске дисертације је да се рехабилитациони покрети опишу на основу одговарајућих релевантних индикатора перформансе покрета (ИПП). Неки од њих су предложени од стране неуролога (мере које се не могу одредити стандардним клиничним поступцима), док други могу проистећи из анализе сензорских сигнала током истраживања.

Обзиром да је примена модерних технологија и различитих врста сензорских техника у медицини тренутно веома актуелна област истраживања, постоји мноштво научно-истраживачких радова који се баве овом тематиком. Међутим, већина студија се концентрише на само једну групу покрета или анализу понашања појединачних зглобова. Такође, у већини студија се не води рачуна о исплативости система. Постоје студије које описују рехабилитационе системе засноване на Кинект уређају, али само неколицина њих се бави конкретним случајем Паркинсонове болести и шлога. У једној од скорашњих студија [14] испитује се тачност и оправданост коришћења Кинект уређаја код пацијената са Паркинсоновом болешћу, али није спроведена анализа покрета, која ће бити обухваћена овом докторском дисертацијом (студија [16]) и представља конкретан допринос и надоградњу поменуте студије [14]. Неке студије се баве и укључивањем виртуелних окружења у процесе аквизиције података како би се повећала мотивација пацијената приликом рехабилитационих терапија [15]. Међутим, основна ограничења виртуелних окружења су недостатак евиденција о сигурности њихове примене и клиничкој ефикасности. У научно-истраживачким радовима који се баве квантификацијом финих покрета шаке и прстију, махом се користе појединачни, изоловани сензори који се постављају на зглоб шаке или на један или два прста (акцелерометри [17], жироскопи [18], магнетни сензори [19], сензори силе [20] и инерцијални сензори [21]). Сензорске рукавице које се користе за ове сврхе се већином састоје од недовољног броја сензора, који не могу адекватно да опишу покрете шаке и свих прстију [22, 23]. Додатно, већина ових система има жичану везу за рачунаром за аквизицију података, што може бити ограничавајући фактор у смислу радног простора и комфора пацијената. Сензорска рукавица која ће бити тестирана у оквиру ове докторске дисертације садржи осамнаест сензора распоређених по свим прстима и на зглобу шаке.

Студије које се баве рехабилитацијом неуролошких поремећаја обично се концентришу на појединачне функционалности тела као што су баланс и равнотежа [15], ход [24], покрети горњег дела тела [25] или чак анализа појединачних зглобова [26]. Рад у оквиру ове докторске тезе ће објединити све релевантне покрете од интереса за анализиране неуролошке болести (Паркинсонова болест и шлог) – ход и баланс, покрети широког опсега горњег дела тела, покрети руке, шаке и прстију.

Мио-сензор је најновији од свих сензора, предвиђених за развој сензорског система. Релативно скоро се појавио на тржишту и постоји само неколико концептуалних научних

радова [27, 28] у којима су га аутори тестирали за аквизицију покрета и предложили за другачије примене у односу на истраживање обухваћено овом темом.

Предложени сензорски систем, заједно са приступом за квантификацију покрета би могао да има велики значај како за пацијенте који болују од неуролошких болести, тако и за неурологе и терапеуте. Пацијенти би коришћењем овог система били мотивисанији за рехабилитациону терапију, а уједно би могли да осете предности кућне рехабилитације, обзиром да је систем преносив, бежичан и приступачан по цени. Са друге стране, овакав систем би могао да подржи традиционалне клиничке процедуре дијагностике и мониторинга и да се користи као помоћно средство приликом процена стања пацијената на почетку и током болести.

Листа референци која документује актуелност и значај теме која се предлаже је следећа:

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. 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.
5. Zhou H, Hu H. Human motion tracking for rehabilitation – A survey. *Biomed Signal Process Control* 2008; 3 (1): 1–18.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Antón D, Goñi A, Illarramendi A. Exercise Recognition for Kinect-based Telerehabilitation. *Methods Inf Med* 2015; 54 (2): 145-155.
11. Khoshelham K, Elberink S. Accuracy and resolution of Kinect depth data for indoor mapping applications. *Sensors* 2012; 12 (2): 1437–1454.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. Spasojevic S, Santos-Victor J, Ilic T, et al. A Vision-based System for Movement Analysis in Medical Applications: the example of Parkinson's Disease. *Computer Vision Systems* 2015; 9163: (424-434). Springer International Publishing.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. 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.

21. 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.
22. 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.
23. 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.
24. Cho CW, Chao WH, Lin SH, et al. A vision-based analysis system for gait recognition in patients with Parkinson's disease. Expert Syst Appl 2009; 36 (3): 7033-7039.
25. Lum P, Burgar C, Shor P, et al. Robot-Assisted Movement Training Compared With Conventional Therapy Techniques for the Rehabilitation of Upper-Limb Motor Function After Stroke. Arch Phys Med Rehabil 2002; 83 (7): 952 - 959.
26. Vaisman L, Dipietro L, Krebs H. A Comparative Analysis of Speed Profile Models for Wrist Pointing Movements. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng 2013; 21 (5): 756-766.
27. 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.
28. 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.

3. Полазне хипотезе

Основне полазне хипотезе у оквиру докторске тезе су следеће:

- Могуће је пројектовати приступачан и преносив сензорски систем за свеобухватну анализу покрета са довољном тачношћу за примене у медицини и рехабилитацији [1-7].
- Могуће је математички описати рехабилитационе покрете помоћу индикатора перформансе покрета (ИПП), односно релевантних обележја која се издвајају из сензорских сигнала и података, прикупљених током аквизиције покрета [7-11].
- Опсези вредности издвојених ИПП-а су различити за различите експерименталне групе од интереса (објашњене у следећој тачки).
- На основу издвојених ИПП могуће је извршити успешну класификацију (пројектовати систем одлучивања) између следећих група од интереса:
 - Експерименталне групе пацијената и контролне групе здравих особа (подршка дијагностици);
 - Експерименталне групе пацијената са различитим стадијумима болести (подршка мониторингу, односно праћењу стања пацијената током болести).
- Издвојени индикатори перформансе покрета (ИПП) су релевантни за објективну процену стања пацијента и корелисани са валидним клиничким тестовима и скалама.

4. Научне методе истраживања

Истраживање је засновано на следећим методама:

- Методе аквизиције података: Неопходан услов за аквизицију података је калибрација сензора. Сваки од коришћених сензора има дефинисан поступак калибрације. Након калибрације, приступа се аквизицији покрета према дефинисаним протоколима.
- Методе предобrade сигнала: (1) Филтрирање сигнала – сигнали са сензора се морају филтрирати коришћењем одговарајућег филтра, како би се одстанио 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 Мио сензора – 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 редуктованих димензија и одредила обележја са највећим утицајем на класификацију група од интереса.
- Корелационе методе: Веома важна ставка код клиничних 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.

5. Очекивани научни допринос

Очекивани научни доприноси ове докторске дисертације су:

- Преглед и систематизација постојећих система рехабилитације који се заснивају на визуелним и носивим сензорима, са посебним освртом на оне примењене 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.

Очекивани допринос у смислу унапређења инжењерске праксе огледао би се у евентуалној могућности увођења предложеног сензорског система и приступа за анализу покрета у

рехабилитационе и медицинске протоколе, односно инсталацију предложеног система у болнице и рехабилитационе центре.

6. План истраживања и структура рада

- Детаљна анализа релевантне литературе и научних радова везаних за тему истраживања у циљу увида стања у области.
- Дефинисање експерименталног протокола у сарадњи са експертима из области неурологије и рехабилитације.
- Предлог и анализа сензора за аквизицију три различите групе дефинисаних рехабилитационих покрета (г1, г2, г3).
- Експериментална процедура 1: Калибрација сензора и аквизиција покрета пацијената који болују од Паркинсонове болести (први, други и трећи стадијум болести) и здравих субјеката (контролна група).
- Предобрада добијених сензорских сигнала у смислу филтрације како би се отклонио шум мерења и сегментације сигнала на појединачне покрете.
- Развој алгоритама за екстракцију и селекцију релевантних обележја из сензорских сигнала, односно индикатора перформансе покрета (ИПП), при чему се разликују три приступа: (1) Директан приступ – издвајање ИПП-а директно из сензорских сигнала или из сигнала обрађених применом адекватних техника; (2) Индиректан приступ – издвајање ИПП-а из развијеног модела шаке на основу естимације потребних параметара за квантификацију финих покрета прстију и (3) Прозорски приступ – подела сигнала са Мио сенроза на клизеће прозоре и издвајање ИПП-а за сваки прозор. Основна предност ове технике је увид у временску еволуцију ИПП-а током покрета.
- Статистичка анализа добијених података за групе од интереса (пацијенти и контролни субјекти, као и три групе различитих стадијума болести).
- Пројектовање система одлучивања између група од интереса на основу дефинисаних ИПП-а коришћењем различитих типова класификатора за подршку евалуација приликом дијагностике и мониторинга.
- Испитивање корелисаности ново-предложених рехабилитационих мера (ИПП-а) са важећим клиничким скалама и тестовима.
- Експериментална процедура 2: Калибрација и аквизиција покрета пацијената који се рехабилитују након шлога и здравих субјеката (контролна група). Примена горе наведених техника за анализу добијених сензорских података.
- Упоредна анализа и евалуација успешности примене предложеног система и приступа за квантификацију покрета код Паркинсонове болести и код шлога. Анализа оправданости увођења развијеног система / приступа у клиничке и рехабилитационе протоколе, базирана на експерименталним резултатима.
- Дефинисање будућег рада и даљих праваца истраживања.

7. Закључак и предлог

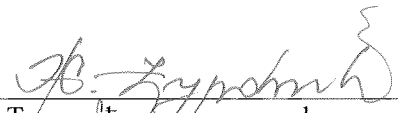
На основу свега претходно наведеног, Комисија сматра да кандидаткиња Софија Спасојевић у потпуности задовољава све услове да спроведе истраживање на предложеној теми **„Квантитативна анализа покрета у рехабилитацији неуролошких поремећаја коришћењем визуелних и носивих сензора”** (енг. „Quantitative movement analysis in the rehabilitation of neurological disorders using vision and wearable sensors”). Кандидаткиња ће тезу написати на енглеском језику због билатералног програма докторских студија између Електротехничког факултета Универзитета у Београду и Високог Техничког Института, Универзитета у Лисабону.

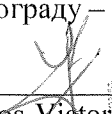
Предвиђени садржаји истраживања су актуелни, а очекивани научни доприноси значајни у домену примене нових сензорских технологија у медицини и рехабилитацији и анализе сензорских сигнала у циљу квантификације покрета. Предложена тема припада ужим научним областима компјутерске визије, обраде сигнала и машинског учења, за које су Електротехнички факултет Универзитета у Београду и Високи Технички Институт Универзитета у Лисабону матични.

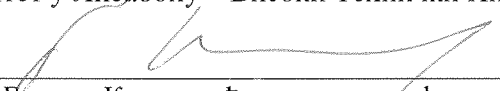
Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета у Београду да кандидаткињи Софији Спасојевић одобри израду докторске дисертације под насловом **„Квантитативна анализа покрета у рехабилитацији неуролошких поремећаја коришћењем визуелних и носивих сензора”**. За ментора израде докторске дисертације предлаже се др Жељко Ђуровић, редовни професор на Електротехничком факултету и Београду и др José Santos-Victor, редовни професор на Високом Техничком Институту у Лисабону у складу са билатералним програмом докторских студија.

Београд, 17. јануар 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 Дејан Раковић, редовни професор у пензији
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

TO TEACHING-SCIENTIFIC COUNCIL

Subject: The suitability of the thesis topic and candidate Sofija S. Spasojević for the development of doctoral dissertation

By decision of Teaching-scientific council of the School of Electrical Engineering number 5014/11-1 from November, 24th, 2016, we are selected as Committee members for evaluation of the thesis topic and candidate Sofija S. Spasojević for the development of doctoral dissertation and scientific basis of the thesis topic **"Quantitative movement analysis in the rehabilitation of neurological disorders using vision and wearable sensors"**.

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

REPORT

1. Data about the candidate

1.1. Biographical data

Sofija Spasojević, MSc in Electrical Engineering, is born on September, 7th, 1987 in Sabac, Republic of Serbia from father Slobodan and mother Vera. 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.

Under the bilateral academic projects, she was a guest researcher at the Instituto Superior Técnico in Lisbon, Jozef Stefan Institute in Ljubljana, and Research Robotics Lab in Kaiserslautern, Germany.

1.2. Acquired scientific-research experience

Scientific research areas of the candidate include computer vision, signal processing and machine learning. Within these areas Sofija Spasojević has so far participated in the following projects:

Number	Project	Institutions	Project duration
1.	Project III-44008: The development of robots as an aid for overcoming the difficulties in the development of children with disabilities. The Ministry of Education, Science and Technological Development of Republic of Serbia.	Mihailo Pupin Institute and partner institutions from Serbia	(2011-2016)
2.	Swiss National Scientific Foundation SNSF IP SCOPES project “Creative Alliance in Robotics Research and Education Focused on Medical and Service Robotics (CARE-robotics)” , Project ID: IZ74Z0_137361/1, SNSF SCOPES IP	Mihailo Pupin Institute and partner institutions from Switzerland and Romania	(2011-2014)
3.	Synthesis of Collaborative Behavior Attributes with Service Robots Based on Visually-Motor Human-Machine Interaction (COLBAR) , Bilateral research project between Serbia and Portugal, Ministry of Education, Science and Technology of Republic Serbia and Ministry of Science of Portugal	Mihailo Pupin Institute and Instituto Superior Técnico, Lisbon, Portugal	(2013-2014)
4.	European research and development program HORIZON 2020, Coordination support activity project “Researchers’ night - FLIRT” , EU Commission	Mihailo Pupin Institute and partner institutions from Serbia	(2014-2015)
5.	International project of bilateral academic collaboration with Jožef Štefan Institute (Ljubljana, Slovenia): Advanced perception and learning for cognitive heterogeneous robots.	Mihailo Pupin Institute and Jozef Stefan Institute, Ljubljana, Slovenia	(2015)
6.	Research Group Linkage Program, Alexander von Humboldt Foundation, “Building attributes of artificial emotional intelligence aimed to make robots feel and sociable as humans (Emotionally Intelligent Robots - EIrobots)” , Contract no. 3.4-IP-DEU/112623, University of Kaiserslautern, Institute for informatics, Robotics department.	Mihailo Pupin Institute and Research Robotics Lab in Kaiserslautern, Germany	(2015-2017)

At the School of Electrical Engineering in Belgrade, she completed all 10 courses, planned by the program of doctoral studies with the average grade 10:

Number	Course title	Grade	ECTS
1	Artificial intelligence	10	9
2	Techniques for speech processing and recognition	10	9
3	Theory of robotic systems	10	9
4	Classification and estimation of signals	10	9
5	Neural networks	10	9
6	Real time software systems	10	9
7	Optimal and adaptive stochastic systems	10	9
8	Intelligent robotic systems	10	9
9	Special robotic systems	10	9
10	English language	10	6
Title of the obligation			
1	Study research work I		15
2	Study research work II		15
3	Scientific and professional work		3

At the Instituto Superior Técnico in Lisbon she completed two courses with grades 17 and 18 (out of 20):

Number	Course title	Grade	ECTS
1	Estimation and classification	17	6
2	Biometrics	18	6

The so far results of the candidate Sofija Spasojević are presented with the following published papers: 1 paper in a scientific journal of international importance (with impact factor), 4 papers in the chapters of the monograph of the international importance, 4 papers published in the proceedings of international conferences, and 6 papers published in the proceedings of national conferences.

Papers in a scientific journals of the international importance:

1. (M21 – IF 2.248 for 2014.) **S. Spasojević**, T. Ilić, S. Milanović et. al. Combined vision and wearable sensors-based system for movement analysis in rehabilitation. Methods of Information in Medicine journal. (ISSN: 0026-1270, DOI: <https://doi.org/10.3414/ME16-02-0013>)

Papers in the chapters of the monograph of the international importance:

1. (M14) **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 (ISSN: 2211-0984).
2. (M14) **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 (ISSN: 0302-9743).
3. (M14) 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 (ISSN: 2211-0984).
4. (M14) 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 (ISSN: 2211-0984).

Papers in the proceedings of international conferences:

1. (M33) **S. Spasojević**, M. Vujović, A. Rodić. Robot head motion control using hand gestures. Zbornik radova sa 2. IcETTRAN konferencije, Srebrno jezero, Srbija, Jun 2015, RO11.4 str. 1-5.
2. (M33) **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.
3. (M33) **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.
4. (M33) 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.

Papers in the proceedings of national conferences:

1. (M63) **S. Spasojević**, B. Karan. The application of Kinect sensor in acquisition of the hand joint trajectories. Proceedings of the 57th ETRAN conference, Zlatibor, Serbia, Jun 2013, RO3.2 pp. 1-4.
2. (M63) **S. Spasojević**, S. Mitrović, M. Šušić, Ž. Đurović. Application of the digital image processing in the recognition of geometric shapes. Proceedings of the 9th conference of the speech and image processing, Kovacica, Serbia, October 2012, B1.4 pp. 1-4.
3. (M63) M. Šušić, S. Maksimović, **S. Spasojević**, Ž. Đurović. An approach for deaf signs recognition from the image. Proceedings of the 9th conference of the speech and image processing, Kovacica, Serbia, October 2012, B1.6 pp. 1-4.
4. (M63) **S. Spasojević**, Ž. Đurović. Recognition and classification of geometric shapes in 2D plane. Proceedings of the 56th ETRAN conference, Zlatibor, Serbia, RO2.3 pp. 1-4.
5. (M63) M. Šušić, **S. Spasojević**, B. Karan. Acquisition of 3D data and practical calibration of the Microsoft Kinect camera. Proceedings of the 56th ETRAN conference, Zlatibor, Serbia, Jun 2012, RO2.4 pp. 1-4.
6. (M63) **S. Spasojević**, M. Šušić. Reconstruction of the 3D robot environment based on the stereo images. Proceedings of the 55th ETRAN conference, Banja Vrucica, Bosnia and Herzegovina, Jun 2011, RO2.3 pp. 1-4.

The candidate has publicly orally defended the proposed doctoral thesis topic on December, 06th, 2016 at the School of Electrical Engineering in Belgrade, in front of a commission composed of:

1. dr Branko Kovačević, full professor, University of Belgrade – School of Electrical Engineering,
2. dr Aleksandar Rodić, Research Fellow, University of Belgrade - Mihailo Pupin Institute,
3. dr Dejan Raković, full professor in retirement, University of Belgrade – School of Electrical Engineering,

where the Commission concluded that the candidate received a score **satisfy** and meet the requirements for work on the proposed thesis topic.

1.3. Evaluation of the candidate suitability for work on the proposed thesis topic

Based on the all results of the candidate listed above, the Committee concludes that Sofija Spasojević:

- completed 12 courses planned at the program of doctoral studies at both faculties (School of Electrical Engineering in Belgrade (10) and Instituto Superior Técnico in Lisbon (2)) and completed all obligations and gain in total 132 (120+12) ECTS credits,
- participated in six academic projects - national and international (bilateral academic collaboration),
- publicly orally defended the proposed doctoral thesis topic on December, 06th, 2016 in front of a Commission formed by the Teaching-scientific council of the School of Electrical Engineering in Belgrade,
- published 15 papers in scientific journals and conferences, and thereby she presented the qualifications and affinity for scientific-research work.

The Committee agrees that the candidate has demonstrated the ability to work on the proposed thesis topic. With the results achieved so far, Sofija Spasojević has demonstrated the ability to successfully implement her theoretical and practical knowledge in practice, and in accordance with that, to present her work to the scientific community.

The proposed thesis topic of the candidate Sofija Spasojević is in accordance with the results presented in the published papers, where it is evident that these papers make the core of the proposed research, which will be further extended in the future work of the candidate and development of this doctoral dissertation. The Committee, therefore, considers that Sofija Spasojević meets all requirements for work on the proposed thesis topic.

2. Topic and the goal of the research

Under the doctoral thesis, the candidate is engaged in the development of the sensor system for the analysis and quantification of rehabilitation movements. The focus is in patients with motor disorders caused by neurological diseases. The experimental group consists of patients with Parkinson's disease [1] and patients who are recovering from the stroke. Experimental protocols (movement sets for examination) are defined under the neurologist's supervision and represent the parts of established clinical protocols, which are used in the treatment of neurological diseases.

However, the evaluation of the patient's achievement during the movement performance in Parkinson's disease is based on the subjective assessments by neurologists and therapists and imprecise clinical scales, like Hoehn & Yahr (HY) [2] and Unified Parkinson's Disease Rating Scale (UPDRS) [3]. Besides, conventional rehabilitation therapy often involves lengthy, laborious and monotonous recovery process, from which patients can easily give up.

As a result of the above-explained issues, there is a clear need for introducing the modern sensor techniques [4] into the procedures of the traditional diagnostics, monitoring, and rehabilitation that would increase the patient's motivation during the treatment and improve the quality of evaluations using objective approach. The general objectives of the thesis are following: (1) The development of an affordable and portable rehabilitation sensor system, suitable for use in the home environment, and (2) development of the approach for the analysis and quantification of patient's movements. The base of the approach is the movement acquisition using different types of sensors and appropriate analysis of the sensor signal outputs. As a result of processing the sensor signals and collected data, particular movement performance indicators (MPI), proposed as an objective movement measurements, have been extracted, tested and verified.

Research under this doctoral thesis includes a detailed examination and analysis of all rehabilitation movements of interest for the selected neurological diseases, which includes large range and fine motor movements. For each group of the movements, the appropriate sensor type is provided for the data acquisition. The research includes the quantification of three different groups of rehabilitation movements according to the valid clinical protocols: (g1) gait and large range upper body movements; (g2) fine movements of the hand and fingers and (g3) arm movements, movements of object grasping, pick and place.

In the available literature, three different approaches to the acquisition of the human movement are described. Marker-based motion capture (mocap) systems [5] are often used for movement acquisition during rehabilitation sessions, because of their ability to deliver accurate measurements, in spite of their extremely high costs. Other alternatives include the attachment of different sensors to the patient's body [6, 7] or hand (data glove) and, more recently, low-cost marker-free mocap systems such as the Kinect and Xtion [8-10]. The performance of lower-cost systems has been tested and shown to possess a satisfactory accuracy for the application in the rehabilitation therapy [10, 11]. While some examples of Kinect-based rehabilitation systems are described in [12, 13], little attention has been devoted to the specific case of PD [14, 15].

The choice of the sensors for the rehabilitation system is based also on the following principles: (1) use of non-invasive methods of the data acquisition in order to provide patient's comfort during movement performing; (2) portability and light weight of the sensor, to allow the use of the system in the home environment; (3) wireless connection between the sensors and computer for collecting

the data in order to prevent the limitation of the patient's movements; (4) using low-cost sensors, so that the system is available and affordable for widespread use.

Sensors planned for the data acquisition are divided into vision-based and wearable-based sensors. The Kinect device (vision sensor) is used for the acquisition of the gait and large range upper body movements (g1). The advantage of the Kinect in comparison to the other vision-based motion capture systems is the technique for movement acquisition without placing the markers on the body, which enables greater comfort of patients. Data glove is used for the acquisition of the fine hand movements (g2). Myo sensor, which is placed on the forearm is used for collecting the arm movements and movements of object grasping, pick and place (g3). Both wearable sensors are lightweight, flexible and adaptable to each hand and forearm. Also, these wearable sensors have the wireless connection with the computer for data collection (Bluetooth connection).

One of the aims of this doctoral thesis is to describe the rehabilitation movements quantitatively, using the appropriate movement performance indicators (MPIs). Some of them are proposed by the neurologists (the measurements they consider important, but cannot access them), but a majority of MPIs can be revealed during the research and those MPIs have not been used in medical and rehabilitation practice previously.

Given the fact that the application of modern technologies and different types of sensors in medicine is currently the very popular area of the research, a lot of research papers deal with this topic. However, most studies focus on one particular group of the movements or analysis of individual joints. This thesis deals with an analysis of all joints of interest and all rehabilitation movements, relevant for a particular disease. Additionally, in the most studies the cost-effectiveness of the system is not taken into account. Vision-based rehabilitation systems use mainly motion capture techniques which are expensive and complicated to set up, including the markers placing on the body. Some studies describe rehabilitation systems based on the Kinect device, but only a few of them are involved in the specific case of Parkinson's disease or stroke. In one recent study [14], the accuracy and feasibility of the Kinect device for use in patients with Parkinson's disease are examined, but the movement analysis was not carried out. This part will be included in this PhD thesis (and study [16]), and represents a concrete contribution and the upgrade of the mentioned study [14]. Some studies have introduced virtual environments into data acquisition and processing procedures for Parkinson's disease [15]. The main limitations with the use of virtual environments and rehabilitation games are the lack of official safety-evidence and proof of clinical effectiveness.

Research papers, dealing with the quantification of the fine hand movements, mainly explore a single or a few isolated sensors that are placed on the hand wrist or particular fingers (accelerometers [17], gyroscopes [18], magnetic sensors [19], force sensors [20] and inertial sensors [21]). These sensor systems can only modestly contribute to the hand movement assessment. Specifically, the use of one or two isolated sensors in motion acquisition limits the movement quantification, due to the limited amount of the collected data. Data gloves address this shortcoming by integrating multiple sensors in one single, more sophisticated, device. Most data glove-based systems have a low number of sensors, that cannot describe the movements of the hand and fingers properly [22, 23]. In addition, majority of those systems have a wired connection between the glove and the PC for storing data, which can interfere with the patient's motion and degrade their comfort. The sensor glove, which will be tested in this doctoral thesis have eighteen sensors, placed across hand and finger joints.

Rehabilitation studies for neurological disorders usually focus on the analysis of particular body functionalities, such as postural control [15], gait [24], upper body movements [25] or even the observation of a specific joint [26]. The work in the frame of this doctoral dissertation will include all movements of interest for analyzed neurological disorders (Parkinson's disease and stroke) – gait and balance, large range upper body movements, arm movements and movements of the hand and fingers.

Myo sensor is the newest of the all sensors, intended for the development of the sensor system. It has appeared on the market recently and there are just a few conceptual studies [27, 28] in which

the authors tested it for the movement acquisition testing and proposed it for the applications different than the research planned under this thesis.

The proposed sensor system, along with the developed approach for the movement quantification could have a huge significance for patients suffering from neurological diseases, as well as for neurologists and therapists. Patients would be more motivated to complete the rehabilitation procedure using this system, especially with the benefits of home rehabilitation, given that the system is affordable, portable and wireless. On the other hand, such a system can support traditional clinical diagnosis and monitoring procedures and be used as an aid in the assessment of the patient's condition at the beginning and during the disease.

A list of references documenting the relevance and importance of the proposed is the following:

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. 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.
5. Zhou H, Hu H. Human motion tracking for rehabilitation – A survey. *Biomed Signal Process Control* 2008; 3 (1): 1–18.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Antón D, Goñi A, Illarramendi A. Exercise Recognition for Kinect-based Telerehabilitation. *Methods Inf Med* 2015; 54 (2): 145-155.
11. Khoshelham K, Elberink S. Accuracy and resolution of Kinect depth data for indoor mapping applications. *Sensors* 2012; 12 (2): 1437–1454.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. Spasojevic S, Santos-Victor J, Ilic T, et al. A Vision-based System for Movement Analysis in Medical Applications: the example of Parkinson's Disease. *Computer Vision Systems* 2015; 9163: (424-434). Springer International Publishing.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. 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.

21. 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.
22. 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.
23. 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.
24. Cho CW, Chao WH, Lin SH, et al. A vision-based analysis system for gait recognition in patients with Parkinson's disease. Expert Syst Appl 2009; 36 (3): 7033–7039.
25. Lum P, Burgar C, Shor P, et al. Robot-Assisted Movement Training Compared With Conventional Therapy Techniques for the Rehabilitation of Upper-Limb Motor Function After Stroke. Arch Phys Med Rehabil 2002; 83 (7): 952 – 959.
26. Vaisman L, Dipietro L, Krebs H. A Comparative Analysis of Speed Profile Models for Wrist Pointing Movements. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng 2013; 21 (5): 756-766.
27. 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.
28. 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.

3. Initial hypotheses

Initial hypotheses of this doctoral thesis are the following:

- It is possible to design an affordable and portable sensor system for comprehensive analysis of movements with sufficient accuracy for applications in medicine and rehabilitation [1 - 7].
- It is possible to mathematically describe the rehabilitation movements using movement performance indicators (MPI) i.e. relevant motion features that are extracted from the sensor signals and data, collected during the movement acquisition [7 - 11].
- The value ranges of the extracted MPIs are different for various experimental groups of interest (explained in the following point).
- Based on the extracted MPIs, successful classification (the design of decision-making system) can be performed between the following groups of interest:
 - Experimental groups of patients and the control group of healthy subjects (support for diagnostics);
 - The experimental group of patients from different disease stages (support for monitoring i.e. observation of the patient's state during the disease).
- Extracted movement performance indicators (MPIs) are relevant for an objective assessment of the patient's state and correlated with valid clinical tests and scales.

4. Scientific research methods

The research is based on the following methods:

- Data acquisition methods: Sensor calibration - each of the sensors used has a defined calibration procedure. After the calibration, the acquisition of the movements is performed based on the defined protocols.
- Methods of the signal preprocessing: (1) Signal filtering - sensor signals need be filtered using an appropriate filter, 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 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 Myo sensor – EMG signals and signals from the accelerometer and gyroscope.

- Feature selection methods (i.e. 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 designed 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 methods: 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.

5. Expected scientific contribution

Expected 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.

Expected contribution in terms of improving the engineering practice would be reflected in the possibility of introducing the proposed sensory systems and approach for the movement analysis in

rehabilitation and medical protocols, and the installation of the proposed system in hospitals and rehabilitation centers.

6. Research plan and work structure

- The detailed analysis of the relevant literature and defining the State of the art in the research field, related to the thesis topic.
- Defining the experimental protocol in collaboration with experts in the field of neurology and rehabilitation.
- Proposal and analysis of the sensors for acquisition of three different groups of defined rehabilitation movements (g1, g2 and g3).
- The first experimental procedure: The calibration of the sensors and movement acquisition by patients with Parkinson's disease (first, second and third disease stage) and control group of healthy subjects.
- Pre-processing of the sensor signals in terms of filtering, due to the measurement noise and segmentation of the signals in the order of processing the individual movement units.
- Development of the algorithm for the extraction and selection of relevant movement characteristics i.e. movement performance indicators (MPIs), according to three different approaches: (1) The direct approach - MPI extraction directly from the sensor signals or after appropriate signal processing; (2) The indirect approach – MPI extraction from the hand model, based on the estimation of the necessary parameters for the quantification of the fine finger movements and (3) Window approach – the division of the signals from Myo sensor 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.
- Statistical analysis of the data for the groups of interest (patients and control subjects, as well as the three different disease stage groups).
- The design of the decision-making systems between groups of interest based on the defined MPI set and using different types of classifiers in order to support the clinical evaluations in diagnostics and monitoring.
- The examination of the correlation between the newly proposed rehabilitation measurements (MPIs) and valid clinical scales and tests.
- Second experimental procedure: Calibration and movement acquisition with sensors for patients recovering after stroke and healthy subjects (control group). Performing of the above mentioned techniques for the analysis of the sensor data.
- Comparative analysis and evaluation of the proposed rehabilitation system and approach for the movement quantification in Parkinson's disease and stroke. Feasibility analysis for the inclusion of the developed system / approach into clinical and rehabilitation protocols, based on the experimental results.
- Defining the future work and further directions of the research.

7. Conclusion and proposal

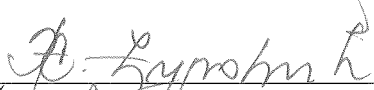
Based on the all items mentioned above, the Committee considers that a PhD candidate Sofija Spasojević fully meets all the requirements to conduct the research on the proposed topic "**Quantitative movement analysis in the rehabilitation of neurological disorders using vision and wearable sensors**" (Serbian: "Квантитативна анализа покрета у рехабилитацији неуролошких поремећаја коришћењем визуелних и носивих сензора"). A candidate will write the thesis in English language 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.

Proposed research contents are actual, and the expected scientific contributions are significant in the field of application of new sensor technologies in medicine and rehabilitation, and analysis of the sensor signals for the movement quantification. The proposed thesis topic belongs to the research fields of computer vision, signal processing and machine learning, for which the School of Electrical Engineering, University of Belgrade and the Instituto Superior Técnico, University of Lisbon are specialized.

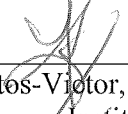
The Committee proposes to the Teaching-scientific Council of the School of Electrical Engineering in Belgrade to approve candidate Sofija Spasojević the development of the doctoral thesis entitled **"Quantitative movement analysis in the rehabilitation of neurological disorders using vision and wearable sensors."** The proposed supervisors of the doctoral dissertation are dr Željko Đurović, full professor at the School of Electrical Engineering in Belgrade and dr José Santos-Victor, full professor at the Instituto Superior Técnico in Lisbon, in accordance with a bilateral program of doctoral studies.

Belgrade, January, 17th, 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 Dejan Raković, Full professor in retirement
University of Belgrade – School of Electrical Engineering

