

Универзитет у Београду
Електротехнички факултет

ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ БЕОГРАД			
ПРИМЉЕНО: 27-02-2026			
Орг. јед.	Број	Прилог	Вредност
	376		

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Оцена научне заснованости теме докторске дисертације кандидаткиње Горане Миловановић, мастер инжењера електротехнике и рачунарства.

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета бр. 266/36 од 10.02.2026. године именовани смо за чланове Комисије за оцјену научне заснованости теме докторске дисертације кандидаткиње Горане Миловановић, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, за израду докторске дисертације и научне заснованости теме под насловом:

„Интерфејс човјек-машина за роботске системе промјениве крутости заснован на миоелектричној контроли и електротактилној повратној спрези”

(енгл. „*Human-machine interface for variable stiffness robotic systems based on myoelectric control and electrotactile feedback*”).

На основу материјала приложеног уз захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидаткињи

1.1. Биографски подаци

Горана Миловановић (девојачко Марковић) је рођена 19.8.1996. године у Бијељини, Република Српска, БиХ. Са одличним успехом је завршила Основну школу "Дворови" у Дворовима код Бијељине, а потом и Гимназију „Филип Вишњић“ у Бијељини. Након завршетка Гимназије 2015. године, уписала је основне академске студије на Факултету техничких наука у Новом Саду, на смеру Биомедицинско инжењерство. Дипломски рад „Аутоматско препознавање патолошког стања „*sleep apnea*” базирано на *DFA* анализи ЕЕГ сигнала и *SVM* методи машинског учења” рађен под менторством проф. др Драгане Бајић одбранила је 2.9.2019. године са оценом 10, чиме је завршила основне студије као један од најбољих студената на Факултету са просечном оценом 10,0.

Дипломске академске – мастер студије на Електротехничком факултету у Београду, на Модулу за биомедицинско и еколошко инжењерство, уписала је у октобру 2019. године. Положила је све испите предвиђене планом и програмом са просечном оценом 9,7. Мастер рад „Електротактилна стимулација као интерфејс за коришћење и управљање роботским системима” под менторством проф. др Косте Јовановића је одбранила 16.9.2020. године са оценом 10. Докторске академске студије на Електротехничком факултету у Београду

уписала је школске 2020/2021, на модулу Управљање системима и обрада сигнала и положила све испите са просечном оценом 10,0.

Већ од основних студија се бави научно-истраживачким радом, што је резултовало учешћем на три домаће, три међународне конференције, два Конгреса студената Медицинског факултета у Новом Саду, те једним радом објављеном у међународном часопису.

За време основних и мастер студија била је добитник многих стипендија и награда, између осталог и престижне стипендије „Доситеја“ и „Др Милан Јелић“, као и награде за изузетне студенте Факултета техничких наука и Универзитета у Новом Саду.

Од новембра 2022. године је мама једног дечака.

1.2. Стечено научно-истраживачко искуство

Докторске студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду кандидаткиња Горана Миловановић је уписала школске 2020/2021. године на модулу Управљање системима и обрада сигнала. Током докторских студија је положила наставним планом и програмом предвиђене испите и испунила све обавезе, и то:

р.бр.	Назив испита	Оцена	ЕСПБ
1	Теорија роботских система	10	9
2	Методе и инструментација за електрофизиологију	10	9
3	Моторна контрола и рехабилитација	10	9
4	Специјални роботски системи	10	9
5	Одабране методе обраде физиолошких сигнала	10	9
6	Неуралне мреже	10	9
7	Класификација и естимација сигнала	10	9
	Назив обавезе		
2	Студијски истраживачки рад I		24
3	Студијски истраживачки рад II		24

Горана Миловановић је у периоду од марта 2020. до маја 2022. године била ангажована као млади истраживач у фирми *Tecnalia Serbia* где је имала прилику да учествује на 2 међународна пројекта у области примене електротактилне стимулације:

- *TACTILITY: TACTile feedback enriched virtual interaction through virtual reality and beyond* (Horizon2020; 7.2019.-7.2022.) – пројекат који уводи тактилне информације у нове системе интеракције са виртуелним окружењима, повећавајући квалитет имерсивне виртуелне стварности и телеманипулације.
- *SixthSense* (Horizon2020; 5.2020.-10.2023.) – мултидисциплинарни пројекат са

општим циљем развоја носивог система за праћење здравља са тактилним биофидбеком, који омогућава припадницима хитних служби да осете своје тренутно здравствено стање у опасним ситуацијама.

Кандидаткиња је до сада објавила један рад у часопису без импакт фактора, 3 рада на међународним конференцијама и 2 рада на домаћим конференцијама.

Списак публикација кандидаткиње Горане Миловановић:

- **Радови у часописима без импакт фактора:**

1. Томић, Н., Марковић, Г., Шкорић, Т., Миловановић, Б., „Sequences and antisequences in hypertensive patients under therapy”, *International Journal of Electrical Engineering and Computing*, 3(1), pp. 18-25., DOI: 10.7251/ijeec1901018t. (2019)

- **Радови са међународних конференција (M33):**

1. Миловановић Г., Квашчев Г., Јовановић К., „LSTM-Based Hand Motion Recognition for Myoelectric Control of a Compliant Robot Gripper”. In *Advances in Service and Industrial Robotics*, the proceedings of the 34th International Conference on Robotics in Alpe-Adria Danube Region, RAAD 2025, pp. 155-163. Cham: Springer Nature Switzerland. (2025)
2. Штрбац, М., Исаковић, М., Малешевић, Ј., Марковић, Г., Дошен, С., Јорговановић, Н., Бијелић Г., Костић, М., „Electrotactile stimulation, a new feedback channel for first responders”. In *Advances in Neuroergonomics and Cognitive Engineering*, the proceedings of the International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics, AHFE 2021, pp. 489-496. Cham: Springer International Publishing. (2021).
3. Марковић Г., Томић Н., Добошаревић С., Арсеновић Ј., Миловановић Б., Бајић Д., Шкорић Т., „Data correction and power spectrum density estimation in hypertensive patients”. In *Proceedings of the 10th International Symposium on Neurocardiology, NEUROCARD 2018*, Belgrade, Serbia, October 12-13, 2018. (2018)

- **Радови са домаћих конференција (M63):**

1. Марковић, Г., Малешевић, Ј., Исаковић, М., Костић, М., Штрбац, М., Јовановић, К., „Електротактилни *feedback* за препознавање особина предмета манипулисаних меким роботом”. У *Зборнику радова*, LXV Конференција ЕТРАН, pp. 545-550, Етно село Станишићи, Република Српска, БиХ, 8.-10. септембар, 2021. Друштво за ЕТРАН. (2021)
2. Томић, Н., Марковић, Г., „Карактеризација кратких ЕКГ снимака у циљу детекције атријалне фибрилације”. У *Зборнику радова*, XXVI Телекомуникациони Форум, ТЕЛФОР 2018, Београд, Србија, 20. и 21. новембар, 2018. (2018)

1.3. Оцена подобности кандидаткиње за рад на предложеној теми

Комисија је размотрила све претходно наведене резултате рада и стечена искуства кандидаткиње Горане Миловановић. На основу приложених докумената и усмене презентације теме докторске дисертације, Комисија је стекла увид у способности кандидаткиње за научно-истраживачки рад и њене могућности да током израде докторске дисертације оствари резултате који ће бити приказани и оцењени од стране међународне научне заједнице. Став Комисије је да кандидаткиња Горана Миловановић испуњава све потребне суштинске и формалне услове да приступи изради докторске дисертације под наведеном темом.

2. Предмет и циљ истраживања

Укључивање човека у састав контролне петље роботског актуатора омогућује да се људска интелигенција употреби као помоћ при управљању и да се на тај начин превазиђу недостаци у смислу безбедности и поузданости потпуно аутономних робота у деликатним и сложеним задацима [1]. Да би се побољшала безбедност интеракције са објектима и окружењем, пожељно је да актуатор има попустљиву природу. Контрола крутости (реципрочна вредност од попустљивости, енг. *stiffness*) може се реализовати на нивоу зглоба или завршног уређаја и то на два начина: софтверски (активна контрола), или хардверски (пасивна контрола) - интегрисањем различитих механизма са еластичним елементима (нпр. опругама) између одређеног сегмента робота и мотора [2]. Један од два основна типа актуатора са пасивном контролом крутости су актуатори променљиве крутости (енг. *Variable Stiffness Actuator, VSA*). Иако захтевају комплексније управљачке алгоритме у односу на решења за активну контролу крутости, *VSA* су се показали ефикасним у смислу складиштења енергије, апсорпције удара и адаптације на карактеристике окружења са којим су у контакту [3]. Честа биолошки инспирисана реализација *VSA* се постиже са два антагонистички упарена мотора повезана опругама, што омогућава истовремено подешавање и позиције и крутости, на начин инспирисан контролом зглобова код човека.

Људска шака природно поседује изузетну манипулабилност при обављању различитих задатака, посебно оних који укључују контакт са другим људима или осетљивим предметима. Кључ разноврсних могућности и стабилног понашања је задатку-прилагођена модулација крутости зглобова шаке. Крутост људског зглоба је у корелацији са коактивацијом (ко-контракцијом) агонистичких и антагонистичких мишића који окружују зглоб, али је ова веза веома нелинеарна [4]. Да би се регистровала активност таргетираних мишића најчешће се у истраживачке сврхе користи површинска електромиографија (енг. *surface ElectroMyoGraphy, sEMG*), јер је потпуно неинвазивна и јефтина, а верно осликава информацију о намери покрета која се нервима шаље од мозга до мишића [5]. Међутим, упркос прилично директној вези између покрета (или намере покрета) и ЕМГ сигнала, мапирање измерених биосигнала у команде актуатора није једноставан задатак. У покушају да се ови изазови превазиђу, методе препознавања покрета/образаца (енг. *gesture/pattern recognition*) често чине основу миоелектричног контролера: обучава се модел машинског учења да учи обрасце из података и препознаје покрет, који се потом мапира у смислене контролне команде за робота [6]. Међутим, да би били прихваћени за ширу примену, системи засновани на миоелектричном контролеру предложени у литератури стреме да испуне важне критеријуме као што су: интуитивна

контрола у реалном времену, минимално кашњење, минималан број електрода неосетљивих на репозиционирање, минимално време потребно за обуку и слично [7].

Поред контроле, подједнако важан аспект интерфејса човек-машина, нарочито приликом контроле на даљину, је сензорна повратна информација људском оператеру. Најчешћи сензорни канал су камере смештене у окружењу у ком робот врши задатак, али за постизање илузије присуства на удаљеној локацији (енг. *telepresence*) важна је хаптичка повратна информација [8]. Информације о појединостима контакта са објектом којим се манипулише (примењеној сили, тврдоћи, текстури и сл.) чине тзв. хаптички фидбек (енг. *haptic feedback*) и значајно допуњују визуелну информацију оператеру. Хаптички фидбек се може остварити механичком стимулацијом површине коже једног одређеног или више делова тела, најчешће применом вибро-мотора (вибротактилна стимулација) [9]. За разлику од вибротактилних, електротактилни фидбек интерфејси могу да обезбеде добро локализоване и контролисане тактилне сензације. Најновија истраживања довела су до развоја компактних електрода које могу да интегришу матрицу стимулационих поља, и на тај начин постигну високе просторне резолуције [10]. Штавише, пошто нема покретних механичких компоненти, електротактилни системи су тихи, брзог одзива и енергетски ефикасни.

Роботске хватаљке које у основи хардвера имају еластичне елементе пружају мноштво праваца за истраживање система за безбедно хватање и манипулацију у коју је укључен човек. Циљ истраживања је унапређење два аспекта интерфејса човек-робот: управљање хватаљком са промењивом крутошћу засновано на миоелектричном контролеру и обезбеђивање повратне информације оператеру о стању хватаљке. Поред поузданог препознавања покрета човека методама машинског учења (енг. *machine learning*) биће дат осврт и на друге изазове приликом контроле у реалном времену - од једноставности и робустности система до контроле више степени слободе попустљиве хватаљке. Са друге стране, људском оператеру биће омогућено да, примањем експлицитних информација о положају и крутости хватаљке путем електротактилне стимулације, проактивно реагује и избегне ризичне ситуације које могу да изазову штету приликом хвата. Применом предложених техника природног и интуитивног управљања, и информативног и поузданог фидбека затвориће се контролна петља између човека са једне и завршног уређаја робота са друге стране.

- [1] Lichardopol, S. "A survey on teleoperation." (2007). (DCT rapporten; Vol. 2007.155). Technische Universiteit Eindhoven.
- [2] Braun, David J., et al. "Robots driven by compliant actuators: Optimal control under actuation constraints." *IEEE transactions on robotics* 29.5 (2013): 1085-1101.
- [3] Wolf, Sebastian, et al. "Variable stiffness actuators: Review on design and components." *IEEE/ASME transactions on mechatronics* 21.5 (2015): 2418-2430.
- [4] Kim, Hyun K., et al. "Estimation of multijoint stiffness using electromyogram and artificial neural network." *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans* 39.5 (2009): 972-980.
- [5] Farina, Dario, et al. "The extraction of neural information from the surface EMG for the control of upper-limb prostheses: emerging avenues and challenges." *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering* 22.4 (2014): 797-809.
- [6] Phinyomark, Angkoon, and Erik Scheme. "EMG pattern recognition in the era of big data and deep learning." *Big Data and Cognitive Computing* 2.3 (2018): 21.

- [7] Englehart, Kevin, Bernard Hudgins, and Adrian DC Chan. "Continuous multifunction myoelectric control using pattern recognition." *Technology and disability* 15.2 (2003): 95-103.
- [8] Trinitatova, Daria, et al. "Exploring the role of electro-tactile and kinesthetic feedback in telemanipulation task." 2022 IEEE 18th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), Mexico City, Mexico, IEEE, (2022), pp. 641 - 646.
- [9] Pacchierotti, Claudio, and Domenico Prattichizzo. "Cutaneous/tactile haptic feedback in robotic teleoperation: Motivation, survey, and perspectives." *IEEE Transactions on Robotics* 40 (2023): 978-998.
- [10] Štrbac, Matija, et al. "Integrated and flexible multichannel interface for electrotactile stimulation." *Journal of neural engineering* 13.4 (2016): 046014.

3. Полазне хипотезе

Истраживање ће се заснивати на следећим хипотезама:

- Одабраним методама машинског учења, и специфично дубоког учења, могуће је прецизно препознавање покрета шаке који могу омогућити довољан број команди за једноставну и поуздану контролу попустљиве роботске хватаљке.
- Висока тачност препознавања покрета може се постићи класификаторима користећи значајно мању количину података за тренинг услед редукованог броја ЕМГ канала, обележја и фреквенције одабирања сигнала.
- Поред тога што има одзив у складу са захтевима контроле у реалном времену, класификатор може бити изузетно робустан на непознате улазе (нпр. подаци других субјеката који нису учествовали у тренингу) што ће елиминисати потребу за калибрацијом.
- Могуће је мапирати излазе модела машинског учења у смислене команде попустљивој роботској хватаљци тако да се оствари контрола два степена слободе.
- Предложена хибридна контролна стратегија омогућиће секвенцијално-пропорцијално управљање попустљивом роботском хватаљком на једноставан и интуитиван начин.
- Електротактилни фидбек високе резолуције може да унапреди роботски систем који укључује попустљиву хватаљку обезбеђивањем прецизног позиционирања хватаљке путем просторне модулације електричне стимулације на малом подручју - прсту.
- Модулација фреквенције електротактилне стимулације у циљу преноса информације о крутости хватаљке побољшаће контролу крутости, идеално, без нарушавања перцепције и интерпретације фидбека позиције.
- Додатни фидбек крутости допринеће безбеднијем хвату, те спречити потенцијалну штету или исклизивање.

4. Методе истраживања

За потребе овог истраживања биће коришћен *QBmove maker pro (QB)*, произвођача *qbrobotics*. *QB* је антагонистички актуатор промене крутости, чији се излазни положај и крутост регулишу задавањем позиције два мотора који су са излазним вратилом повезани бидирекционим опругама. Хватаљка је постављена директно на излазно вратило, тако да је

њен отвор пропорционалан углу вратила. Контрола хватаљке је замишљена да буде миоелектрична – уз помоћ техника машинског учења врши се препознавања покрета шаке, а потом и мапирање у интуитивне команде.

Главни предуслови за имплементацију миоелектричног контролера базираног на принципима препознавања патерна су: висококвалитетни класификатор и оптимална количина података (број ЕМГ канала, фреквенција одабирања сигнала, величина скупа обележја). Да би се испитао утицај првог фактора, биће направљено поређење перформанси неколико класификатора тренираних мноштвом појединачних, али и сетова обележја који су у литератури предложени за сличне проблеме класификације. Поред тога, биће истренирано неколико неуралних мрежа чије архитектуре се базирају на барем једном ЛСТМ (енг. *Long-Short Term Memory, LSTM*) слоју. ЛСТМ је посебан тип рекурентних неуралних мрежа (енг. *Recurrent Neural Network, RNN*) погодних за учење дугорочних зависности између узорака. Поред квалитета класификатора, од значаја је и да ЕМГ контрола не оптерећује корисника (због опреме коју мора да носи, задатка и калибрације/тренинга), да процес снимања и обраде сигнала буде што краћи и једноставнији, те да није условљен прецизним позиционирањем електрода.

Системи контроле завршног уређаја који се заснивају на препознавању људских покрета изложени су једном од главних ограничења конвенционалне контроле, а то је неприродан начин обављања задатака. Наиме, симултана и пропорцијална контрола удова која је својствена човеку је изазовна за мапирање на робота, из мноштва разлога. Стога, са лимитираним бројем електрода и покрета који могу поуздано да се детектују, оваквим методама се најчешће изводи секвенцијално управљање једног степена слободе, са могућношћу да се степен слободе мења одређеним „switch“ сигналом. У контексту попустљиве хватаљке, биће предложено неколико стратегија за управљање два параметра: позиције и крутости. У основи команди ће бити излази раније предложених класификационих модела, а перформансе развијених контролних метода биће евалуиране на основу прецизности, утрошеног времена и енергије да се обави одређени задатак. Након одабира оптималне методе управљања, перформансе система ће бити испитане у реалном задатку хватања уз неки вид повратне информације (нпр. визуелне) о стању хватаљке робота реализоване помоћу актуатора промењиве крутости.

Као алтернатива или допуна визуелног фидбека биће испитана употреба електричне стимулације за обезбеђивање тактилног фидбека у системима са попустљивом роботском хватаљком. Електротактилни интерфејси за повратну спрегу могу да обезбеде добро локализоване и контролисане сензације додиром чему додатно доприносе матричне електроде за постизање високе просторне резолуције. Компактни, програмабилни, мултиканални стимулатор обезбеђује генерисање унапред дефинисаних струјних импулса који се потом спроводе на жељена поља електроде. Модулацијом параметара стимулације, најчешће интензитета, фреквенције и локације, могуће је кодирати информације о стању хватаљке (позиције и крутости) чак и на малим деловима коже нпр. на прсту. Обезбеђивање мултиваријантне електротактилне повратне информације замишљено је да буде од значаја особи која управља роботом, дајући му прилику да, увидом у тренутну позицију и крутост хватаљке, реагује проактивно и унапред избегне ситуације у којима може доћи до штете услед примене прекомерне силе.

5. Очекивани научни доприноси

Очекује се да резултати ове дисертације остваре следеће научне доприносе:

- Предложена контролна петља заснована на миоелектричној контроли и електротактилној повратној спрези омогућиће да корисници поуздано задају и интерпретирају информације о крутости, те на основу тога модулишу понашање хватаљке. Ово је посебно значајно за будуће роботске и протетичке системе, јер постојећи системи углавном интегришу сензоре силе који су често непрактични, а корисници регулишу силе интеракције на основу индиректних назнака (нпр. визуелно).
- Уз минималан обим опреме, паметне алгоритме машинског учења и пажљиво осмишљене команде, природним људским покретима биће омогућено задавање како крутости, тако и позиције хватаљке.
- Указаће на важност крутости завршног уређаја робота као фактора који одређује безбедно, робусно и ефикасно извршење задатка хватања. Повратне информације о крутости ће корисницима дати могућност да проактивно дефинишу хват, прилагоде енергију хватања и спрече оштећења или клизање.
- Показаће да свест о задатој позицији и крутости, подржана сензорском/тактилном повратном спрегом, може бити камен темељац интеракције човек-робот и човек-протеза следеће генерације, премошћавајући јаз између вештачких и биолошких могућности манипулације.

6. План истраживања

Истраживање ће се спровести кроз следеће кораке:

1. Претрага научно-стручне литературе ради анализе постојећих праваца истраживања у области тактилног фидбека интегрисаног у системе са актуаторима променљиве крутости, и примене машинског учења и миоелектричне контроле у истим системима;
2. Испитивање метода машинског учења које могу да обезбеде једноставну, биоинспирану, а робусну контролу крутости завршног уређаја робота - хватаљке;
3. Реализација више начина секвенцијално-пропорционалне миоелектричне контроле једног (крутости) или два (позиције и крутости) степена слободе хватаљке.
4. Побољшање система интеграцијом електротактилне стимулације за обезбеђивање повратних информација о стању актуатора.

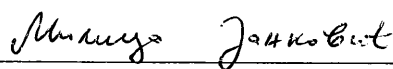
7. Закључак и предлог

На основу изложеног, Комисија констатује да кандидаткиња Горана Миловановић, мастер инжењер електротехнике и рачунарства, испуњава све формалне и суштинске услове за израду докторске дисертације под насловом „Интерфејс човјек-машина за роботске системе промјениве крутости заснован на миоелектричној контроли и електротактилној повратној спрези”. Кандидаткиња је демонстрирала способност систематичног приступа анализи проблема и излагања резултата у научној заједници, као и теоријска и практична знања потребна за израду дисертације.

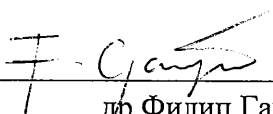
Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да кандидаткињи Горани Миловановић, мастер инжењеру електротехнике и рачунарства, одобри израду докторске дисертације у оквиру уже научне области Аутоматика, подобласт Роботика, под насловом „Интерфејс човјек-машина за роботске системе промјениве крутости заснован на миоелектричној контроли и електротактилној повратној спрези”, под менторством др Косте Јовановића, ванредног професора на Електротехничком факултету Универзитета у Београду.

У Београду, 27.2.2026. године

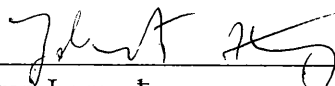
ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



др Милица Јанковић, редовни професор,
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Филип Гашпарић, доцент,
Универзитет у Новом Саду - Факултет техничких наука



др Ненад Јовичић, ванредни професор,
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

