

ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

I ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ		
1. Датум и орган који је именовео комисију: Декан Факултета техничких наука на основу одлуке Наставно-научног већа Факултета техничких наука у Новом Саду, решење број 012-40/7-2024 дана 30.05.2024.		
2. Састав комисије у складу са <i>Правилима докторских студија Универзитета у Новом Саду</i> :		
1. др Милан Рапаић	Редовни професор	Аутоматика и управљање системима, 07.10.2021.
презиме и име	звање	ужа научна област и датум избора
Факултет техничких наука, Нови Сад		Председник
установа у којој је запослен-а		функција у комисији
2. др Милица Јанковић	Ванредни професор	Биомедицинска техника, 15.12.2020.
презиме и име	звање	ужа научна област и датум избора
Електротехнички факултет, Београд		Члан
установа у којој је запослен-а		функција у комисији
3. др Војин Илић	Редовни професор	Аутоматика и управљање системима, 24.10.2023.
презиме и име	звање	ужа научна област и датум избора
Факултет техничких наука, Нови Сад		Члан
установа у којој је запослен-а		функција у комисији
4. др Дарко Станишић	Ванредни професор	Аутоматика и управљање системима, 01.12.2019.
презиме и име	звање	ужа научна област и датум избора
Факултет техничких наука, Нови Сад		Члан
установа у којој је запослен-а		функција у комисији
5. др Мирна Капетина	Ванредни професор	Аутоматика и управљање системима, 01.05.2023.
презиме и име	звање	ужа научна област и датум избора
Факултет техничких наука, Нови Сад		Члан
установа у којој је запослен-а		функција у комисији
6. др Никола Јорговановић	Редовни професор	Аутоматика и управљање системима, 02.07.2014.
презиме и име	звање	ужа научна област и датум избора
Факултет техничких наука, Нови Сад		Ментор

установа у којој је запослен-а		функција у комисији
7. др Страхиња Дошен	Редовни професор	Рехабилитациона роботика, 01.09.2022.
презиме и име	звање	ужа научна област и датум избора
Медицински Факултет, Универзитет у Алборгу, Алборг, Данска		Ментор
установа у којој је запослен-а		функција у комисији

II ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

- Име, име једног родитеља, презиме:
Филип, Зоран, Гашпарић
- Датум рођења, општина, држава:
30.12.1994. Нови Сад, Република Србија (СРЈ)
- Назив факултета, назив претходно завршеног нивоа студија и стечени стручни/академски назив:
Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду, Мастер студије, Мастер инжењер биомедицинског инжењерства
- Година уписа на докторске студије и назив студијског програма докторских студија:
2018. година, Рачунарство и аутоматика

III НАСЛОВ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Вибротактилна повратна спрега за предиктивно и корективно управљање миоелектричном протезом шаке

IV ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Навести кратак садржај са знаком броја страница, поглавља, слика, схема, графикона и сл.

Докторска дисертација је написана на 92 странице. Садржи 8 поглавља, 27 слика, 3 табеле, 2 прилога и 119 референци.

Садржај докторске дисертације је следећи:

- Увод
- Стање у области истраживања
- Предмет, циљ и хипотезе истраживања
- Метод
- Резултати
- Дискусија
- Закључак
- Литература
- Прилог 1
- Прилог 2

V ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Истраживање представљено у докторској дисертацији кандидата припада научној области Електротехничко и рачунарско инжењерство и ужој научној области Биомедицинско инжењерство. Докторском дисертацијом представљено је решење за управљање комерцијалном миоелектричном протезом шаке засновано на вештачкој повратној спрези са циљем да се олакшају биолошки механизми одговорни за успешно извођење покрета хватања предмета.

Прво поглавље представља увод у област истраживања. Укратко су описани проблеми са којима се особе са ампутацијом горњих екстремитета свакодневно сусрећу и начини да се овим особама помогне кроз употребу миоелектричних протетичких помагала. Кандидат је нагласио да је један од главних недостатака ових уређаја одсуство повратних сензорних информација ка самом кориснику, уз опис мотивације за даља истраживања у овој области. На крају уводног дела представљена је структура докторске дисертације уз кратак опис појединачних поглавља.

Друго поглавље подељено је у три целине и намењено је прегледу постојеће литературе у области истраживања. У првој целини јасно су дефинисане и објашњене методе за управљање савременим протезама за горње екстремитете. Друга целина се бави биолошким механизмима одговорним за покрете које особе могу да изводе помоћу горњих екстремитета, са посебним акцентом на значај који повратне, сензорне информације имају приликом њихове реализације. Кандидат је јасно објаснио принцип функционисања ових механизма код особа са функционално здравим рукама, а потом и код корисника миоелектричних протеза. Истакнуто је да је покрет хватања предмета комбинација предиктивног планирања и одговарајуће корективне активности у случају неочекиваних сензорних последица. Последња целина представља детаљан преглед постојећих решења за имплементацију вештачке повратне спреге ка кориснику у системима са миоелектричном протезом, са посебним нагласком на предности и недостатке појединачних решења.

Кандидат је у трећем поглављу јасно и недвосмислено навео и образложио циљеве и хипотезе истраживања представљеног у докторској дисертацији уз кратак опис метода које су биле коришћене. Објашњено је да је експериментални део истраживања био подељен у три фазе и да су у првој и другој учествовали испитаници са функционално здравим рукама, а у трећој особе са трансрадијалном ампутацијом горњих екстремитета.

Четврто поглавље намењено је за приказ новог решења за управљање миоелектричном протезом заснованог на вештачкој повратној спрези користећи неинвазиван, вибротактилни комуникациони интерфејс, уз објашњење метода за његову евалуацију. Ово поглавље је подељено у три целине које одговарају појединачним фазама експерименталног дела истраживања. У првој целини дефинисани су принципи по којим се измерени ЕМГ сигнали претварају у управљачке команде за миоелектричне протезе уз опис експеримента у ком су два уобичајена приступа упоређена (линеарно наспрам нелинеарног мапирања). У другој целини кандидат је описао начин на који је имплементирана вибротактилна повратна спрега, која кроз секвенцијални пренос информација о интензитету мишићне контракције и сили којом шака делује на предмет који држи (тзв. комбинована повратна спрега) треба да олакша предиктивне и корективне механизме које корисник миоелектричне протезе упошљава приликом хватања предмета. Кандидат је у истој целини детаљно описао експерименталну процедуру за евалуацију њеног утицаја на тачност и брзину приликом обављања једног реалистичног, функционалног задатка (хватање предмета). У последњој целини, представљена је могућност за клиничку translацију предложеног решења, где су све компоненте за миоелектричну протезу и вибротактилну повратну спрегу биле уграђене унутар комерцијалног лежишта. Кандидат је описао начин на који је лонгитудинална (вишедневна) релевантност предложеног решења за управљање протезом у затвореној повратној спрези испитана међу особама са трансрадијалном ампутацијом.

Пето поглавље намењено је за приказ добијених резултата у свакој од појединачних фаза експерименталног дела истраживања. Кандидат је применом одговарајућих метода за статистичку анализу података и адекватном визуелизацијом добијених резултата јасно истакао разлике између појединачних експерименталних услова.

Дискусија и анализа добијених резултата, њихово поређење са студијама у научној литератури које су се бавиле сличном проблематиком, и провера хипотеза овог истраживања дато је у шестом поглављу. Ово поглавље је организовано тако да су главни закључци представљени и дискутовани у независним целинама.

Седмо поглавље даје кратак резиме истраживања представљеног у докторској дисертацији, истиче

главни допринос и указује правац даљег истраживања.

На крају, кандидат је навео литературу на коју се ослањао у току рада на докторској дисертацији. Дисертација садржи и два прилога који дају подробнији увид у резултате које су остварили испитаници са трансрадијалном ампутацијом и на које се кандидат позивао приликом анализе резултата и извођења закључака.

Комисија закључује да је кандидат јасно изложио предмет, циљеве и хипотезе истраживања представљеног у докторској дисертацији. Литература која је коришћена како би анализирао стање и указао на проблеме у области истраживања је адекватна. Опис метода, резултата и њихова анализа је јасна, недвосмислена и прецизно указује на главне закључке који су из њих проистекли. **У складу са тим, Комисија позитивно оцењује све делове докторске дисертације.**

VI СПИСАК НАУЧНИХ И СТРУЧНИХ РАДОВА КОЈИ СУ ОБЈАВЉЕНИ ИЛИ ПРИХВАЋЕНИ ЗА ОБЈАВЉИВАЊЕ НА ОСНОВУ РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА У ОКВИРУ РАДА НА ДОКТОРСКОЈ ДИСЕРТАЦИЈИ:

Таксативно навести називе радова, где и када су објављени. Прво навести најмање један рад објављен или прихваћен за објављивање у складу са *Правилима докторских студија Универзитета у Новом Саду* који је повезан са садржајем докторске дисертације. У случају радова прихваћених за објављивање, таксативно навести називе радова, где и када ће бити објављени и приложити потврду уредника часописа о томе.

1. **Gašparić F.**, Jorgovanović N., Hofer C., Russold M., Koppe M., Stanišić D., Došen S., A Novel Sensory Feedback Approach to Facilitate Both Predictive and Corrective Control of Grasping Force in Myoelectric Prostheses, *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, **31** (2023), pp. 4492-4503. EISSN: 1558-0210, doi: 10.1109/TNSRE.2023.3330502 (**M21**)
2. **Gašparić F.**, Jorgovanović N., Hofer C., Russold M., Koppe M., Stanišić D., Došen S., Nonlinear Mapping From EMG to Prosthesis Closing Velocity Improves Force Control With EMG Biofeedback, *IEEE Transactions on Haptics*, **16** (2023), pp. 379-390. EISSN: 2329-4051, doi: 10.1109/TOH.2023.3293545 (**M22**)
3. Maravić N., Došen S., **Gašparić F.**, Hofer C., Russold M., Koppe M., Gonzalez-Vargas J., Jorgovanović N., Stanišić D., "FEEBY: A Flexible Framework for Fast Prototyping and Assessment of Vibrotactile Feedback for Hand Prostheses," *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, **6** (2024), pp. 746-756. EISSN: 2576-3202, doi: 10.1109/TMRB.2024.3385790 (**M24**)

VII ЗАКЉУЧЦИ ОДНОСНО РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА:

На основу анализе резултата добијених у експерименталном делу истраживања кандидат је извео неколико закључака које је на систематски начин образложио у дискусији.

Закључак 1: *Комбинована повратна спрега побољшава управљање миоелектричном протезом већ након кратке обуке испитаника.* Како би се испитала ефикасност предложеног решења за управљање миоелектричном протезом засновано на комбинованој повратној спрези, група од 16 испитаника без инвалидитета изводила је један реалистичан, функционалан задатак, настао по узору на тзв. *Box and block test*, у којем је фокус био на примени адекватне силе приликом хватања предмета. Статистичка анализа резултата (*one-way repeated measures ANOVA* са *post hoc t*-тестовима са *Bonferroni* корекцијом за вишеструка поређења или *Friedman test*, а потом и *Wilcoxon signed-rank test* са *Bonferroni* корекцијом за међусобна поређења појединачних услова) показала је да су испитаници, након што би прошли кратку обуку претходног дана, постигли значајно виши проценат успешних покушаја са новом, комбинованом повратном спрегом, него у случају када су могли да се ослањају само на предиктивну ЕМГ повратну спрегу или када је вибротактилна стимулација била потпуно искључена. Исти тренд уочен је и нешто касније, у делу истраживања који је спроведен међу испитаницима са трансрадијалном ампултацијом. На основу ових резултата, закључено је да испитаници врло брзо могу да интегришу информације о интензитету мишићне контракције и сили којом шака делује на предмет у сопствене механизме моторне контроле, када им се оне испоручују секвенцијално, у виду вибротактилних стимулуса, побољшавајући на тај начин тачност у генерисању жељене силе када се хвата предмет.

Закључак 2: *Комбинована повратна спрега испитаницима из циљане популације обезбеђује пролонгирано (током вишедневних експерименталних сесија) побољшање управљања миоелектричном протезом у клинички релевантним околностима.* Циљ дела истраживања спроведеног међу 6 особа са трансрадијалном ампултацијом био је да се испита могућност клиничке транслације предложеног решења за управљање миоелектричном протезом засновано на вибротактилној повратној спрези, као и да се испита утицај који претходно искуство у обављању реалистичног функционалног задатка има на практични значај комбиноване повратне спреге. У ту сврху, за сваког испитаника је израђено одговарајуће лежиште по мери њихове резидуалне руке, унутар ког су биле интегрисане све компоненте за миоелектричну протезу и вибротактилну повратну спрегу, док су они имали исти задатак као и особе без инвалидитета, с тим да су валидационе сесије поновљене током три дана. Резултати су показали да су испитаници, током сва три дана, остварили највиши проценат успешности када су користили комбиновану повратну спрегу, а најнижи у случају када је вибротактилна стимулација била искључена. Иако су испитаници успели да са већим искуством побољшају своје резултате у сва три случаја (без повратне спреге, ЕМГ повратна спрега, комбинована повратна спрега), супротно очекивањима које је кандидат навео, њихов међусобни однос је током сва три дана остајао приближно непромењен. На основу тога, закључено је да комбинована повратна спрега, и поред све већег искуства испитаника, може да обезбеди пролонгирано побољшање управљања миоелектричном протезом када обављају један реалистичан задатак у клинички релевантним околностима. Кандидат је у дискусији такође истакао и детаљно образложио специфичности у резултатима сваког појединачног испитаника.

Закључак 3: *Комбинована повратна спрега олакшава предиктивне и корективне биолошке механизме приликом управљања миоелектричном протезом.* Како би се испитало колики је био допринос предиктивног (информација о интензитету мишићне контракције), а колики корективног (информација о генерисаној сили којом шака делује на предмет) дела комбиноване повратне спреге на укупни učinак испитаника, у обе групе испитаника, бележена је и вредност иницијалне силе, коју су у иначе успешним покушајима испитаници произвели у тренутку регистрованог контакта између вештачке шаке и предмета. Показано је да је у највећем броју случајева вредност иницијалне силе одговарала или циљаном нивоу, или једном нивоу испод. На основу последњег, закључено је да када хватају предмет, у случају комбиноване повратне спреге, испитаници често користе информацију о интензитету мишићне контракције како би произвели силу хватања која је близу циљаног нивоа (један ниво испод), да би затим додатно појачали мишићну контракцију како би достигли циљани ниво ослањајући се на информацију о стварној сили, минимизујући на тај начин могућност да се циљана сила прекорачи, што у протетици представља крајње непожељан исход. Кандидат је истакао да овакво понашање испитаника јасно указује на чињеницу да су испитаници приликом хватања предмета применили и предиктивни и корективни приступ,

односно да су успешно експлоатисали комбиновану повратну спрегу како би унапредили сопствене предиктивне и корективне механизме моторне контроле.

Закључак 4: *Комбинована повратна спрега негативно утиче на брзину којом испитаници обављају задатак.* Кандидат је истакао да и поред позитивног ефекта на тачност у генерисању жељене силе, комбинована повратна спрега ипак негативно утиче на брзину којом испитаници обављају задатак. Статистичком анализом података добијених међу групом испитаника без инвалидитета (*one-way repeated measures ANOVA са post hoc t-тестовима са Bonferroni корекцијом за вишеструка поређења или Friedman test, а потом и Wilcoxon signed-rank test са Bonferroni корекцијом за међусобна поређења појединачних услова*) показано је да је просечно време које је испитаницима било неопходно за један успешан покушај, за већину дискретних нивоа силе значајно повећано у случају када су користили комбиновану повратну спрегу у односу на ситуацију када су користили ЕМГ повратну спрегу или када је вибротактилна стимулација била искључена. Исти тренд уочен је и у резултатима који су добијени у групи испитаника са трансрадијалном ампутацијом и он је остао приближно непромењен током сва три валидациона дана.

Закључак 5: *Нелинеарно мапирање између миоелектричног сигнала и силе којом шака делује на предмет обезбеђује већу тачност приликом предиктивног регулисања силе у поређењу са линеарним мапирањем.* Кандидат је истакао да у литератури уобичајено постоје два приступа која се користе приликом имплементације предиктивне ЕМГ повратне спреге, али да они до сад нису никад упоређени директно; једно је засновано на еквидистантној подели нормализованог миоелектричног опсега, а друго на нееквидистантној, што доводи до линеарног, односно нелинеарног мапирања ЕМГ сигнала у управљачку команду, а тиме и силу коју генерише затворена шака, респективно. Кандидат је образложио да је основни мотив за имплементацију нелинеарног мапирања (нееквидистантна подела нормализованог миоелектричног опсега) чињеница да је за ЕМГ сигнале карактеристично присуство мултипликативног шума, односно да њихова варијабилност расте са снажнијим мишићним контракцијама. Ова два приступа експериментално су упоређена у групи од 20 испитаника без инвалидитета, који су имали задатак да остваре циљани ниво силе одмах у тренутку регистрованог контакта, тј. када се шака затвори. Статистичка анализа добијених резултата (*mixed model ANOVA*) показала је да су испитаници остварили значајно виши проценат успешности када су користили нелинеарно мапирање. Оно се показало посебно ефикасним у комбинацији са ЕМГ повратном спрегом, јер је то био услов у ком су испитаници остварили највећи проценат успешних покушаја са просечно најмањом дисперзијом грешака. На основу ових резултата, закључено је да нелинеарно мапирање у комбинацији са ЕМГ повратном спрегом позитивно утиче на тачност у генерисању жељене силе приликом предиктивног хватања предмета.

VIII ОЦЕНА НАЧИНА ПРИКАЗА И ТУМАЧЕЊА РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА:

Експлицитно навести позитивну или негативну оцену начина приказа и тумачења резултата истраживања.

Садржај докторске дисертације је јасан, недвосмислен и добро структуриран. Резултати истраживања изложени су на јасан, прегледан и систематичан начин, уз адекватну употребу слика и табела које олакшавају њихову интерпретацију и истичу разлике између појединачних експерименталних услова. Анализа резултата је спроведена адекватно, употребом одговарајућих статистичких метода. Формирани закључци су аргументовани, научно релевантни и у складу са дефинисаним циљевима истраживања и приказаним резултатима.

На основу тога, Комисија позитивно оцењује начин приказа и тумачења резултата истраживања докторске дисертације.

Рад је проверен софтвером за детекцију плагијаризма у Библиотеци Факултета техничких наука у Новом Саду. Нису пронађене сличности које би указивале на било какву врсту плагијаризма, те Комисија констатује да је ова докторска дисертација оригинално дело аутора.

IX КОНАЧНА ОЦЕНА ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Експлицитно навести да ли дисертација јесте или није написана у складу са наведеним образложењем, као и да ли она садржи или не садржи све битне елементе. Дати јасне, прецизне и концизне одговоре на 3. и 4. Питање. Навести нумеричке податке о резултатима провере оригиналности рада и дати текстуално образложење.

1. Да ли је дисертација написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме?

Да, докторска дисертација је написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме.

2. Да ли дисертација садржи све битне елементе?

Да, докторска дисертација садржи све битне елементе.

3. По чему је дисертација оригиналан допринос науци?

У докторској дисертацији представљено је оригинално решење за управљање миоелектричном протезом шаке у затвореној повратној спрези засновано на биомиметичком моделу процеса моторне контроле користећи неинвазивну, вибротактилну стимулацију за комуникациони интерфејс. Посебно се могу истаћи оригинални научни доприноси предложених метода за нелинеарно мапирање миоелектричних сигнала, метода за кодирање вибротактилне стимулације која представља повратну спрегу ка кориснику и примењеној методи управљања протезом засновану на предиктивној и корективној управљачкој стратегији. Такође, значајан научни допринос ове дисертације представљају резултати и закључци добијени на основу веома обимне студије спроведене над особама без инвалидитета и клиничке студију која је обухватила шест испитаника са трансрадијалном ампутацијом. Ова студија је недвосмислено показала да оваква врста повратне спреге може да побољша биолошке механизме одговорне за успешно извођење покрета хватања предмета, који су код корисника миоелектричних протеза значајно нарушени.

4. Који су недостаци дисертације и какав је њихов утицај на резултат истраживања?

Докторска дисертација не поседује недостатке који би негативно утицали на приказане резултате истраживања.

5. Образложење резултата провере оригиналности рада (нумерички и наративно):

Индекс сличности: 1%

На основу извештаја о подударности, након провере докторске дисертације у софтверу *iThenticate*, констатује се да је сличност са другим већ објављеним радовима до један проценат. Софтвер је пронашао 60 подударања са укупно 49 различитих извора. Сва подударања су језичка, на нивоу дела реченице и немају везе са темом и доприносом докторске тезе. На основу изнесеног, Комисија констатује да је теза у потпуности оригинално ауторско дело кандидата.

X ПРЕДЛОГ:
На основу наведеног, комисија предлаже:
а) да се докторска дисертација прихвати, а кандидату одобри одбрана.

Место и датум: Нови Сад, 05.06.2024.

1. др Милан Рапаић, Редовни професор
_____, председник
2. др Милица Јанковић, Ванредни професор
_____, члан
3. др Војин Илић, Редовни професор
_____, члан
4. др Дарко Станишић, Ванредни професор
_____, члан
5. др Мирна Капетина, Ванредни професор
_____, члан
6. др Никола Јорговановић, Редовни професор
_____, ментор
7. др Страхмиња Дошен, Редовни професор
_____, ментор

НАПОМЕНА: Члан комисије који не жели да потпише извештај јер се не слаже са мишљењем већине чланова комисије, дужан је да унесе у извештај образложење односно разлоге због којих не жели да потпише извештај и да исти потпише.