Универзитет у Београду
Електротехнички факултет

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Милоша Петровића

Одлуком бр. 1641/23 од 15.09.2026. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед и оцену докторске дисертације кандидата Милоша Петровића под насловом

„Примена вештачке интелигенције за анализу и унапређење безбедности и ергономичности радних места у индустрији".

После прегледа достављене Дисертације и других пратећих материјала и разговора са Кандидатом, Комисија је сачинила следећи

Р Е Ф Е Р А Т

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

10.10.2019. године Милош Петровић је уписао докторске академске студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, на модулу Управљање системима и обрада сигнала. Све испите предвиђене наставним планом и програмом докторских студија положио је са просечном оценом 10.

27.10.2022. године Милош Петровић је пријавио тему за израду докторске дисертације под радним насловом „Примена вештачке интелигенције за анализу и унапређење безбедности и ергономичности радних места у индустрији" (енг. „Application of artificial intelligence for analysis and improvement of industrial workplace safety and ergonomics").

01.11.2022. године Комисија за студије трећег степена разматрала је предлог теме за израду докторске дисертације и предлог Комисије за оцену научне заснованости теме упутила је Наставно-научном већу на усвајање.

18.11.2022. године Наставно-научно веће именовало је Комисију за оцену научне заснованости теме докторске дисертације у саставу:

- др Горан Квашчев, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет.
- др Арсо М. Вукићевић, виши научни сарадник, Универзитет у Крагујевцу – Факултет инжењерских наука;
- др Дражен Драшковић, доцент, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет;

За ментора је предложен др Коста Јовановић, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет.

24.11.2022. године обављена је јавна усмена одбрана теме докторске дисертације на Електротехничком факултету у Београду пред комисијом у саставу:

- др Горан Квашчев, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет.
- др Арсо М. Вукићевић, виши научни сарадник, Универзитет у Крагујевцу – Факултет инжењерских наука;
- др Дражен Драшковић, доцент, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет;

На одбрани су присуствовали сви чланови Комисије. Комисија је оценила усмену одбрану предложене теме као успешну (оцена "задовољио").

16.12.2022. године Наставно-научно веће усвојило је Извештај Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације.

23.01.2023. године Већа научних области техничких наука Универзитета у Београду дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације Милоша Петровића под насловом „Примена вештачке интелигенције за анализу и унапређење безбедности и ергономичности радних места у индустрији" (енг. „Application of artificial intelligence for analysis and improvement of industrial workplace safety and ergonomics") (број 61206-227/2-23 од 23.01.2023. године).

На основу члана 101. Статута Универзитета у Београду, члана 74. Статута Универзитета у Београду – Електротехничког факултета и захтева студента, одобрено је продужење рока за завршетак студија до истека троструког броја школских година потребних за реализацију уписаног студијског програма.

25.08.2026. године кандидат Милош Петровић предао је на преглед и оцену докторску дисертацију под насловом „Примена вештачке интелигенције за анализу и унапређење безбедности и ергономичности радних места у индустрији" (енг. „Application of artificial intelligence for analysis and improvement of industrial workplace safety and ergonomics").

01.09.2026. године Комисија за студије трећег степена потврдила је испуњеност потребних услова за подношење предлога Наставно-научном већу Електротехничког факултета за формирање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације.

15.09.2026. године Наставно-научно веће Факултета именовало је Комисију за преглед и оцену докторске дисертације (број одлуке 1641/23 од 15.09.2026. године) у саставу:

- др Никола Кнежевић, доцент, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет;
- др Дражен Драшковић, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет;
- др Арсо М. Вукићевић, виши научни сарадник, Универзитет у Крагујевцу – Факултет инжењерских наука.

1.2. Научна област дисертације

Дисертација кандидата Милоша Петровића припада научној области Електротехника и рачунарство, ужој научној области Роботика и управљање системима, за коју је матичан Електротехнички факултет Универзитета у Београду. За ментора дисертације одређен је др Коста Јовановић, ванредни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду. Тематика дисертације обједињује методе вештачке интелигенције, компјутерске визије,

анализе биосигнала и колаборативне роботике у циљу анализе и унапређења безбедности и ергономичности индустријских радних места.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Милош Петровић рођен је 17.06.1995. године у Београду, где је завршио основну и средњу школу. Током школовања освојио је више награда на републичким такмичењима из математике, физике и хемије и остварио пласман на Српску физичку олимпијаду.

Електротехнички факултет Универзитета у Београду уписао је 2014. године. Основне академске студије на Одсеку за сигнале и системе завршио је 2018. године са просечном оценом 9,63, а мастер академске студије 2019. године са просечном оценом 10. Истраживање у оквиру мастер рада спровео је током шестомесечног боравка на Политехничком универзитету у Мадриду у оквиру Еразмус+ програма.

Докторске академске студије уписао је 2019. године на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, под менторством проф. др Косте Јовановића. Од 2020. године ангажован је на Електротехничком факултету, а тренутно је у звању истраживача сарадника. Његов научноистраживачки рад усмерен је на примену вештачке интелигенције, дубоког учења и компјутерске визије у анализи и унапређењу безбедности и ергономичности индустријских радних места, са акцентом на сарадњу човека и робота и мултимодалну процену стања оператера.

Учествовао је у реализацији више националних и међународних научноистраживачких пројеката, а руководио је пројектом AIFitnessAssistant у оквиру Програма „Доказ концепта“ Фонда за науку Републике Србије. Као аутор или коаутор објавио је шест радова у међународним научним часописима: један категорије M21a+, три категорије M21, један категорије M22 и један категорије M23. Објавио је и поглавље у тематском зборнику међународног значаја категорије M14 и седам саопштења са међународних научних скупова категорије M33, а коаутор је техничког решења категорије M84. Један рад је прихваћен за објављивање у часопису категорије M22, а један рад је у процесу рецензије и депонован је у репозиторијуму HAL.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација је по форми и структури усклађена са Упутством о облику и садржају докторске дисертације која се брани на Универзитету у Београду. Дисертација је написана на српском језику, ћириличним писмом и има укупно 82 стране. Организована је у 7 поглавља, садржи 26 слика, 6 табела и листу са 189 библиографских референци.

Текст докторске дисертације подељен је на основна поглавља:

1. Увод
2. Безбедност и ергономија радних места у индустрији
3. Детекција небезбедних радњи у индустријском окружењу применом компјутерске визије и дубоког учења
4. Мултимодална анализа безбедности и ергономичности у задатку гурања и вучења индустријских ручних колица
5. Мултимодална анализа физичког оптерећења и ергономичности оператера у колаборативном задатку полирања
6. Ергономска радна станица за колаборативно полирање
7. Закључак

Поред основних поглавља, дисертација садржи насловне странице на српском и енглеском језику, страницу са подацима о ментору и члановима Комисије, захвалницу, сажетак и кључне речи на српском и енглеском језику, списак слика, списак табела, садржај,

литературу, биографију аутора и обавезне изјаве о ауторству, истоветности штампане и електронске верзије докторског рада и коришћењу.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Прво поглавље садржи уводна разматрања, мотивацију и значај истраживања у области безбедности и ергономичности радних места у индустрији. Полазећи од ограничења потпуне аутоматизације физички захтевних и варијабилних задатака, образложена је потреба за методама које омогућавају објективну процену стања оператера и благовремено препознавање неповољних образаца рада. Дефинисане су полазне хипотезе, методологија истраживања и кључни научни доприноси, а затим је дат преглед структуре дисертације и публикација у којима су поједини резултати верификовани.

Друго поглавље даје теоријску основу и систематизован преглед релевантне литературе. Најпре су размотрени радно условљени коштано-мишићни поремећаји и фактори ризика у индустријским радним задацима. Потом су приказани савремени приступи процени 2D и 3D људске позе применом компјутерске визије и дубоког учења, са осврtом на њихове предности и ограничења у реалним радним условима. Обрађене су опсервационе методе за процену ергономског ризика, са посебним нагласком на RULA методи, као и методе обраде и анализе електромиографских (EMG) сигнала за процену мишићне активности и замора. Поглавље се завршава приказом улоге колаборативних робота у подршци човеку и разматрањем предуслова за безбедну и ергономску сарадњу човека и робота.

Треће поглавље посвећено је аутоматској детекцији небезбедних радњи у индустријском окружењу применом компјутерске визије и дубоког учења. Представљен је поступак који из монокуларних видео-записа реконструише тродимензионалну позу и облик тела оператера и користи добијену просторну репрезентацију за класификацију безбедних и небезбедних радњи. Метод је експериментално испитан на различитим индустријским задацима како би се оценила његова општост и практична применљивост. Резултати су размотрени и у односу на приступе засноване на унапред дефинисаним ергономским параметрима добијеним из процењених поза.

Четврто поглавље обухвата мултимодалну анализу безбедности и ергономичности у задатку гурања и вучења индустријских ручних колица. Експериментална поставка обједињује видео-надзор, мерење сила и EMG сигнале, уз додатну процену физичког и психолошког стања испитаника. Анализирани су показатељи физичког оптерећења и њихова повезаност са индивидуалним карактеристикама испитаника. Добијени резултати указују да се начин извођења истог задатка и физичко оптерећење могу разликовати у зависности од психофизичког стања оператера, што представља основу за развој персонализованијих приступа процени ризика.

Пето поглавље разматра мултимодалну анализу физичког оптерећења и ергономичности оператера у колаборативном задатку полирања. Током експерименталног испитивања истовремено су праћени мишићна активност, положај тела и сила интеракције током извођења задатка. Комбиновањем EMG мерења и 3D процене позе анализирана је зависност мишићног оптерећења од начина извођења задатка. Резултати су показали да постурални и физиолошки показатељи пружају комплементарне информације и да њихово заједничко разматрање може бити корисно за процену и унапређење ергономичности колаборативних радних задатака.

Шесто поглавље представља ергономску радну станицу за колаборативно полирање, која представља значајно унапређење претходно развијеног концепта неуроергономске радне станице у правцу безбедности и унапређења физичких аспеката рада. У оквиру предложене архитектуре развијени су и имплементирани: модул за процену физичког стања радника на основу постуре и ергономског ризика – RULAScore модул, модул за процену физичког стања радника на основу детекције мишићног замора – EMGFatigue модул, модул за физичку подршку раднику – Кобот модул, модул за нефизичку подршку раднику – Визуелни

кориснички интерфејс и модул за стратешку подршку раднику. Развијени модули су интегрисани у јединствен систем који у реалном времену прати постурално и физиолошко стање оператера и на основу добијених информација прилагођава услове извођења задатка и понашање колаборативног робота. На тај начин успостављена је затворена повратна спрега између процене стања оператера, доношења одлука и физичке и нефизичке подршке. Функционалност развијене архитектуре експериментално је испитана у задатку колаборативног полирања.

Седмо поглавље сумира резултате и научне доприносе дисертације и разматра могућности даљег развоја предложених приступа. Истакнут је значај повезивања аутоматског препознавања небезбедних радњи, мултимодалне процене физичког оптерећења и адаптивне роботске подршке у јединствен методолошки оквир усмерен ка безбеднијим и ергономичнијим индустријским радним местима.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Савремени индустријски системи све више се ослањају на аутоматизацију, роботику и вештачку интелигенцију, али бројни физички захтевни, варијабилни и репетитивни задаци и даље захтевају непосредно учешће човека. У складу са концептом Индустрије 5.0, савремена истраживања све више су усмерена ка развоју система у којима напредне технологије не служе само повећању продуктивности, већ и очувању безбедности, здравља и ергономичности рада. Посебан изазов представља објективна и континуална процена неповољних положаја тела, физичког оптерећења и мишићног замора, због чега значај добијају приступи који комбинују компјутерску визију, вештачку интелигенцију и физиолошка мерења.

У оквиру дисертације овај проблем је најпре разматран кроз развој поступка за аутоматско препознавање небезбедних радњи из монокуларних видео-записа. За реконструкцију тродимензионалне позе и облика тела примењена је VIBE архитектура, која користи временски контекст видео-секвенце и на основу претходно детектованих 2D анатомских референтних тачака процењује параметре SMPL модела људског тела. За разлику од приступа који анализирају само положаје појединачних зглобова, SMPL обезбеђује потпуну тродимензионалну површинску репрезентацију тела. Почетна полигонална мрежа затим је редукована применом поступка децимације заснованог на квадричној метрици грешке, чиме је значајно смањена њена сложеност уз очување релевантне геометријске структуре. Добијене 3D мреже класификоване су применом MeshCNN архитектуре, чије су операције конволуције и сажимања прилагођене директној обради ивица неправилних геометријских мрежа. На тај начин је класификација безбедних и небезбедних радњи извршена непосредно над просторном репрезентацијом људског тела, уместо над сликама или ручно дефинисаним скуповима ергономских параметара.

Савременост и оригиналност овог приступа огледају се управо у повезивању видео-засноване 3D реконструкције људског тела и дубоког учења над полигоналним мрежама. VIBE користи временске информације из суседних кадрова, чиме се смањује осетљивост на краткотрајне грешке и делимичне оклузије, док SMPL обезбеђује анатомски конзистентну просторну репрезентацију тела. Развијени поступак експериментално је проверен на три методолошки различита индустријска задатка — гурању и вучењу индустријских колица, дворучном бушењу и колаборативном полирању. Тиме је испитана могућност примене истог основног поступка на задацима различите динамике и различитог степена ангажовања појединих делова тела, што је од значаја за развој општијих система за аутоматско праћење безбедности у индустријском окружењу.

Следећи правац истраживања обухватио је мултимодалну анализу физички захтевног задатка гурања и вучења индустријских ручних колица. За разлику од приступа који процену

заснивају на само једној врсти података, реализована експериментална поставка објединила је видео-записе, мерења сила и површинске EMG сигнале са подацима о физичком и психолошком стању испитаника. Силе гурања и вучења мерене су помоћу два троосна сензора силе, по једног за сваку руку, док је мишићна активност праћена помоћу шест површинских EMG електрода постављених билатерално на одабране мишићне групе леђа, грудног коша и подлактице. EMG сигнали су филтрирани и нормализовани у односу на максималну вољну контракцију, док су видео-записи коришћени за временску идентификацију и анотацију појединих активности и фаза задатка, ради правилног издвајања и анализе одговарајућих сегмената сигнала силе и EMG сигнала.

Посебан аспект овог истраживања представља повезивање објективних биомеханичких и физиолошких показатеља са индивидуалним карактеристикама испитаника. Поред мерења сила и мишићне активности, спроведене су физичке и психолошке процене испитаника од стране стручњака из одговарајућих клиничких области. Физичка процена обухватила је анализу болних синдрома, покретљивости кичменог стуба и других релевантних показатеља физичког стања, док је психолошка процена обухватила показатеље стреса, анксиозности, депресије и апатије. Оваква мултидисциплинарна процена омогућила је анализу повезаности психофизичког стања испитаника са начином извођења задатка и показатељима физичког оптерећења. На тај начин ергономски ризик није разматран искључиво као особина радног места или радног задатка, већ и као резултат интеракције задатка са индивидуалним стањем оператера. Овакав приступ представља основу за развој персонализованих метода процене ризика, што је један од значајних праваца развоја система усмерених ка човеку у оквиру Индустрије 5.0.

Даљи корак у истраживању представља анализа физичког оптерећења у колаборативном задатку полирања, у којем су истовремено разматране кинематичке, физиолошке и механичке информације. Оператер је задатак изводио у сарадњи са колаборативним роботом Franka Emika Panda у четири различите конфигурације тела и при различитим нивоима силе интеракције. Мишићна активност праћена је површинским EMG сензорима постављеним на biceps brachii, triceps brachii, anterior deltoid и posterior deltoid. Истовремено су положај и кретање оператера процењивани применом VIBE архитектуре и SMPL модела, док су из реконструисане 3D позе издвајани карактеристични постурални углови.

Оваква експериментална поставка омогућила је да се различите конфигурације тела и различити интензитети силе интеракције не пореде само на основу геометрије постуре, већ и на основу стварног физиолошког одговора оператера. На тај начин је показана комплементарност 3D процене позе, EMG мерења и информација о сили интеракције у анализи ергономичности колаборативних задатака. Истовремено, ово истраживање представља методолошки прелаз од пасивне анализе положаја тела ка развоју система у којем информације о постури, физиолошком стању оператера и условима физичке интеракције могу постати улаз за прилагођавање понашања колаборативног робота.

Најзначајније системско унапређење остварено је развојем ергономске радне станице за колаборативно полирање, засноване на проширењу постојећег концепта неуроергономске радне станице у правцу праћења и активног унапређења физичких аспеката рада. У оквиру предложене архитектуре развијени су и интегрисани модули за процену физичког стања оператера, физичку подршку, нефизичку подршку и стратешко одлучивање. Процена физичког стања обухвата праћење постуре и ергономског ризика, као и детекцију локализованог мишићног замора, док модули подршке омогућавају пружање визуелних информација и прилагођавање услова извођења задатка посредством колаборативног робота.

Модул за процену физичког стања радника омогућава истовремено праћење постуралних и физиолошких показатеља оператера. Модул за стратешку подршку обједињује информације о постури, мишићном замору, сили интеракције и стању роботског система и на основу њих доноси одлуке о даљем току задатка. Модул за физичку подршку обезбеђује физичку асистенцију прилагођавањем радне конфигурације посредством

колаборативног робота, док Модул за нефизичку подршку раднику обезбеђује повратне информације, упозорења и инструкције. Интеграцијом ових модула успостављена је затворена повратна спрега између процене стања оператера, доношења одлука и физичке и нефизичке подршке, чиме се прелази са пасивног праћења на активну подршку оператеру током извођења колаборативног задатка.

Савременост оваквог приступа огледа се у интеграцији метода компјутерске визије, дубоког учења, анализе биосигнала, ергономске процене и колаборативне роботике у функционалан систем који ради у реалном времену. Посебно је значајан прелаз са пасивног препознавања небезбедних или неергономских услова ка активној подршци оператеру. Уместо да се процена стања оператера заврши само приказом ризика, добијене информације непосредно се користе за прилагођавање начина извођења задатка и понашања колаборативног робота. Експериментална валидација кроз различите сценарије потврдила је функционалност овакве затворене повратне спреге, укључујући прилагођавање радне конфигурације након детекције локализованог мишићног замора.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У докторској дисертацији цитирано је 189 библиографских референци, наведених по редоследу цитирања у тексту дисертације. Цитиране референце већином припадају областима индустријске безбедности и ергономије, компјутерске визије и дубоког учења, процене људске позе, анализе EMG сигнала и мишићног замора, као и сарадње човека и колаборативних робота. На основу обима и структуре коришћене литературе може се закључити да је кандидат остварио темељан увид у резултате досадашњих истраживања у предметној научној области.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У току истраживања које је резултовало овом дисертацијом примењене су следеће научне методе:

1. Кроз преглед научно-стручне литературе извршена је анализа постојећих праваца истраживања у области индустријске безбедности и ергономије, компјутерске визије, дубоког учења, анализе EMG сигнала и сарадње човека и робота;
2. Пројектовани су експериментални протоколи и формирани скупови података за различите индустријске задатке у циљу анализе и препознавања безбедних и небезбедних начина њиховог извођења;
3. Развијен је и експериментално испитан поступак за аутоматско препознавање небезбедних радњи применом метода компјутерске визије, 3D реконструкције људског тела и дубоког учења;
4. Реализована је мултимодална анализа безбедности и физичког оптерећења у задатку гурања и вучења индустријских ручних колица применом мерења сила, EMG сигнала и процене психофизичког стања испитаника;
5. Спроведено је експериментално испитивање колаборативног задатка полирања применом заједничке анализе мишићне активности, 3D позе оператера и силе интеракције човека и робота;
6. Развијени су модули ергономске радне станице за процену физичког стања и подршку оператеру током сарадње са колаборативним роботом, укључујући Модул за процену физичког стања радника, заснован на процени постуре, ергономског ризика и мишићног замора, као и Модул за нефизичку подршку раднику, Модул за стратешку подршку раднику и Модул за физичку подршку раднику;
7. Унапређен је постојећи концепт неуроергономске радне станице интеграцијом развијених модула усмерених на физичке аспекте рада, а функционалност

унапређеног система експериментално је евалуирана у колаборативном задатку полирања.

3.4. Применљивост остварених резултата

Резултати представљени у дисертацији имају потенцијал за примену на различитим индустријским радним местима на којима је потребно континуирано праћење безбедности, физичког оптерећења и ергономичности рада. Поступак за аутоматско препознавање небезбедних радњи заснива се на конвенционалним видео-записима и не захтева постављање маркера на тело оператера нити примену сложених система за оптичко праћење покрета. На основу видео-секвенци формира се тродимензионална репрезентација људског тела применом VIBE архитектуре и SMPL модела, док се класификација безбедних и небезбедних радњи врши применом MeshCNN модела. Практични значај оваквог приступа огледа се у могућности његове примене као дела система за аутоматски надзор радних активности, идентификацију небезбедних образаца извођења задатка и подршку процени безбедности радног места. Поступак је експериментално испитан на три различита индустријска задатка — гурању и вучењу индустријских ручних колица, дворучном бушењу и колаборативном полирању — што указује на могућност примене истог основног методолошког приступа на различите типове мануелних и колаборативних радних операција. За примену на новом задатку потребно је прилагодити поступак конкретним класама безбедног и небезбедног извођења, док основни ток обраде може остати непромењен.

Мултимодални приступ примењен у анализи гурања и вучења индустријских ручних колица може се применити и на друге физички захтевне мануелне операције у производњи, складиштима и логистици. Заједничко разматрање сила и EMG сигнала омогућава повезивање спољашњег механичког оптерећења са физиолошким одговором оператера, док укључивање података о физичком и психолошком стању омогућава сагледавање индивидуалних разлика у начину извођења истог радног задатка. Добијени резултати указују на значај повезаности психофизичких карактеристика оператера са начином извођења задатка и показатељима физичког оптерећења, што је релевантно и приликом анализе других физички захтевних индустријских операција. Оваква сазнања представљају основу за развој индивидуализованих модела процене ризика, у којима би се, поред карактеристика радног места и задатка, у обзир узимале и специфичне карактеристике и стање конкретног оператера.

Резултати анализе колаборативног полирања применљиви су на индустријске операције у којима човек ручним алатом обавља радни задатак, док колаборативни робот позиционира или придржава радни предмет. Заједничка анализа положаја тела, мишићне активности и силе интеракције омогућава процену физичког оптерећења оператера у различитим радним постурама и условима извођења задатка. Методологија није ограничена искључиво на полирање, већ се може прилагодити сродним контактним и репетитивним задацима, као што су брушење, обрада површина и друге операције у којима се захтева непосредна сарадња човека и колаборативног робота.

Посебан практични потенцијал има унапређени концепт неуроергономске радне станице, који је у дисертацији реализован и експериментално испитан на примеру колаборативног задатка полирања. Радна станица обухвата Модул за процену физичког стања радника, у оквиру којег су реализовани RULAScore модул за процену постуре и ергономског ризика и EMGFatigue модул за детекцију локализованог мишићног замора, Модул за физичку подршку раднику – Кобот модул, Модул за нефизичку подршку раднику – Визуелни кориснички интерфејс и Модул за стратешку подршку раднику. Интеграцијом наведених модула омогућено је да се информације о физичком стању оператера у реалном времену користе за визуелну подршку, стратешко одлучивање и прилагођавање услова извођења задатка посредством колаборативног робота.

Интеграцијом развијених модула успостављена је затворена повратна спрега између процене стања оператера и подршке система. Информације о постури, мишићном замору и сили интеракције користе се у Модулу за стратешку подршку раднику за доношење одлука о даљем току задатка и потребној адаптацији, док Модул за нефизичку подршку раднику обезбеђује повратне информације, упозорења и инструкције, а Модул за физичку подршку раднику омогућава прилагођавање радне конфигурације посредством колаборативног робота. На тај начин процена ергономског ризика и мишићног замора не остаје на нивоу пасивног надзора, већ се непосредно користи за активну подршку оператеру.

Модуларна организација радне станице омогућава примену истих или благо прилагођених модула у различитим индустријским задацима без измене основне архитектуре система. RULAScore и EMGFatigue модули могу се применити у другим физички захтевним и репетитивним задацима у којима је потребно праћење постуре, ергономског ризика и мишићног замора, док се Визуелни кориснички интерфејс може прилагодити врсти информација и инструкција релевантних за конкретну операцију. На исти начин, правила у оквиру Модула за стратешку подршку раднику и начин деловања Кобот модула могу се прилагодити карактеристикама задатка, расположивом роботском систему и захтевима конкретне индустријске апликације.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат, мастер инжењер електротехнике и рачунарства Милош Петровић, показао је све особине неопходне за самосталан научноистраживачки рад. У прилог томе сведочи да је до сада објавио 14 научно-стручних радова, од чега шест у међународним научним часописима са импакт фактором, док је још један рад прихваћен за објављивање у међународном научном часопису. Поред тога, кандидат је учествовао у реализацији више националних и међународних научноистраживачких пројеката, а био је руководилац и координатор пројекта *AIFitnessAssistant* у оквиру Програма „Доказ концепта“ Фонда за науку Републике Србије.

Начин на који је написана докторска дисертација и научни доприноси који су у њој представљени потврђују спремност кандидата за самосталан научноистраживачки рад, почевши од систематичног прегледа доступне литературе, преко уочавања недостатака и ограничења постојећих приступа, до развоја и експерименталне верификације метода за анализу и унапређење безбедности и ергономичности индустријских радних места. Посебно се истиче способност кандидата да повезује методе вештачке интелигенције, компјутерске визије, анализе биосигнала и колаборативне роботике у решавању сложених мултидисциплинарних истраживачких проблема. Научни рад кандидата одликује темељан и систематичан приступ решавању научних проблема.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Научни доприноси дисертације су:

- Систематичан преглед литературе из области примене вештачке интелигенције, компјутерске визије, електромиографије и колаборативне роботике за анализу безбедности и ергономичности индустријских радних места.
- Развој поступка за аутоматско препознавање небезбедних радњи из конвенционалних видео-записа, заснованог на 3D реконструкцији људског тела и класификацији геометријских мрежа применом метода дубоког учења.
- Развој мултимодалног поступка за анализу безбедности и физичког оптерећења у задатку гурања и вучења индустријских ручних колица, заснованог на заједничкој анализи сила, EMG сигнала и психофизичких карактеристика оператера.

- Реализација мултимодалне анализе физичког оптерећења и ергономичности оператера у колаборативном задатку полирања, засноване на заједничкој анализи 3D позе, мишићне активности и силе интеракције човека и робота.
- Развој и интеграција модула ергономске радне станице за процену постуре и ергономског ризика, детекцију мишићног замора, визуелну подршку, стратешко одлучивање и физичку подршку колаборативног робота.
- Унапређење концепта неуроергономске радне станице интеграцијом развијених модула усмерених на физичке аспекте рада и успостављањем затворене повратне спреге између процене стања оператера и адаптивне подршке колаборативног робота.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Остварени научни доприноси представљају унапређење постојећих знања у више међусобно повезаних праваца:

- Поступак за препознавање небезбедних радњи помера фокус са анализе појединачних слика и ручно дефинисаних параметара на класификацију целовите тродимензионалне репрезентације тела, чиме се смањује зависност од избора параметара специфичних за појединачни задатак и омогућава униформнији приступ препознавању небезбедних начина рада у различитим индустријским применама.
- Мултимодална анализа физички захтевног мануелног задатка проширује класичну ергономску процену укључивањем психофизичких карактеристика оператера. Њиховим повезивањем са показатељима физичког оптерећења указано је на значај персонализованог приступа процени ризика, што представља основу за развој модела који би безбедност и ергономичност радног места процењивали и у односу на стање конкретног оператера.
- У колаборативном задатку показана је оправданост заједничке анализе постуралних и физиолошких информација и силе интеракције током извођења задатка. Тиме је показано да процену ергономичности колаборативног рада није довољно заснивати само на положају тела, већ је потребно разматрати и стварно мишићно оптерећење оператера и услове физичке интеракције. Овакав приступ представља основу за планирање роботске асистенције усмерене ка смањењу физичког оптерећења и ергономски повољнијем извођењу задатка.
- Унапређењем постојећег концепта неуроергономске радне станице омогућен је прелаз са пасивног праћења стања оператера на активну подршку током извођења задатка. Интеграцијом процене постуре и мишићног замора са механизмима стратешког одлучивања и адаптивне подршке колаборативног робота успостављена је затворена повратна спрега између физичког стања оператера и понашања система. На тај начин систем може да реагује на неповољне услове рада и прилагођава радну конфигурацију, чиме се стварају услови за безбедније и ергономичније извођење колаборативних радних задатака.

4.3. Верификација научних доприноса

Део резултата истраживања приказаних у докторској дисертацији кандидата Милоша Петровића верификован је кроз следеће одабране публикације:

Радови у међународним часописима:

- A. M. Vukicevic, **M. N. Petrovic**, N. M. Knezevic, and K. M. Jovanovic, "Deep learning-based recognition of unsafe acts in manufacturing industry," IEEE Access, vol. 11, pp. 103406–103418, 2023. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3318114. **IF: 3.9. (M21)**
- **M. Petrovic**, A. M. Vukicevic, M. Djapan, A. Peulic, M. Jovicic, N. Mijailovic, P. Milovanovic, M. Grajic, M. Savkovic, C. Caiazzo, V. Isailovic, I. Macuzic, and K. Jovanovic, "Experimental

Analysis of Handcart Pushing and Pulling Safety in an Industrial Environment by Using IoT Force and EMG Sensors: Relationship with Operators' Psychological Status and Pain Syndromes," Sensors, vol. 22, no. 19, art. 7467, 2022. DOI: 10.3390/s22197467. **IF: 3.9. (M21)**

- A. M. Vukicevic, **M. Petrovic**, P. Milosevic, A. Peulic, K. Jovanovic, and A. Novakovic, "A systematic review of computer vision-based personal protective equipment compliance in industry practice: advancements, challenges and future directions," Artificial Intelligence Review, vol. 57, art. 319, 2024. DOI: 10.1007/s10462-024-10978-x. IF: **13.9. (M21a+)**

Поглавља у монографијама и тематским зборницима међународног значаја:

- A. M. Vukićević and **M. Petrović**, "Advances in the Use of Artificial Intelligence and Sensor Technologies for Managing Industrial Workplace Safety," in Applied Artificial Intelligence: Medicine, Biology, Chemistry, Financial, Games, Engineering, N. Filipović, Ed., Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 659, Springer, Cham, 2023. DOI: 10.1007/978-3-031-29717-5_1. **(M14)**

Радови на међународним конференцијама:

- **M. Petrovic**, A. M. Vukicevic, B. Lukic, and K. Jovanovic, "Assessment of the human-robot collaborative polishing task by using EMG sensors and 3D pose estimation," in Proceedings of the International Conference on Robotics in Alpe-Adria Danube Region (RAAD 2022), pp. 564–570, 2022. **(M33)**
- M. Radmilovic, D. Urukalo, **M. Petrovic**, F. Becanovic, and K. Jovanovic, "Influence of Muscle Co-Contraction Indicators for Different Task Conditions," in Proc. 8th Int. Conf. Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN), Ethno Village Stanisici, Republic of Srpska, Sep. 8–10, 2021, p. 584. **(M33)**

Радови депоновани у отвореним научним репозиторијумима:

- **M. Petrovic**, A. M. Vukicevic, N. Ruzic, N. Knezevic, and K. Jovanovic, "A real-time ergonomic workstation for human-cobot collaboration: Integrating posture, fatigue, and adaptive robotic assistance," 2026. ⟨hal-05717729⟩.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација кандидата Милоша Петровића под насловом „Примена вештачке интелигенције за анализу и унапређење безбедности и ергономичности радних места у индустрији" у целини је написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме и испуњава све суштинске и формалне услове предвиђене Законом о високом образовању, као и прописима Универзитета у Београду и Електротехничког факултета.

У предметној докторској дисертацији приказан је повезан приступ анализи и унапређењу безбедности и ергономичности индустријских радних места применом вештачке интелигенције, компјутерске визије, електромиографије и колаборативне роботике. Развијен је поступак за препознавање небезбедних радњи на основу тродимензионалне репрезентације људске позе, а мултимодалним експерименталним истраживањима анализирани су физичко оптерећење и индивидуални фактори оператера у мануелним и колаборативним задацима. На основу добијених резултата развијени су функционални модули ергономске радне станице која повезује процену стања оператера са визуелном и роботском подршком у реалном времену. Остварени резултати указују на значај комбиновања визуелних, физиолошких и механичких информација за свеобухватнију процену безбедности и ергономичности радног места. Посебан значај има успостављање везе између процене стања оператера и адаптивног понашања колаборативног робота, чиме се ствара основа за развој интелигентних радних места усмерених ка смањењу физичког оптерећења и очувању добробити човека.

Докторска дисертација кандидата Милоша Петровића обједињује резултате вишегодишњег научноистраживачког рада у области примене вештачке интелигенције, компјутерске визије, анализе биосигнала и колаборативне роботике за анализу и унапређење безбедности и ергономичности индустријских радних места. Научни доприноси који представљају резултат истраживања у оквиру дисертације верификовани су публикацијама у међународним научним часописима, поглављем у тематском зборнику међународног значаја и радовима у зборницима међународних научних конференција. На основу увида у докторску дисертацију и публиковане резултате, Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да се докторска дисертација под насловом „Примена вештачке интелигенције за анализу и унапређење безбедности и ергономичности радних места у индустрији“ кандидата Милоша Петровића прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

У Београду, 29.9.2026. године.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

др Никола Кнежевић, доцент
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

др Дражен Драшковић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

др Арсо М. Вукићевић, научни саветник
Универзитет у Крагујевцу – Факултет инжењерских наука