

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидаткиње Јелене Коцић

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета бр. 5067/10-3 од 25.11.2019. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидаткиње Јелене Коцић под насловом

Аутономно одржање возила у коловозној траци анализом информација са визуелних сензора коришћењем неуралне мреже

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

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Кандидаткиња Јелена Коцић је 31.01.2019. године пријавила тему за израду докторске дисертације под насловом „Перцепција у аутономним возилима применом алгоритама заснованих на дубоком учењу“.

Комисија за студије трећег степена разматрала је 5.02.2019. године предлог теме за израду докторске дисертације и упутила предлог Комисије за оцену подобности теме и кандидата на усвајање Наставно-научном већу Електротехничког факултета.

На 836. седници одржаној 12.02.2019. године, Наставно-научно веће је именovalo Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације (Одлука бр. 5067/10-1 од 25.02.2019. године) у саставу: др Вујо Дрндаревић, редовни професор у пензији (Универзитет у Београду - Електротехнички факултет), др Драгана Перић, виши научни сарадник (Институт Vlatasom, Београд), др Предраг Тадић, доцент (Универзитет у Београду - Електротехнички факултет) и др Марко Барјактаровић, доцент (Универзитет у Београду - Електротехнички факултет).

Дана 1.03.2019. кандидаткиња је полагала јавну усмену одбрану теме докторске дисертације.

На 841. седници одржаној 11.06.2019. године, Наставно-научно веће је усвојило Извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације (Одлука бр. 5067/10-2 од 11.06.2019. године). Наслов дисертације је, према сугестији Комисије, промењен у „Аутономно одржање возила у коловозној траци анализом информација са визуелних сензора коришћењем неуралне мреже“. За ментора дисертације именован је др Ненад Јовичић, ванредни професор. Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације (број одлуке 61206-2720/2-19 од 01.07.2019. године).

Кандидаткиња је 25.10.2019. године предала докторску дисертацију на преглед и оцену. Комисија за студије трећег степена потврдила је 5.11.2019. године испуњеност потребних услова за подношење предлога за формирање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације Наставно-научном већу Електротехничког факултета. На 845. седници одржаној 12.11.2019. године, Наставно-научно веће именovalo је Комисију за преглед и оцену докторске дисертације под насловом „Аутономно одржање возила у коловозној траци анализом информација са визуелних сензора коришћењем неуралне мреже“ (број одлуке 5067/10-3 од 25.11.2019. године) у саставу: др Ненад

Јовичић, ванредни професор (Универзитет у Београду - Електротехнички факултет), др Вујо Дрндаревић, редовни професор у пензији (Универзитет у Београду - Електротехнички факултет), др Драгана Перић, виши научни сарадник (Институт Vlatacom, Београд), др Марко Барјактаровић, доцент (Универзитет у Београду - Електротехнички факултет) и др Горан Квашчев, ванредни професор (Универзитет у Београду - Електротехнички факултет).

На основу одлуке Наставно-научног већа бр. 3058/2 од 28.12.2010. године, Студијски програм је започео у пролећном семестру школске 2010/2011, па се рок за завршетак докторских академских студија рачуна од почетка тог семестра, сагласно Статуту Универзитета у Београду и Статуту Електротехничког факултета.

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. Кандидату је одобрено мировање у школској 2012/2013. години и 2014/2015. години.

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација Јелене Коцић под насловом „Аутономно одржање возила у коловозној траци анализом информација са визуелних сензора коришћењем неуралне мреже” припада научној области електротехника и рачунарство, ужој научној области електроника, за коју је матични факултет Електротехнички факултет Универзитета у Београду.

Ментор докторске дисертације је др Ненад Јовичић, ванредни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду. Професор др Ненад Јовичић се дуги низ година бави научноистраживачким радом у области електронике и машинске визије, што је потврђено релевантним радовима који су наведени приликом пријаве теме докторске дисертације кандидата.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Јелена Коцић (девојачко Цветковић) је рођена 24.01.1982. године у Крагујевцу. Завршила је Прву крагујевачку гимназију 2001. године, специјализовано математичко одељење за талентоване ученике као одличан ученик. Током гимназијског школовања, била је полазник Истраживачке станице Петница на семинару Примењене физике и електронике. Основне академске студије је завршила 2009. године на Електротехничком факултету у Београду на смеру Електроника. Докторске академске студије уписала је школске 2010/2011. године на Електротехничком факултету у Београду, смер Електроника.

У периоду од 2009. до 2010. године била је запослена као млађи сарадник у институту ИРИТЕЛ у Београду у сектору Енергетске електронике. Од 2010. до 2016. године запослена је у Институту Vlatacom у Београду као инжењер развоја електронике у сектору за развој електрооптичких система. Од 2016. до 2018. ради у компанији Comtrade Solutions Engineering у Београду као инжењер развоја софтвера на пројектима из домена аутомобилске индустрије. Од 2018. до 2019. ради у компанији Microvision, Inc., Редмонд, Вашингтон, САД, на позицији независног сарадника за машинско учење где се бави пројектовањем и развојем нових алгоритама машинског учења за компјутерску визију коришћењем 3Д лидар сензора. Од 2019. године запослена је у компанији Bitgear Wireless Design Services у Београду на позицији старијег инжењера машинског учења, где се бави развојем нових решења у области компјутерске визије и машинског учења.

У досадашњем истраживачком раду је објавила један рад у врхунском међународном часопису, седам радова на међународним конференцијама, осам радова на домаћим конференцијама, једно техничко решење, и један рад је у припреми за предају у међународни часопис. Учествовала је на три Иновациона пројекта. Од новембра 2018. године је рецензент у часопису *IEEE Access* за научне радове из домена дубоког учења.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација под насловом „Аутономно одржање возила у коловозној траци анализом информација са визуелних сензора коришћењем неуралне мреже“ је написана на 92 стране (97 страна са прилозима), организована је у 9 поглавља, има 69 слика, 12 табела и листу од 113 референци. Наслови поглавља су: 1) Увод, 2) Аутономна возила, 3) Дубоко учење, 4) Примена техника дубоког учења у аутономним возилима, 5) Опис проблема и методологије тренирања верификације и евалуације дубоке неуралне мреже, 6) Пројектовање и имплементација нове архитектуре модела неуралне мреже за учење од-краја-до-краја за аутономну вожњу, 7) Верификација аутономне вожње у симулираним условима, 8) Верификација аутономне вожње у реалним условима и 9) Закључак.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У уводном поглављу дефинисани су предмет и циљ истраживања, као и мотивација. Критичким освртом на садашње стање указано је на потребу развоја нових алгоритама и модела машинског учења која су прилагођена специфичним применама као што су примене у реалном времену на наменским хардверским платформама са ограниченом рачунарском снагом и меморијским простором. Једна од примена решења машинског учења на наменским хардверским системима који раде у реалном времену је и управљање аутономним возилима.

У другом поглављу је дат преглед постојећих система за управљање аутономним возилима и аутономном вожњом. Дат је опис доминантних сензора и сензорских система који се користе у аутономним возилима. Детаљно је анализирана употреба камера, радара и лидара и кратко су описани подсистеми за перцепцију, планирање и контролу над возилом.

У трећем поглављу дат је преглед основних појмова из домена вештачке интелигенције, машинског учења и дубоког учења са акцентом на дубоке конволуционе неуралне мреже. Објашњени су основни елементи и појмови дубоког учења: перцептрон, активациона функција, функција губитка, тренирање вишеслојних неуралних мрежа пропагацијом уназад и операције над конволуционим неуралним мрежама. На крају овог поглавља дат је преглед развоја дубоког учења.

У четвртом поглављу дат је преглед и извршена је анализа алгоритама дубоког учења применљивих у систему за перцепцију аутономних возила, алгоритми за фузију информација са сензора, детекцију и праћење објеката, локализацију и мапирање, семантичку сегментацију и учење од-краја-до-краја. На крају овог поглавља, представљене су две познате архитектуре дубоких неуралних мрежа PilotNet и AlexNet, као и опис модификације и реимплементације ове две мрежне архитектуре с циљем коришћења ових модела за аутономно одржање возила у коловозној траци.

У петом поглављу дата је поставка проблема, опис коришћеног симулатора и опис методе увећавања количине података и креирања базе података потребне за обучавање мреже. Описане су методологије за обучавање и евалуацију нове архитектуре и дефинисане су мере за квантитативну оцену перформанси различитих имплементација које омогућавају и њихова поређења.

Шесто поглавље описује поступак пројектовања, имплементације и евалуације новог модела архитектуре дубоке неуралне мреже за учење од-краја-до-краја која је названа J-Net. Описана је оригинална методологија која на основу дефинисаних критеријума доводи до реализације која задовољава захтеве постављене кроз почетне хипотезе истраживања. Хијерархијски су анализирани утицаји архитектуре и дубине неуралне мреже, дубине конволуционих слојева као и величине кернела на перформансе функционалног модела.

Седмо поглавље доноси резултате верификације новопроектваног J-Net модела у симулираним условима и поређења са два изабрана референтна модела, PilotNet и AlexNet. Извршена је упоредна анализа ових модела у погледу рачунарске комплексности и перформанси аутономне вожње, као и евалуација пројектованог модела неуралне мреже на новом делу коловозне траке.

У осмом поглављу представљени су резултати верификације и поређења J-Net, PilotNet и AlexNet у реалним условима. Детаљно је описан лабораторијски систем за аутономну вожњу, самовозећа роботска платформа – мобилно возило, описане су изабране трајекторије, поступак креирања базе података коришћењем новог система за аутоматску аквизицију слика, поступак тренирања неуралне мреже и резултати аутономне вожње у реалном времену. Резултати су приказани

кроз квантитативне и квалитативне оцене. Верификација новог модела је вршена како на познатим тако и на непознатим моделима коловозне траке.

У деветом поглављу су дата закључна разматрања и смернице за будућа истраживања.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Дисертације се бави савременом и актуелном облашћу примене машинске визије и машинског учења у циљу остварења кључних елемената аутономне вожње, за аутономно одржање возила у коловозној траци. Проблем примене дубоког учења, које представља подскуп техника машинског учења, а који је посебно погодан за примену на подацима као што су слике, је актуелан тек у последње две деценије. Развој техника дубоког учења за компјутерску и машинску визију допринео је примени машинског учења у домену аутономне вожње. Једна од комплекснијих техника дубоког учења је учење од-краја-до-краја, које замењује све фазе процесирања података са само једном дубоком неуралном мрежом чији су улаз подаци са сензора а излаз крајње команде система.

Оригиналност рада презентованог у докторској дисертацији огледа се у развоју нове архитектуре неуралне мреже за аутономно одржање возила у коловозној траци коришћењем информација са визуелних сензора, која има мању комплексност и мањи број параметара и потребних математичких операција у једној итерацији, у односу на постојеће референтне мрежне архитектуре, док се перформансе аутономне вожње не деградирају превише. Поред тога, у дисертацији је приказан оригинални експериментални приступ у пројектовању и одабиру модела машинског учења за решавање конкретних практичних задатака, аутономно одржања возила у коловозној траци, с циљем имплементирања на наменским хардверским платформама са ограниченом рачунарском снагом и меморијским простором који захтевају тренутни одзив у реалном времену.

У дисертацији је представљена методологија и опис пројектовања дубоке неуралне мреже са циљем минимизације коришћеног броја параметара, односно математичких операција. Кључни допринос остварен у оквиру ове докторске дисертације односи се на пројектовање и имплементацију новог оригиналног система за аутономну вожњу, спроведено кроз оригиналну методолошку процедуру. Ово решење је реализовано и тестирано у Лабораторији за електронику Електротехничког факултета у Универзитету у Београду. За верификацију пројектованог решења коришћени су најпре симулирани, а потом и реални услови. Резултати овог истраживања су публиковани у врхунском међународном часопису из научне области дисертације.

Методологија селекције параметара коришћена за успешно решавање дефинисаног задатка може се корисити не само при пројектовању дубоке неуралне мреже за аутономну вожњу, већ и при пројектовању сличних хијерархијских организованих неуралних мрежа.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Литература коришћена у дисертацији садржи најновије радове релевантне за проблематику дисертације, али садржи и класичне радове, као и одговарајуће књиге. Број библиографских јединица наведених на крају дисертације указује на кандидатов широк и темељан увид у научну област третирану у дисертацији.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Истраживање у оквиру предложене докторске дисертације је обухватило следеће фазе:

- проучавање постојећих алгоритама и модела машинског учења за компјутерску визију са фокусом на примену у аутономној вожњи,
- анализу постојећих алгоритама и модела машинског учења за клонирање понашања возача, односно учење-од-краја-до-краја за аутономно одржање возила у коловозној траци,
- дефинисање методологије пројектовања и селекције параметара хијерархијски комплексног система какав је дубока неурална мрежа,
- пројектовање оригиналне архитектуре дубоке неуралне мреже за учење од-краја-до-краја, која са једне стране има мали капацитет у смислу величине модела, броја параметара и броја

аритметичких операција које се одвијају у једном проласку кроз дубоку неуралну мрежу, а са друге стране успешно испуњава дефинисани задатак аутономног одржања возила у коловозној траци коришћењем информација са визуелних сензора,

- развој и реализација новог модела пројектоване мрежне архитектуре, и верификација у симулираним условима,
- пројектовање, развој и реализација система за аутономну вожњу у лабораторији за електронику Електротехничког факултета у Београду,
- тестирање и евалуација развијеног решења у реалним условима коришћењем новог оригиналног система за аутономну вожњу.

Наведене методе и поступци су засновани на теоријским истраживањима која су и експериментално верификована. Поступци су у потпуности били примерени проблему који је решаван што је довело до остварења декларисаних циљева дисертације.

3.4. Применљивост остварених резултата

Резултати приказани у дисертацији и њихова експериментална верификација имају директну применљивост у аутономној вожњи. Развијена архитектура дубоке неуралне мреже има општи значај јер се осим за аутономно одржање возила у коловозној траци, може користити и у другим доменима, где се захтева учење од-краја-до-краја. Од система заснованог на предложеној архитектури се очекује примена у области пројектовање и развој специјализованих аутономних возила мањих димензија, која могу обављати различите функције, од доставних возила, до асистената у оквиру паметних кућа или планских насеља. Поред тога, уведена методологија анализе хијерархијски комплексног система може се користити не само при пројектовању дубоке неуралне мреже за аутономну вожњу, већ и при пројектовању сличних хијерархијских организованих неуралних мрежа.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат је током израде ове докторске дисертације показао да је у стању да самостално решава проблеме и да успешно влада савременим научним сазнањима и методама. Такође, кандидат је испољио захтевану научну зрелост и оспособљен је за даљи успешан научно-истраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

У оквиру предложене докторске дисертације истичемо следеће научне доприносе:

- Извршена је упоредна анализа и систематизација референтних алгоритама учења од-краја-до-краја заснованих на дубоким неуралним мрежама намењеним употреби у системима управљања аутономним возилима.
- Описана је оригинална методологија хијерархијског пројектовања дубоке неуралне мреже кроз процесе селекције основних елемената архитектуре и специфичних параметара имплементације у циљу задовољавања унапред задатих критеријума и перформанси.
- Коришћењем предложене методологије развијена је и имплементирана нова оригинална архитектура дубоке неуралне мреже за учење од-краја-до-краја, која у односу на референтне алгоритме за управљање обезбеђује значајно смањење потребе за рачунарском снагом и компјутерским ресурсима без значајне деградације перформанси вожње.
- Развијен је нови лабораторијски систем за експерименталну верификацију алгоритама управљања аутономним возилима.
- Коришћењем референтног симулатора и развијеног лабораторијског система извршена је верификација и поређење развијеног алгоритма са актуелним и референтним алгоритмима који се користе за управљање аутономним возилима и доказана је валидност основне хипотезе истраживања да је могуће пројектовати нови алгоритам за учење од-краја-до-краја за остваривање аутономне вожње заснован на употреби дубоке неуралне мреже, који у односу

на референтне алгоритме за управљање има значајно мање потребе за рачунарском снагом и компјутерским ресурсима, без значајне деградације перформанси вожње.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Увидом у постављене хипотезе, циљеве истраживања и добијене резултате, констатовали смо да је кандидаткиња успешно одговорила на суштинска питања која су од значаја за решење проблема којим се бави ова докторска дисертација. Предложена архитектура модела дубоке неуралне мреже је пројетована и успешно реализована у систему аутономног одржања возила у коловозној траци, што је и експериментално верификовано. Тиме су потврђене полазне претпоставке и остварен научни допринос који се односи на развој методологије и новог решења погодног за примену у су наменским системима са ограниченим процесорским и меморијским ресурсима. Увидом у приложену литературу као и публиковани рад у часопису *Sensors*, констатујемо да се истраживањима у овој дисертацији дошло до нових резултата који до сада нису били публиковани.

4.3. Верификација научних доприноса

Кандидаткиња Јелена Коцић је до сада објавила следеће радове релевантне за докторску дисертацију:

Категорија M21:

Главни допринос дисертације је у раду:

1. **J. Kocić**, N. Jovičić, V. Drndarević, „An End-to-End Deep Neural Network for Autonomous Driving Designed for Embedded Automotive Platforms,” *Sensors* 2019, 19, 2064. (ISSN 1424-8220, IF = 3.031, doi: 10.3390/s19092064)

Категорија M33:

1. **J. Kocić**, N. Jovičić, V. Drndarević, „Sensors and Sensor Fusion in Autonomous Vehicles,” in 26th Telecommunication Forum (TELFOR), Belgrade, Serbia, 2018, pp. 1-4. (doi: 10.1109/TELFOR.2018.8612054)

Категорија M63:

1. **J. Kocić**, N. Jovičić, V. Drndarević, “Oponašanje vozača korišćenjem deep learning tehnike”, in 17th International Symposium INFOTEH-JAHORINA, Jahorina, Bosna i Hercegovina, 2018, pp. 1-5. (doi: 10.1109/INFOTEH.2018.8345542)

ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација кандидаткиње Јелене Коцић под насловом „**Аутономно одржање возила у коловозној траци анализом информација са визуелних сензора коришћењем неуралне мреже**” је у целини написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме и садржи све битне елементе који се захтевају Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

У дисертацији се, користећи се техникама машинског учења и прецизније дубоког учења, решава актуелан технички проблем постизања аутономне вожње коришћењем дубоких конволуционих неуралних мрежа помоћу информација са визуелних сензора. Критички је анализирано стање у области на бази постојећих решења и предложено ново решење за остваривање аутономног одржања возила у коловозној траци коришћењем нове дубоке неуралне мреже која је погодна за примену на наменским хардверским платформама са ограниченим ресурсима. Резултати научног истраживања, као и техничко решење које је настало на основу истраживања, су верификовани како у симулираним тако и у реалним условима. Истраживање показује да решење које

је приказано у дисертацији отвара нове могућности и у потпуности обезбеђује применљивост у домену управљања аутономним возилима.

Резултате проистекле из истраживања спроведеног у оквиру докторске дисертације кандидаткиња је објавила у водећем међународном часопису и презентовала стручној јавности на конференцијама од међународног и националног значаја. Дисертација одражава способност кандидаткиње да идеје претвори у реална техничка решења, тако да је теоријска поставка добила и техничко отелотворење. На основу увида у докторску дисертацију и објављене радове кандидаткиње, Комисија констатује да докторска дисертација садржи оригиналан и савремен научни допринос у домену машинске визије и машинског учења у области електронике и информационих технологија.

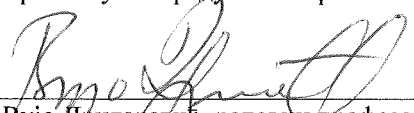
Кандидаткиња Јелена Коцић показала је способност за самостални научни рад, што потврђује и чињеница да је објавила неколико научних радова који су проистекли из рада на дисертацији, а у којима се појављује као први аутор. Оцењујући докторску дисертацију, као и чињеницу да је анализирана проблематика актуелна и савремена, као и да садржи научне доприносе, Комисија констатује да је кандидаткиња Јелена Коцић, дипломирани инжењер електротехнике, испунила све услове предвиђене Законом о високом образовању, Статутом и Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

Имајући у виду наведено, Комисија са задовољством предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да се докторска дисертација под називом **„Аутономно одржање возила у коловозној траци анализом информација са визуелних сензора коришћењем неуралне мреже“** кандидаткиње **Јелене Коцић** прихвати, изложи на увид јавности и упуту на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

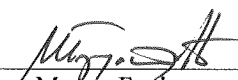
У Београду, 20.02.2020. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ


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


др Вујо Дундаревић, редовни професор у пензији
Универзитет у Београду - Електротехнички факултет


др Драгана Перић, виши научни сарадник
Институт Vlatacom, Београд


др Марко Барјактаровић, доцент
Универзитет у Београду - Електротехнички факултет


др Горан Квашчев, ванредни професор
Универзитет у Београду - Електротехнички факултет

