

Универзитет у Београду
Електротехнички факултет

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата **Новака С. Заграђанина**.

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета Универзитета у Београду бр. 5063/12-3 од 29.04.2022. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата **Новака С. Заграђанина** под насловом:

„Планирање путање робота базирано на *D* Lite* алгоритму и аутономној претрази окружења“

односно на енглеском:

„Robot path planning based on *D* Lite* algorithm and autonomous exploration of environment“.

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

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Новак С. Заграђанин је уписао докторске академске студије Електротехнике и рачунарства, модул Управљање системима и обрада сигнала, на Електротехничком факултету у Београду, школске 2012./2013. године. Све испите је успешно положио и испунио наставне обавезе, чиме је стекао право за подношење докторске дисертације на преглед и оцену.

На основу члана 101. Статута Универзитета у Београду, члана 74. Статута Универзитета у Београду-Електротехничког факултета и захтева студента (у даљем тексту кандидата), одобрено је продужење рока за завршетак студија до истека троструког броја школских година потребних за реализацију уписаног студијског програма. Кандидат је имао статус мировања у школској 2019/2020. години.

Кандидат је 30.09.2021. године пријавио тему докторске дисертације.

Комисија за студије трећег степена је на седници одржаној 06.10.2021. године разматрала предлог теме за израду докторске дисертације и упутила Наставно–научном већу предлог за именовање Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације.

Наставно-научно веће је на 865. Седници (одржаној 13.10.2021. године), одлуком бр. 5063/12-1 од 26.10.2021. године, именовало Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације у саставу:

1. др Жељко Ђуровић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет (председник комисије),
2. др Бојан Павковић, научни сарадник, Војнотехнички институт,
3. др Милан Бебић, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет.

За менторе докторске дисертације именован је др Коста Јовановић, ванредни професор.

Новак С. Заграђанин је полагао јавну усмену одбрану теме докторске дисертације 23.11.2021. године.

Наставно-научно веће је 19.01.2022. године усвојило Извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације.

Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду, на седници одржаној 14.02.2022. године, донело је одлуку којом се даје сагласност на предлог теме докторске дисертације Новака С. Заграђанина, под називом “Планирање путање робота базирано на D* Lite алгоритму и аутономној претрази окружења“ (Решење бр. 61206-541/2-22 од 14.02.2022. године).

Кандидат Новак С. Заграђанин је 28.03.2022. године предао докторску дисертацију на преглед и оцену.

Комисија за студије трећег степена је на седници одржаној 05.04.2022. године потврдила испуњеност потребних услова за подношење предлога Наставно–научном већу за формирање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације.

Наставно-научно веће Електротехничког факултета је на Седници одржаној 29.04.2022. године именовало Комисију за преглед и оцену докторске дисертације (Одлука бр. 5063/12-3 од 29.04.2022. године) у саставу:

1. др Коста Јовановић, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет (ментор),
2. др Жељко Ђуровић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
3. др Бојан Павковић, научни сарадник, Војнотехнички институт,
4. др Драган Памучар, ванредни професор, Универзитет одбране - Војна академија,
5. др Милан Бебић, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет.

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација припада научној области Електротехнике и рачунарства, за коју је матичан Електротехнички факултет Универзитета у Београду. У ужем смислу, дисертација припада научним областима Аутономни мобилни роботи.

Ментор докторске дисертације је др Коста Јовановић, ванредни професор. Ментор има вишегодишње истраживачко и наставно искуство везано за научне области којима се бави докторска дисертација кандидата. Аутор је великог броја радова у истакнутим међународним часописима.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Новак Заграђанин, дипломирани инжењер електротехнике, рођен је 08.02.1979. године у Сјеници - Република Србија. Основну школу је завршио у Сјеници 1994. године са одличним успехом као носилац Вукове дипломе, након чега је уписао Војну гимназију, коју је такође завршио са одличним успехом 1998. године, као други у класи. Војнотехничку академију, смер ваздухопловнотехничке службе, специјалност електроника ракетних система, завршио је 2003. године, са просечном оценом 8.81, као први у класи на поменутом смеру. Члан је удружења *MENSA*.

У периоду од 2003. до 2011. године службовао је у 250. рбр за ПВД, где је успешно обављао већи број дужности. Године 2011. је постављен је на дужност вишег истраживача у Одељењу за вођење и управљање ракета Сектора за ракетно наоружање Војнотехничког института.

У Управу за одбрамбене технологије Сектора за материјалне ресурсе Министарства одбране постављен је 2013. године, где је обављао дужност референта за ресурсе средстава ПВО у Групи за ресурсе НВО (наоружање и војна опрема) РВиПВО Одељења за ресурсе НВО. Године 2018. је постављен на садашњу дужност координатора за развој средстава НВО у Одељењу за заједничке послове Сектора за материјалне ресурсе Министарства одбране.

У оквиру садашње дужности прописане су му обавезе да прати рад, врши координацију и усмерава активности на пројектима везаним за развој наоружања и војне опреме у ВТИ, привредним друштвима из групације Одбрамбене индустрије Србије и осталим организацијама које се баве развојем НВО, као и активности везане за проширење и јачање технолошке базе од интереса за систем одбране.

У оквиру даљег војностручног усавршавања завршио је Основни командно-штабни курс (2013. године) и Командно-штабно усавршавање (2019. године) у организацији Универзитета одбране. У току досадашње службе оцењиван је одличним службеним оценама. Завршио је већи број курсева у земљи, као и један курс у иностранству (Оберамергау, Немачка), на тему развоја и опремања средствима наоружања и војне опреме. Био је члан више тимова Министарства одбране и Војске Србије за опремање ВС различитим врстама наоружања и војне опреме.

Докторске студије на Електротехничком факултету у Београду уписао је школске 2012./2013. године на модулу „Управљање системима и обрада сигнала”. Током докторских студија испунио је све обавезе и положио све испите предвиђене наставним планом и програмом, са просечном оценом 9,70.

Први је аутор три рада публикована у међународним научним часописима са импакт фактором, који су до тренутка писања овог текста цитирани више десетина пута, као и три рада презентована на научним конференцијама међународног карактера.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација по форми и структури потпуно одговара Упутству за обликовање докторске дисертације Универзитета у Београду. Садржи укупно 110 страна. Делови/елементи дисертације су:

- Насловна страница на српском језику
- Насловна страница на енглеском језику
- Страница са информацијама о ментору и члановима комисије
- Изјава захвалности
- Странице са подацима о докторској дисертацији на српском језику
- Странице са подацима о докторској дисертацији на енглеском језику
- Садржај
- Списак слика
- Списак табела
- Текст рада по поглављима
- Литература
- Биографија аутора
- Изјава о ауторству
- Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада
- Изјава о коришћењу.

Дисертација садржи 72 слике и 11 табела.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Предмет истраживања у оквиру дисертације су *on-line frontier-based* стратегије за претрагу окружења, код којих је примењен *D* Lite* алгоритам за планирање путање робота и које за избор следеће позиције осматрања и прикупљања података (из скупа могућих кандидата) користе методе вишекритеријумског одлучивања, које (према сазнању аутора) до сада нису коришћене за ту намену. Као критеријуми за избор следеће позиције робота из скупа кандидата користе се: дужина путање до кандидата, информативни потенцијал кандидата и удаљеност кандидата од базне станице.

На бази проучене литературе, за меру ефикасности претраге у дисертацији је примењен просечан укупан пређени пут робота у односу на више стартних позиција за потребе реализације претраге 90% окружења. Имајући то у виду, два изабрана критеријума - „дужина путање до позиције-кандидата“ и „информативни потенцијал позиције-кандидата“ непосредно утичу на ефикасност претраге, први обрнуто пропорционално јер кумулативно увећава укупан пређени пут робота, а други директно пропорционално јер кумулативно увећава претражени део окружења. Трећи изабрани критеријум „удаљеност позиције-кандидата од базне станице“ не утиче непосредно на ефикасност претраге, али је битан са аспекта одржавања комуникације са базном станицом, што посебно долази до изражаја у мисијама трагања и спасавања када за што краће време треба проследити прикупљене податке са терена.

Поред увода и закључка, докторска дисертација садржи још три поглавља.

У другом поглављу се проучавају алгоритми за планирање путање робота из фамилије A^* алгоритма - ARA^* , $D^* Lite$ и AD^* . Ови алгоритми функционишу на бази обраде графа којим се моделира мапа окружења у којем се креће робот. Често се примењују у пракси за планирање

путање робота, па тако и у стратегијама за претрагу окружења. Најпре се образлаже концепт A^* алгоритма, затим детаљно описује принцип функционисања *anytime* алгоритама (алгоритама са брзим одзивом), односно типичног представника те класе планера - ARA^* алгоритма. У наставку се описују динамички (инкрементални алгоритми) - $D^* Lite$ и AD^* , чија је главна карактеристика ефикасно процесуирање детектованих промена у окружењу у циљу корекције путање (без ресетовања резултата претходног прорачуна). $D^* Lite$ представља поједностављену верзију (у смислу алгоритамске процедуре) стандардног D^* алгоритма. D^* алгоритам је ефикаснији од A^* алгоритма, у смислу да брже долази до решења, због чега је нашао широку примену у пракси, укључујући беспосадне верзије возила *HMMWV*, беспосадне платформе које су учествовале на *Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA)* такмичењима, *NASA* ровере на Марсу, итд. $D^* Lite$ захтева око 30% мање линија кода од D^* , при чему је ефикасан као и D^* , а у појединим случајевима је и ефикаснији, па је стога $D^* Lite$ данас један од најчешће примењиваних алгоритама за планирање путање робота. На крају поглавља даје се детаљан пример функционисања $D^* Lite$ алгоритма и врши поређење функционисања алгоритама ARA^* , $D^* Lite$ и AD^* у неколико сценарија.

Треће поглавље обрађује аутономну претрагу окружења. После дефиниције претраге окружења прелази се на опис различитих приступа за њену реализацију. У зависности од расположивих информација о окружењу у ком се планира ангажовање робота, за претрагу окружења примењује се *on-line* или *off-line* приступ. У случају *on-line* претраге, која је са аспекта реализације много изазовнија, робот након прикупљања података са актуелне позиције бира следећу позицију у складу са неком (претходно дефинисаном) стратегијом, премешта се на њу, извршава опсервацију окружења са нове позиције и понавља овај процес све док не испуни задатак или заврши мисију. Током последњих деценија у литератури су предложене различите стратегије за претрагу окружења. Већина њих се заснива на концепту избора следеће позиције робота из скупа позиција-кандидата које леже на граници између претражених и непретражених делова окружења и то су тзв. „*frontier-based*“ стратегије. Концепт *frontier-based* претраге окружења први пут је званично презентован у раду аутора *Yamauchi* 1997. године. Након детаљног описа концепта *frontier-based* претраге окружења, поглавље се завршава навођењем класичних *frontier-based* стратегија за претрагу окружења из литературе и образлагањем „техника“ које те стратегије користе за избор следеће позиције робота. Најједноставнија из групе *frontier-based* стратегија је тзв. „*Dist_Min*“ стратегија, која за следећу позицију робота бира ону која је најближа његовој тренутној позицији. Са друге стране, стратегија која се најчешће предлаже у литератури као довољно добар избор је тзв. *GBL* стратегија (названа по ауторима - *H. H. Gonzales-Banos* и *J. C. Latombe*), која евалуацију сваке позиције-кандидата врши узимајући у обзир њену удаљеност од тренутне позиције робота и очекивану количину информација о окружењу коју робот може прикупити на тој позицији. Поред ова два критеријума, укључивање вероватноће успостављања комуникације између робота и базне станице у процес евалуације позиција-кандидата, имајући у виду значај тог критеријума, посебно у мисијама трагања и спасавања, први пут је предложено код тзв. *AOJRF* стратегије (названа по тиму *Amsterdam Oxford Joint Rescue Forces* који је ову стратегију са успехом користио на такмичењу *RoboCup Rescue Virtual Robots Competition* 2009. године). Наведене стратегије за претрагу окружења, могу се сматрати класичним и коришћене су као референтне (једна или више њих) у значајном делу релевантне литературе која проучава предметну област.

Четврто поглавље посвећено је унапређењу претраге окружења применом вишекритеријумског одлучивања и $D^* Lite$ алгоритма, као и унапређењу планирања путање робота у мисијама трагања и спасавања и има три целине. На почетку прве целине уводе се стратегије за претрагу окружења које за избор следеће позиције робота користе методе вишекритеријумског одлучивања *SAW*, *COPRAS* и *TOPSIS*. Мотив за то је чињеница да се у последњој деценији, поред претходно наведених класичних стратегија, све више користе

методе *BKO* у мисијама претраге окружења, имајући пре свега у виду да нису ограничене у броју критеријума које могу разматрати при евалуацији позиција-кандидата. Широком и флексибилним приступом у одабиру критеријума и њихових тежина *BKO* обезбеђује ефикасно управљање претрагом у зависности од услова у којима се одвија и њених циљева. После описа модела окружења за претрагу и критеријума за избор следеће позиције робота, врши се опсежно тестирање путем симулација у Матлабу различитих сценарија претраге окружења применом поменутих метода *BKO*, као и класичних стратегија за претрагу окружења из литературе анализираних у дисертацији (*Dist_Min*, *GBL*, *AOJRF*, *WS*). На крају ове целине презентују се резултати и врши дискусија у вези са истим. У другој целини у оквиру овог поглавља предложена су два приступа за унапређење планирања путање робота применом *D* Lite* алгоритма у мисијама претраге окружења за потребе трагања и спасавања у урбаном окружењу. Овај део истраживања је такође мотивисан проученом литературом. Наиме, *cost maps* технике или технике за дефинисање тежина ћелија мапе су погодне за примену у комбинацији са алгоритмима који планирање путање робота врше на бази обраде графа, како би се унапредио процес планирања. Ове технике пружају могућност реалистичног осликавања сложености терена са аспекта проходности, док посебан изазов представља дефинисање тежина ћелија у мапи која се користи за планирање путање робота у окружењу где су присутни људи. Поред *cost maps* приступа, последњих година један од главних праваца истраживања у роботизици је примена различитих техника учења у комбинацији са алгоритмима за планирање путање робота. Циљ је да се на овај начин у мери која је могућа примени стечено искуство како би се унапредио процес планирања. Модели учења могу бити засновани на формирању базе података где се чувају сегменти научених локалних путања у зависности од уобичајених геометријског облика препрека, затим коришћењем тзв. „графова базираних на искуству“, којим се увек изнова на исти начин моделира део окружења који има фиксну структуру, и сл. С тим у вези, први приступ предложен у дисертацији за унапређење планирања путање робота у мисијама трагања и спасавања у урбаном окружењу представља примену *D* Lite* алгоритма у комбинацији са фази логиком, а други примену *D* Lite* алгоритма у комбинацији са *on-line* учењем. Трећа целина бави се верификацијом кључних резултата истраживања коришћењем *Gazebo* симулатора (специјализованог *3D* симулатора окружења робота) у комбинацији са пакетима који раде под *Robot Operating System (ROS)*, као веродостојна замена за тестирање анализираних стратегија за претрагу окружења на реалним роботима. За те потребе примењен је виртуелни модел *Turtlebot 3* робота.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Два главна правца истраживања у докторској дисертацији су планирање путање робота и претрага окружења, оба са високим нивоом аутономности у извршавању. И један и други правац спадају у фундаменталне области изучавања у роботизици, имајући у виду да чине основу њених многобројних примена у пракси. Ова констатација произилази из чињенице да се о окружењима у која се робот упућује обично веома мало зна, тако да поред оспособљености за обављање дефинисаних задатака, робот треба да буде у стању да планира своје кретање и упозна своје окружење.

Суштински, и претрага окружења и планирање путање имају своје засебне, сложене изазове и у обе поменуте области изучавања постоји још увек велики број отворених питања, што је представљало главни мотив кандидата за њихово истраживање. Докторска дисертација у том смислу прати најновије резултате у поменутих областима и на томе се заснива њена савременост.

Последњих година све већа пажња посвећује се роботима за трагање и спасавање, како од стране истраживача у области роботике, тако и од потенцијалних корисника ових робота. Стога се, поред бављења генерално проблемом планирања путање робота и стратегијама за претрагу окружења, дисертација делом усмерава на конкретизацију проблема претраге окружења за потребе трагања и спасавања у урбаном окружењу. Посебно сложен подухват у спасилачким мисијама представља ангажовање мобилних робота са одређеним степеном аутономије. Та чињеница је додатно подстакла кандидата да у дисертацији предложи два приступа за унапређење планирања путање робота применом *D* Lite* алгоритма у мисијама аутономне претраге окружења за потребе трагања и спасавања у урбаном окружењу. При томе су коришћене актуелне технике - фази логика и *on-line* учење.

Кључни резултати истраживања везани за претрагу окружења на крају су верификовани у *Gazebo 3D* симулатору, уз коришћење пакета који раде под *Robot Operating System (ROS)*, као веродостојна замена за тестирање анализираних стратегија за претрагу окружења на реалним роботима. *Gazebo* и *ROS* представљају универзални „научни језик“ данашње роботике и то даје додатну тежину савремености и оригиналности дисертације.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У дисертацији је анализирана обимна релевантна литература, почевши од базичних радова везаних за планирање путање робота и претрагу окружења, до најновијих резултата из поменутих области публикованих у престижним међународним часописима и зборницима радова са конференција. Сви кључни делови дисертације су поткрепљени референцама, што упућује на закључак да је кандидат детаљно проучио актуелна сазнања предметних области истраживања.

Наведено је укупно 104 библиографских референци. Око 50% референци чине радови објављени у последњих пет година. Такође, око 50% референци чине часописни радови.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У докторској дисертацији су коришћене актуелне инжењерске и научне методе, по следећем:

- Проучавање и анализа доступне литературе и научних радова који се тичу претраге окружења.
- Проучавање и анализа доступне литературе и научних радова који се тичу планирања путање робота.
- Проучавање и анализа доступне литературе и научних радова који се тичу вишекритеријумског одлучивања.
- Формирање у Матлабу сложеног модела за симулацију претраге окружења, као и имплементација анализираних стратегија за претрагу.
- Имплементација у Матлабу алгоритама за планирање путање робота (*D* Lite*, *ARA**, *AD**).
- Имплементација у Матлабу оригиналног фази интегралног система и алгоритма *on-line* учења.
- Креирање сложене архитектуре за верификацију кључних резултата истраживања, коришћењем *Gazebo* симулатора (специјализованог *3D* симулатора окружења робота) у комбинацији са пакетима који раде под *Robot Operating System (ROS)* и Матлабом, као веродостојна замена за тестирање анализираних стратегија за претрагу окружења на реалним роботима.

3.4. Применљивост остварених резултата

Аутономни мобилни роботи се све више користе за обављање различитих задатака, како у уобичајеним, свакодневним ситуацијама, тако и у ситуацијама и окружењима где из економских или безбедносних разлога није могуће послати људе. Ти задаци су често везани за неку потребу претраге окружења, било да се ради о формирању његове мапе или о откривању неких других карактеристика окружења које су од интереса за задату мисију, као што је то у случају трагања и спасавања, планетарних мисија, визуелне инспекције, рударства, роботских усисивача и сл. У том смислу, остварени резултати у дисертацији у сегменту унапређења стратегија за претрагу окружења применом вишекритеријумског одлучивања имају широк потенцијал за примену у пракси.

Такође, практично су примењиви и предложени приступи за унапређење планирања путање робота у мисијама претраге окружења за потребе трагања и спасавања у урбаном окружењу, применом *D* Lite* алгоритма у комбинацији са фази логиком и *on-line* учењем. Битно је нагласити да ови приступи у суштини не морају бити ограничени на задатке претраге окружења, имајући у виду да су алгоритми за планирање путање робота, фази експертски системи и *on-line* учење данас више него актуелне теме у разним сферама роботике. Треба додати и то да се, поред роботике, алгоритми за планирање путање обрађени у дисертацији користе често и у разним другим областима примене вештачке интелигенције, као и у видео игрицама.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Комисија је стекла увид у резултате досадашњег научно-истраживачког рада Новака С. Заграђанина и констатовала да је именовани:

- Положио све испите и завршио све обавезе предвиђене наставним планом и програмом докторских академских студија.
- Јавно одбранио тему докторске дисертације 23.11.2021. године пред Комисијом формираном од стране Наставно-научног већа Електротехничког факултета у Београду.
- Публиковао више значајних радова у међународним научним часописима и на међународним научним скуповима из области којима припада предложена тема докторске дисертације.
- Стекао вишегодишње искуство у истраживању области коју покрива тема докторске дисертације.

На основу изнетог Комисија сматра да Новак С. Заграђанин у сваком погледу испуњава услове и оспособљен је за самосталан научни рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

У оквиру докторске дисертације остварени су следећи научни доприноси:

- **Допринос 1. (Поглавље 4.1):** Унапређена је претрага комплексних окружења применом вишекритеријумског одлучивања (*BKO*) за избор следеће позиције робота и *D* Lite* алгоритма за планирање путање робота. Конкретно, доказано је да се применом *TOPSIS* методе *BKO* за избор следеће позиције и *D* Lite* алгоритма за планирање његове путање обезбеђује претрага комплексних окружења за краћи укупан пређени пут робота у односу на методе *SAW* и *COPRAS*, као и у односу на остале анализирани класичне

стратегије за претрагу окружења из литературе (*Dist_Min*, *GBL*, *AOJRF*, *WS*). За избор следеће позиције робота коришћени су критеријуми: „дужина путање од актуелне позиције робота до позиције-кандидата“, „информативни потенцијал позиције-кандидата“ и „удаљеност позиције-кандидата од базне станице“.

- **Допринос 2.** (Поглавље 4.2.1): Унапређен је процес планирања путање робота у мисијама претраге окружења за потребе трагања и спасавања у урбаном окружењу, применом *D* Lite* алгоритма у комбинацији са оригиналним фази интегралним системом. Фази интегрални систем се користи за дефинисање тежина ћелија мапе намењене за планирање путања робота, како оне не би имале бинарне вредности, тако да алгоритам генерише путање најмање цене у зависности од три параметра, а не путање најмање дужине. Тиме је постигнуто да претрага окружења покрива објекте према приоритету, као и да работи за мапирање при кретању не ометају друге роботе. За овај научни допринос примарно је везан рад на позицији (2), а резултати истраживања везани за овај допринос објављени су и у радовима (3), (4) и (5).
- **Допринос 3.** (Поглавље 4.2.2): Унапређен је процес планирања путање робота при претрази динамичких окружења, конкретно окружења са споропроменљивим препрекама детектованим у претраженом делу терена, применом *D* Lite* алгоритма у комбинацији са алгоритмом *on-line* учења. Поменуте ситуације су карактеристичне за трагање и спасавање у урбаном окружењу, али нису ограничене само на ту врсту мисија претраге окружења. Намена *on-line* учења је да се детектоване препреке интегришу односно бришу из мапе која се користи за планирање путања робота на начин који унапређује процес планирања, што се постиже применом прилагођеног „*M-out-of-N*“ детектора тј. одговарајућег статистичког теста. Овим је скраћен пређени пут робота за мапирање и минимизована су његова ризична кретања, јер се маневар у циљу избегавања препрека изводи пре потенцијалног сусрета. Поменути научни допринос такође се примарно односи на рад наведен на позицији (2), а резултати дела везаних истраживања објављени су и у радовима (3), (4) и (5).
- **Допринос 4.** (Поглавље 4.1.): Проширена је база стратегија за претрагу окружења које користе *BKO* за избор следеће позиције робота имплементирањем стандардних *BKO* метода које до сада нису коришћене у ту сврху - *SAW*, *COPRAS* и *TOPSIS*. Овај научни допринос такође је обухваћен радом на позицији (1), а резултати истраживања везани за овај допринос објављени су и у раду (3).

4.2. Кратка критичка анализа резултата истраживања

Кратка анализа научних доприноса наведених у тачки 4.1. дата је у наставку:

- Специфичност *TOPSIS* методе је да све алтернативе представља у n -димензионалном простору (где је n број критеријума) тако да при одлучивању бира ону алтернативу која има најмању Еуклидову удаљеност од идеалног решења и истовремено највећу могућу Еуклидову удаљеност од анти-идеалног решења. Идеално решење је хипотетичко решење и код њега све вредности критеријума одговарају најпожељнијим вредностима критеријума у односу на све алтернативе. Анти-идеално решење је такође хипотетичко и код њега све вредности критеријума одговарају најнепожељнијим вредностима критеријума у односу на све алтернативе. Максималним удаљавањем од анти-идеалног (хипотетички најлошијег) решења минимизује се ризик у одлучивању. Другим речима, минимизује се ризик избора неке алтернативе на рачун тога што већина критеријума има релативно повољне вредности, али чија нпр. вредност једног критеријума има у значајнијој мери лошију вредност. Код других анализираних метода *BKO*, као и код

класичних стратегија, може се десити да се на рачун повољних вредности осталих критеријума изабере алтернатива која има у значајнијој мери лошу вредност једног критеријума, а пошто у примењеном моделу претраге окружења два од три критеријума непосредно утичу на ефикасност претраге, онда постоји тенденција да је донета одлука у овом случају лошијег квалитета него када је у питању *TOPSIS*. Кључна карактеристика комплексних окружења (окружења са великим бројем препрека) је да се позиције-кандидати (алтернативе при одлучивању) значајно разликују у погледу вредности изабраних критеријума, због чега је изражен ризик од лошег избора следеће позиције робота. Имајући наведено у виду, у оквиру истраживања је доказана хипотеза да се применом *TOPSIS* методе за избор следеће позиције робота и *D* Lite* алгоритма за планирање његове путање обезбеђује претрага комплексних окружења за краћи укупан пређени пут робота у односу на методе *SAW* и *COPRAS*, као и у односу на остале анализираних класичне стратегије за претрагу окружења из литературе (*Dist_Min*, *GBL*, *AOJRF*, *WS*), што представља први научни допринос дисертације. Ограничење предложеног приступа огледа се у томе да се у случају избора других критеријума за евалуацију позиција-кандидата и/или претраге окружења мале комплексности (са малим бројем препрека) не може очекивати да ће *TOPSIS* дати боље резултате у односу на друге стратегије за претрагу окружења анализираних у дисертацији. Кључни резултати истраживања везани за претрагу окружења на крају су верификовани у *Gazebo 3D* симулатору, уз коришћење пакета који раде под *Robot Operating System (ROS)*, као веродостојна замена за тестирање анализираних стратегија за претрагу окружења на реалним роботима.

- У мисијама претраге за потребе трагања и спасавања у урбаном окружењу честе су ситуације да је услед неког акцидента измењена иницијално позната мапа окружења у коме се налазе објекти различите намене. Тада је поред робота за мапирање неопходно ангажовање и робота и/или људи за обављање других задатака, нпр. за евакуацију повређених, уклањање препрека, неутралисање опасних материја. У циљу управљања претрагом окружења у оваквим условима, а за потребе ефикасне реализације мисије трагања и спасавања, у дисертацији се предлаже примена фази интегралног система за дефинисање тежина ћелија мапе која се користи за планирање путања робота. Намена фази интегралног система је да обезбеди да се претрага окружења реализује на такав начин и тим редом да „покрива“ објекте према приоритету, од највећег ка најмањем, и то тако да роботи за мапирање у што мањој мери ометају друге роботе и људе, који због природе својих задатака обично морају прићи ближе објектима. Резултати истраживања и тестирања су показали да је остварена горе описана намена фази интегралног система. Са друге стране, у ситуацији када није примењен фази интегрални систем, тежине ћелија имају бинарне вредности, тако да алгоритам увек генерише путање најмање дужине, а не путање најмање цене, чиме се губи флексибилност у управљању мисијом. Последица тога је да при реализацији претраге окружења није испоштован приоритет објеката, а додатни проблем представља то што робот за мапирање током претраге прилази превише близу објектима, укључујући и објекте великог приоритета, тако да је ризик од непожељних контакта са другим роботима и људима значајно изражен.
- За оптимизацију планирања путање робота за мапирање у ситуацијама када се током претраге окружења детектују споропроменљиве препреке у претраженом делу окружења (други роботи, машине или група људи који на некој фиксној позицији одређено време обављају своје задатке и сл.) у дисертацији се предлаже примена *D* Lite* алгоритма у комбинацији са *on-line* учењем базираним на „*M-out-of-N*“ детектору. Ове ситуације су такође карактеристичне за трагање и спасавање, али нису ограничене само на ту врсту мисија претраге окружења. Циљ је да се поменути препреке

интегришу, односно бришу из мапе која се користи за планирање путања робота на начин који унапређује процес планирања. Резултати истраживања су показали да је предложеним приступом обезбеђена оптимизација путања робота за мапирање, чиме је скраћен његов укупан пређени пут и уједно су минимизована његова ризична кретања у простору који дели са другим роботима, машинама или људима, имајући у виду да се маневар робота у циљу избегавања препреке изводи много раније пре потенцијалног сусрета са препреком. Без примене *on-line* учења, алгоритам за планирање путање је „принуђен“ да иницијално генерисану путању од актуелне до следеће позиције робота коригује у току кретања робота, што се ради у тренутку када робот дође близу препреке и детектује је својим сензорима за безбедно кретање. Поред додатног времена које је неопходно утрошити на репланирање путање, која је у том случају и дужа (због компликованијег маневра који робот треба да уради како би избегао препреку), робот у овим ситуацијама прилази превише близу препреке тако да је ризик од непожељних контакта значајно изражен.

4.3. Верификација научних доприноса

У склопу истраживања обухваћених дисертацијом публикована су три рада у еминентним међународним научним часописима, а три рада су презентована на научним конференцијама међународног карактера, по следећем:

Часописни радови

(1) Novak Zagradjanin, Dragan Pamucar, Kosta Jovanovic, Nikola Knezevic and Bojan Pavkovic, „Autonomous exploration based on multi-criteria decision-making and using D* Lite algorithm“, *Intelligent Automation & Soft Computing, Special Issue: Soft Computing Methods for Intelligent Automation Systems*, pp. 1369-1386, 2021 (M23, IF=1.647).

(2) Novak Zagradjanin, Aleksandar Rodic, Dragan Pamucar and Bojan Pavkovic, „Cloud-based multi-robot path planning in complex and crowded environment using fuzzy logic and online learning“, *Information Technology and Control*, Vol. 50, No. 2, pp. 357-374, 2021 (M23, IF=1.228).

(3) Novak Zagradjanin, Dragan Pamucar and Kosta Jovanovic, „Cloud-based multi-robot path planning in complex and crowded environment with multi-criteria decision making using full consistency method“, *Symmetry*, Vol. 11, No. 10, pp. 1-15, 2019 (M22, IF=2.645).

Конференцијски радови

(4) Novak Zagradjanin and Aleksandar Rodic, „Cloud-based distributed intelligence of robot team in complex accident situation“, 4th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering – IcETRAN 2017, Kladovo, Serbia, 2017.

(5) Novak Zagradjanin and Stevica Graovac, „Autonomous mobile robot path planning in complex and dynamic environments“, International Scientific Conference on Defensive Technologies - OTEH 2016, Belgrade, Serbia, 2016.

(6) Novak Zagradjanin and Stevica Graovac, „Analysis and comparison of a command guidance and the combination of programmed and homing guidance“, International Scientific Conference on Defensive Technologies - OTEH 2014, Belgrade, Serbia, 2014.

Допринос 1. наведен у тачки 4.1. верификован је публикавањем рада на позицији (1), док су у сегменту истраживања *D* Lite* алгоритма и његове примене за овај допринос везани и радови на позицијама: (2), (3), (4) и (5).

Допринос 2. наведен у тачки 4.1. верификован је публикавањем рада на позицији (2), а резултати истраживања везани за овај допринос објављени су и у радовима на позицијама: (3), (4) и (5).

Допринос 3. наведен у тачки 4.1. верификован је такође публикавањем рада на позицији (2), а резултати дела везаних истраживања објављени су и у радовима на позицијама: (3), (4) и (5).

Допринос 4. наведен у тачки 4.1. верификован је публикавањем рада на позицији (1), а резултати истраживања везани за овај допринос објављени су и у раду на позицији (3).

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу изложеног, Комисија сматра да докторска дисертација кандидата Новака С. Заграђанина, дипломираног инжењера електротехнике, испуњава све суштинске и формалне услове предвиђене Законом о високом образовању, као и прописима Универзитета у Београду и Електротехничког факултета.

Научни доприноси дисертације се односе на унапређење актуелне тематике аутономне претраге окружења и планирање путање робота. Резултати истраживања су тестирани опсежним симулацијама у Матлабу, као и коришћењем *Gazebo* симулатора, специјализованог окружења за 3D симулацију робота, у комбинацији са пакетима који раде под *Robot Operating System (ROS)*, као веродостојна замена за тестирање на реалним роботима. Предложена унапређења имају широк потенцијал за примену у пракси, првенствено за потребе формирања мапе окружења употребом аутономних мобилних система, мисије трагања и спасавања, визуелне инспекције, рударства, роботских усисивача и сл. Научни доприноси су верификовани радовима публикованим у еминентним међународним научним часописима (три рада са импакт фактором на којима је кандидат првopotписани аутор), који су до тренутка писања овог Извештаја цитирани више десетина пута.

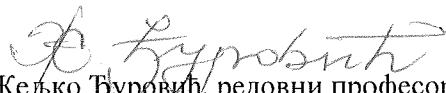
Узимајући у обзир све претходно наведено, Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета да се докторска дисертација под називом „Планирање путање робота базирано на *D* Lite* алгоритму и аутономној претрази окружења“, односно на енглеском „**Robot path planning based on *D* Lite* algorithm and autonomous exploration of environment**“, кандидата Новака С. Заграђанина, дипломираног инжењера електротехнике, прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

У Београду, 4.5.2022. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

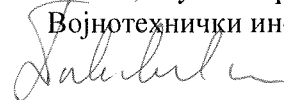


др Коста Јовановић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Жељко Ћуровић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

др Бојан Павковић, научни сарадник
Војнотехнички институт



др Драган Памучар, ванредни професор
Универзитет одбране - Војна академија



др Милан Бебић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



