

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Наташе Влаховић

Одлуком Наставно-научног већа бр. 5030/15-3 од 26. октобра 2021. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Наташе Влаховић под насловом

„Робусно праћење покретних објеката на термалној слици“

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

Дана 31.10.2015. године кандидаткиња Наташа Влаховић (рођена Кљајић) је уписала докторске студије на Електротехничком факултету, Универзитет у Београду, на модулу Управљање процесима и обрада сигнала. На докторским студијама је положила све испите са просечном оценом 10,00. Студент је у школској 2018/2019. години био у статусу мировања, због трудничког боловања.

29.12.2020. године Наташа Влаховић је пријавила тему за израду докторске дисертације под радним називом „Робусно праћење покретних објеката на термалној слици“.

12.01.2021. године Комисија за студије трећег степена разматрала је предлог теме за израду докторске дисертације и предлог Комисије о оцени подобности теме и кандидата упутила Наставно –научном већу на усвајање.

Наставно-научно веће је именовало Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације (Одлука број 5030/15-1 од 03.02.2021.) у саставу:

- др Бранко Ковачевић, професор емеритус, Универзитет у Београду, Електротехнички факултет
- др Зоран Бањац, научни сарадник, Институт Влатаком

- др Драгомир Ел Мезени, доцент, Универзитет у Београду,
Електротехнички факултет

За ментора докторске дисертације предложен је др Жељко Ђуровић, редовни професор, Електротехнички факултет у Београду.

10.02.2021. године кандидаткиња је полагала јавну усмену одбрану теме докторске дисертације.

Наставно-научно веће усвојило је Извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације (Одлука бр. 5030/15-2 од 07.04.2021. године).

Веће научних области техничких наука дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације (број 61206-1757/2-21 од 28.04.2020. године).

30.09.2020. године кандидат је предао докторску дисертацију на преглед и оцену.

06.10.2020. 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.

Наставно-научно веће Факултета именовало је Комисију за преглед и оцену докторске дисертације (број одлуке 5030/15-3 од 26.10.2021. године) у саставу:

- др Жељко Ђуровић, редовни професор, Универзитет у Београду,
Електротехнички факултет
- др Бранко Ковачевић, професор емеритус, Универзитет у Београду,
Електротехнички факултет
- др Зоран Бањац, научни сарадник, Влатаком институт високих технологија
д.о.о. у Београду

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација припада научној области Техничке науке – Електротехника и рачунарство, а ужа научна област је Управљање системима и обрада сигнала, за коју је матичан Електротехнички факултет Универзитета у Београду. За ментора докторске дисертације именован је др Жељко Ђуровић, редовни професор Електротехничког факултета у Београду. Професор др Жељко Ђуровић је аутор већег броја релевантних радова у истакнутим међународним часописима који су приложени приликом пријаве теме докторске дисертације. Ментор предаје више предмета при Катедри за сигнале и системе који су у вези са предметом дисертације.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Кандидат Наташа (девојачко презиме Кљајић) Влаховић је рођена 09.06.1987. године у Београду, Република Србија. Основну школу завршила је у Београду са одличним успехом (носилац Вукове дипломе), средњу школу је завршила у Београду (Девета београдска гимназија), са одличним успехом. Основне студије је уписала на Електротехничком факултету у Београду 2006. године, а дипломирала 2010. године након 8 семестара, на смеру Сигнали и системи са оценом 10 (десет). Просек оцена у току студија је био 8,62. Дипломски рад под називом: „Визуелизација система управљања позиционим серво системом на платформи Simens Simatic PCS7” одбранила је на Електротехничком факултету у Београду 2010. године.

Након основних уписала је и мастер студије на Електротехничком факултету у Београду, 2010. године, а завршила 2011. године, на смеру Сигнали и системи са оценом 10

(десет). Просек оцена на мастер студијама је био 10. Поседује звање дипломирани инжењер-мастер електротехнике и рачунарства. Мастер рад под називом: „Оптичко препознавање карактера базирано на Хопфилдовим неуралним мрежама” одбранила је на Електротехничком факултету у Београду 2011. године.

Одмах по завршетку мастер студија, започела је праксу у фирми *Microsoft Development Center Serbia*, где је провела месец дана на позицији за лабелирање и аквизицију података. Затим прелази у фирму Термовент Комерц, као инжењер аутоматике, и тамо остаје до јуна 2012. године. Од јуна 2012. године до новембра 2017. године радила је на Војнотеничком институту (Министарство Одбране Републике Србије - Управа за Одбрамбене Технологије). За то време ради на позицији истраживач – сарадник, а затим и виши истраживач у Сектору за ракетно наоружање. Током рада у Војнотехничком институту ангажована је и као секретар Научног већа, осим редовне позиције истраживача у оквиру лабораторије за вођење и управљање.

2015. године уписује докторске академске студије на Електротехничком факултету на модулу Управљање системима и обрада сигнала.

25.01.2016. године изабрана је у истраживачко звање истраживач-сарадник за област електротехника – управљање системима и обрада сигнала, од стране Научног већа Војнотехничког института.

У новембру 2017. године почиње са радом у Влатаком институту, на позицији систем инжењера.

Област истраживања Наташе Влаховић обухвата управљање системима, обраду сигнала, дигиталну обраду слике. Аутор је и коаутор радова који су публиковани у међународним научним часописима (1 рад), домаћим часописима (4 рада), као и радова саопштених на међународним конференцијама (16 радова) и домаћим конференцијама (1 рад).

Поседује сертификате већег броја курсева, од којих су релевантни: *СТАНАГ 3 - сертификат о знању енглеског језика по стандарду СТАНАГ 6001; Management and Contracting in Research and Development*, предавача из: *Post Naval School, Monterey, California, USA*, одржаног у Београду; *LabVIEW Core 1; Data Acquisition and Signal Conditioning; LabVIEW Real Time 1-2; LabVIEW FPGA; CLAD (Certified LabVIEW Associate Developer - NI CLAD); Ballistic and Cruise Missile Systems, Cranfield University*, одржаног у Кренфилду, Уједињено Краљевство; *Managing Complex Research and Development Projects*, предавача из: *Post Naval School, Monterey, California, USA*, одржаног у Београду; *Acquisition and lifecycle management*, предавача из: *Post Naval School, Monterey, California, USA*, одржаног у Београду; *2nd International Summer School on Deep Learning*, одржаног у Ђенови, Италија.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација по својој форми и структури одговара у потпуности Упутству за обликовање докторске дисертације Универзитета у Београду. Дисертација је написана на 106 страна куцаног текста, латиничним писмом и садржи 75 слика, 14 табела, и 104 референце које су наведене по редоследу цитирања у тексту дисертације. Текст дисертације је организован у 7 поглавља са насловима: 1. Увод; 2. Термална слика; 3. Обрада слике; 4. Праћење покретних објеката; 5. Естимација стања стохастичких система; 6. Дизајн робусног система за праћење покретних објеката на термалној слици и експериментални резултати; 7. Закључак. Такође, текст дисертације садржи и насловну страну на српском и енглеском језику, страну са подацима о ментору и члановима комисије, захвалницу, резиме дисертације на српском и енглеском језику, садржај, списак коришћене литературе, биографију аутора, изјаву

о ауторству, изјаву о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада и изјаву о коришћењу.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У уводном поглављу је изложен предмет рада и преглед проблема који се разматра у докторској дисертацији, као и циљ истраживања и значај теме.

У другом поглављу описане су карактеристике термалне слике у три засебне целине: термалне камере, могућности и ограничења термалних камера и анализа термалне слике. У делу који се односи на термалне камере је описан генерални принцип рада термалних камера, као и начин формирања термалне слике. Изнете су и основне поделе камера, на основу таласне дужине, као и на основу технологије израде. Термалне слике се разликују од слика са камера у визуелном домену, а главне разлике су изложене у делу који се односи на могућности и ограничења термалних камера. Такође је, у овом делу, дат одговор на питање колико далеко можемо видети са термалном камером, објашњен је појам Џонсоновог критеријума, дат је преглед мера перформансе које говоре о осетљивости термовизијске камере и какве могућности пружа. Последња секција овог поглавља представља анализу термалне слике, уз анализу шума који се јавља на конкретној анализираној секвенци и представља важан корак у постављању почетног модела потребног у даљем развоју алгоритма за праћење покретног објекта.

Треће поглавље посвећено је теми обраде слика. Најпре су изложене основе обраде слике, односно шта слика представља, на који начин се могу обрађивати и испитивати информације које се добијају са слике и која су то ограничења која рачунари имају у погледу обраде слика. У овом делу је дат приказ различитих сегмената обраде слике (попут претпроцесирања слике), а објашњен је и ток обраде података у системима за обраду слике. Друга целина овог поглавља даје најпре детаљнији опис алгоритама који се базирају на опису одлика на слици и начинима на који се те одлике могу третирати. Дата је и упоредна анализа осетљивости детектора одлика на термалној слици, на основу које се могу донети закључци о томе на који начин се детектори из различитих фамилија могу користити на термалној слици. Као дескриптор одлика, за задатак праћења у овом раду, је одабран СУРФ дескриптор, а теоријски приступ је описан као део ове секције.

У четвртом поглављу је описан детаљно задатак праћења објеката на термалној слици. Најпре је описан проблем праћења објеката и изазови са којима се сусрећемо приликом дизајна система за праћење. Као саставни део разматрања проблема праћења објеката јесте и тема обраде видео сигнала, па је дат теоријски и практични осврт на услове и ограничења квалитета видео сигнала који се обрађује у системима за праћење. Следећа целина овог поглавља се односи на анализу рада савремених алгоритама за праћење, као и њихову поделу. Као одабрани алгоритам за праћење је усвојен алгоритам са СУРФ детектором и дескриптором, па је изложена методологија рада са СУРФ дескриптором. У оквиру ове целине је представљен начин за анализу грешке посматраног алгоритма, коришћењем техника естимације густине вероватноће, а затим је дата и статистичка анализа добијених података. Извршена је основна подела узрока грешака код СУРФ алгоритма. На крају је извршена систематска анализа грешака и предлог за њихово отклањање. Ово поглавље је изузетно важно јер, на основу статистичке анализе и систематског приступа класификацији грешака, даје увид у начине за побољшање рада система, а водећи рачуна о балансу између некада опречних захтева система.

Пето поглавље представља теоријски осврт на теорију естимације стања стохастичких система у пет целина: линеарна естимација и робусна естимација стања стохастичких система, робусни естиматори стања, адаптивни робусни естиматори стања и процена контаминације аутлајерима. Најпре је дат теоријски осврт на линеарну естимацију, где је изложен и начин дизајна стандардног Калмановог филтра, као представника класичне теорије естимације, па су

и анализирана ограничења код линеарних система и естиматора. У склопу ове целине објашњена су ограничења класичних метода, као и појам аутлајера. Секција робусне естимације даје увид у развој теорије робусне естимације, као и њене основне приступе. Затим су описани начини за дизајн робусних естиматора који су описани и коришћени у овом раду, а затим и начин за адаптивну робусну естимацију. На крају је дат теоријски осврт на процену контаминације аутлајерима, као и начин за адаптацију процене контаминације условима сцене уз помоћ адаптивног фактора заборављања.

Шесто поглавље даје приказ експерименталних резултата, као и целокупан поступак дизајна различитих типова естиматора. Најпре је описан начин за постављање модела стандардног Калмановог филтра, као и његова ограничења. Затим је изложено решење проблема класичних метода комбиновањем две врсте алгоритама за праћење, уз анализу недостатака овакве методе. У следећој секцији је показано да је робусни Калманов филтар у стању да се избори са проблемима које стандардни Калманов филтар није био у могућности да превазиђе. Међутим, ради постизања оптималног баланса између опречних захтева система, потребно је стално прилагођавати естиматор тренутној ситуацији. Решење тог проблема иде у два правца, где је један правац дизајн експертског система, који на основу тренутних параметара сцене мења коришћену функцију утицаја робусног Калмановог филтра, а други правац је адаптација променљивог параметра функције утицаја на основу процењене контаминације грешкама типа аутлајера, а оба приступа су описана у овом поглављу. Још једно побољшање рада алгорита за праћење је описано у секцији која описује начин рада адаптивног робусног филтра са променљивим параметрима. На крају овог поглавља је дат експериментални приказ резултата процене фактора контаминације аутлајерима, уз резултате примене адаптивног фактора заборављања ради постизања процене која се више прилагођава условима на сцени.

Последње, седмо поглавље представља закључак где су сумирани резултати рада, дат је преглед шта је све истраживање обухватило и наведени су добијени научни резултати, као и предлог за даља истраживања.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Праћење покретних објеката на сцени представља проблем који се дуго година изучава, поготово у домену визуелних камера. Ово је проблем који је још увек у фокусу научних истраживања, што доказују многа такмичења и конференције на ову тему који се сваке године организују са циљем да се постигну што боље перформансе и ефикасност алгоритама за праћење. Савремена технолошка достигнућа су омогућила све већу комерцијалну употребу термалних камера, а самим тим и популаризацију проблема праћења покретних објеката на термалној слици.

Проблем анализиран у овој дисертацији обухвата праћење једног покретног објекта на термалној слици. Савремени алгоритми за праћење објеката могу се поделити у две групе: на традиционалне методе и на методе базиране на дубоком учењу. Традиционалне методе такође се могу поделити у две групе: генеративне методе праћења (засноване на моделу циља) и дискриминативне методе (разликују објекат од позадине). Иако методе засноване на дубоком учењу јесу доста ефикасније од традиционалних метода, њихове главне мане јесу: потреба за великим скуповима података за обучавање мреже, као и неочекивани резултати у случају потпуно непознатог сценарија. Са друге стране, традиционалне дискриминативне методе су такође врло често коришћене за проблем праћења у термалном домену. Нису рачунски захтевне, што је свакако предност, али се сусрећу са свим проблемима са којима се боре и други алгоритми попут оклузија, спајања позадине, малог контраста и слично. Иако су веома

ефикасни код праћења, ови алгоритми могу дати и непредвидиве резултате уколико се на њихова ограничења не обрати додатна пажња.

Традиционални генеративни трекери комбинују неке методе машинског учења са ручно подешеним одликама за превазилажење проблематичних сценарија. Овакви трекери дају добре резултате, али њихов главни проблем јесте што нису робусни. За генералне задатке праћења, јако добро су се показали алгоритми који омогућавају да се објекат опише неком врстом дескриптора, попут СИФТ (енг. *Scale-Invariant Feature Transform*) или СУРФ (енг. *Speeded Up Robust Features*) дескриптора, који су врло популарни у домену праћења, јер су робусни на парцијалне оклузије, скалирање и ротације.

Анализом доступне литературе је уочено да добре резултате у праћењу објеката у термалном домену дају дескриптори одлика, поготово СУРФ дескриптор који је баш прилагођен проблему праћења у термалном домену. Међутим, због несавршености саме термалне слике, СУРФ дескриптора, али и присуства различитих оклузија у слици, мерења позиције објекта који се прати нису увек тачна и прецизна, па је потребно вршити предикцију и естимацију кретања објекта. Таква естимација подразумева коришћење неке врсте предиктора ради предикције позиције објекта од интереса због ситуација у којима СУРФ дескриптор не даје добре резултате.

Оригиналност теме се огледа најпре у томе што је формирана потпуно нова база података потребна за детаљну статистичку анализу грешке. Карактеристике ове базе су: довољна дужине трајања секвенце; различити типови сценарија карактеристични за праћење у термалном домену; целокупна секвенца је снимљена под истим условима сцене. Таква база података није до сада позната у литератури. Овако формирана база података даје могућност статистичке анализе грешке праћења СУРФ алгоритма, што такође није до сада виђено у литератури. Таквом анализом грешке се открива присуство типичних грешака које кваре перформансе система, а дешавају се у одређеним ситуацијама промене режима кретања (маневра), али и оних који утичу на потпуни губитак праћења објекта од интереса и представљају лоша мерења, такозване аутлајере (енг. *Outliers*) у подацима.

Статистичком анализом је показано да су најчешћи узрок престанка рада алгоритма за праћење аутлајери у подацима. Међутим, није лако унапред предвидети када ће се десити нити колику ће вредност имати. Због тога је, за проблем праћења покретног објекта на термалној слици, врло значајно било испитати природу грешке која се јавља у подацима. У случају појаве аутлајера у подацима коришћење линеарног естиматора попут стандардног Калман-овог филтра није добро решење, јер је осетљив на њих. Уколико се сам узрок појаве аутлајера, за дати случај испита, Калман-ов филтар се може унапредити и учинити робусним у случају њихове појаве, што свакако може дати решење које штеди процесорско време и даје боље перформансе система. Због тога је, у оквиру ове дисертације, додатни предмет истраживања анализа робусних естиматора и одабир погодног робусног естиматора за дати случај.

Оригиналност истраживања се огледа и у томе да је пројектован робусни систем за праћење покретног објекта на термалној слици који се прилагођава различитим условима сцене. Посебна пажња је усмерена на чињеницу да робусност на аутлајере долази са ценом која се плаћа смањењем ефикасности естиматора. Зато су у овој дисертацији описана решења која постижу баланс између робусности и ефикасности одабраног естиматора. Главна идеја је робустификација стандардног естиматора стања, Калмановог филтра, увођењем нелинеарних функција утицаја. Анализирани су ефекти различитих функција утицаја у разним режимима кретања и дизајн експертског система који се, у зависности од ситуације на сцени, прилагођава условима бирајући погодну функцију утицаја за тај случај. Са друге стране, још један оригинални допринос механизмима адаптације представља и коришћење подесивих параметара функција утицаја. Наиме, како функције утицаја садрже подесиве параметре који зависе од процењеног степена контаминације, односно вероватноће и варијансе присутних аутлајера, они се могу прилагодити условима сцене у зависности од података које имамо на располагању и на тај начин се може постићи компромис између опречних захтева изражених кроз робусност и ефикасност.

Оригиналност овог истраживања се огледа и у томе да очекивана решења описују нови приступ дизајну алгоритма за праћење који је обогачен способношћу адаптације на тренутне услове на сцени. Таква адаптација је базирана на закључцима изведеним из анализе грешке праћења покретног објекта на термалној слици, на начин који до сада није познат у литератури. Дакле, статистичка анализа грешке даје увид у карактеристике типичних грешака и ситуација у којима се оне јављају, а коришћењем тих информација у пројектовању робусног естиматора се постиже баланс између робусности и ефикасности естиматора, као и раздвајање два различита типа грешке.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У оквиру ове докторске дисертације наведено је 104 референце из следећих области: дигитална обрада слике, праћење покретних објеката, праћење објеката у термалном домену, карактеристике термалне слике, робусна естимација, робусни и адаптивни филтри, статистичка анализа. Списак литературе указује на то да је кандидаткиња извршила детаљну анализу постојеће литературе, као и предности и мана савремених алгоритама који се баве истом проблематиком. Наведене су референце из свих врста ремираних часописа, актуелних такмичења на светском нивоу, зборника и уџбеника. Листа укључује и радове које је кандидат објавио, а директно су проистекли из рада на дисертацији.

Најпре се пошло од савремених достигнућа у области праћења објеката на термалној слици, као што су такмичења и зборници радова са најпознатијих светских такмичења у овој области. Добри представници ових референци су М. Felsberg, „The thermal infrared visual object tracking VOT-TIR2015 challenge results,“ у *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision Workshops*, 2015, М. Felsberg et al. (2016) , „The Thermal Infrared Visual Object Tracking VOT-TIR2016 Challenge Results. In: Hua G., Jégou H. (eds),“ у *Computer Vision – ECCV 2016 Workshops. ECCV 2016. Lecture Notes in Computer Science*, Springer, 2016, p. vol 9914, М. Kristan et al., „The seventh visual object tracking vot2019 challenge results,“ у *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshops*, 2019.

Затим су ту и радови где се анализирају појединачни алгоритми праћења који, по литератури дају најбоље резултате за задатак који се дисертацијом истражује, како би се дао критички осврт на савремене алгоритме. Међу оваквим радовима издвајамо следеће: Q. Liu, X. Lu, Z. He, C. Zhang i W. Chen, „Deep convolutional neural networks for thermal infrared object tracking,“ *Knowledge-Based Systems*, t. 134, pp. 189-198, 2017 и X. Li, Q. Liu, N. Fan, Z. He i H. Wang, „Hierarchical spatial-aware siamese network for thermal infrared object tracking,“ *Knowledge-Based Systems*, t. 166, pp. 71-81, 2019.

У циљу представљања оправданости избора основног алгоритма за праћење (СУРФ алгоритма) показани су резултати компарације различитих дескриптора одлика, као и радови који се односе на одабрани алгоритам (Y. Hongpeng, P. Chao, C. Yi i F. Qu, „A robust object tracking algorithm based on surf and kalman filter,“ *Intelligent Automation & Soft Computing*, t. 19(4), pp. 567-579, 2013. и D. Hu i J. Nan, „Research on target tracking based on improved SURF algorithm and Kalman prediction,“ у *First International Workshop on Pattern Recognition, International Society for Optics and Photonics*, 2016.), његово коришћење, предности и мане (E. Oyallon i J. Rabin, „An Analysis of the SURF Method,“ *Image Processing On Line*, t. 5, pp. 176-218, 2015). Веома важна литература је приложена из области термалне визије (Т. Sjaardema, S. Collin i G. Birch, „History and evolution of the Johnson criteria,“ SANDIA Report, 2015, R. Gade i T. B. Moeslund, „Thermal Cameras and Applications: A Survey,“ *Machine Vision and Applications*, t. 25(1), pp. 245-262, 2014.), како би се на што бољи начин приступило фамилијаризацији са посебним карактеристикама оваквих слика.

Целокупна проблематика компјутерске визије, обраде и фаза процесирања слике је објашњена уз помоћ уџбеника из тих области, као и радова на исту тему. Дobar представник такве литературе је: М. Sonka, V. Hlavac i R. Boyle, *Image processing, analysis, and machine vision*, Cengage Learning, 2014. Статистичка анализа података која се врши у дисертацији је

формирана на основу релевантне литературе из те области и међу њима има наслова који су старијег датума али и данас представљају базичне референце, као што је на пример: E. Parzen, „On estimation of a probability density function and mode,“ *The annals of mathematical statistics*, t. 33(3), pp. 1065-1076, 1962. Из области робусне естимације, теорије робусне статистике, робусног и адаптивног Калмановог филтра коришћени су бројни уџбеници и радови. Међу њима, такође, има незаобилазних наслова из шеседесетих и седамдесетих година прошлог века, као што је P. J. Huber, „Robust Estimation of a Location Parameter,“ *The Annals of Mathematical Statistics*, pp. 73-101, 1964, али и новије датума какав је уџбеник аутора R. Maronna, R. Douglas Martin i V. Yohai, *Robust Statistics: Theory and Methods*, John Wiley & Sons, Ltd., 2006.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Током истраживања у оквиру рада на докторској дисертацији, коришћене су методе анализе, синтезе, спецификације и генерализације. Конкретне појединости о појединим фазама истраживања и научним методама којима су оне реализоване, дате су у следећим пасусима.

Почетна фаза рада на дисертацији односи се на систематску анализу доступних алгоритама за решење проблема праћења покретног објекта на термалној слици. Током анализе је извршена подела различитих метода за праћење, изнете су њихове предности и недостаци. Веома битан део ове фазе је подразумевао и систематску анализу јавно доступних база са секвенцама за праћење, са освртом на њихове карактеристике у смислу дужине трајања секвенце, присуства ситуација које представљају изазове у праћењу објеката и услова снимања, а ради тестирања рада алгорита за праћење.

Следећа фаза истраживања представља анализу одабраног СУРФ алгорита за праћење. Нова база података је формирана за потребе ове дисертације, како би се на адекватан начин могла извршити анализа одабраног алгорита. Та нова база података је омогућила детаљну статистичку анализу грешке одабраног алгорита за праћење и представља основу, како за развој тако и евалуацију описаних робусних алгоритама.

Трећа фаза истраживања се односи на анализу робусних естиматора. Током ове анализе су испитани различити модели робусних естиматора, и одабрана су решења која се могу успешно применити у решавању испитиваног проблема. При томе су решења одабрана на начин да се постигне главни циљ, а то је постизање баланса између робусности и ефикасности естиматора на начин да се естиматор може прилагодити тренутним условима сцене .

Четврта фаза представља примену научне методе синтезе, а у овој докторској дисертацији је то бити дизајн робусног система за праћење на бази СУРФ алгорита и робусног Калмановог филтра који се прилагођава условима сцене. У овој фази истраживања је извршена синтеза претходних истраживања и добијених резултата, на основу којих је било могуће дизајнирати коначне предлоге система. Такође, ова фаза подразумевала је експериментално тестирање предложеног решења у различитим условима. У том смислу је извршена генерализација добијених резултата са аспекта препознавања ограничења у примењивости развијених техника.

3.4. Применљивост остварених резултата

Истраживања која су спроведена у овој дисертацији показују да се резултати праћења покретних објеката значајно могу побољшати коришћењем робусних и адаптивних естиматора, уз одабрани основни алгоритам праћења. Детаљна статистичка анализа грешке праћења одабраног алгорита, на начин који је описан у оквиру ове дисертације, омогућила је добијање резултата који се могу искористити у оквиру решавања конкретног проблема који се изучава, ради добијања бољих перформанси система за праћење. Додатно, база података која је формирана у оквиру рада на овој дисертацији, као и њена статистичка анализа, може бити од велике помоћи приликом побољшања рада различитих врста алгоритама за праћење који се

већ користе у системима за надзор. Робусни алгоритам за праћење, дизајниран на начин описан у овој дисертацији, омогућава прилагођење условима сцене, као и постизање баланса између робусности и ефикасности естиматора. Томе у прилог говоре и експерименти који су спроведени на великом броју секвенци: на новој бази података, као и на већ постојећим базама података. Добијени резултати су упоређени са резултатима савремених алгоритама за праћење и на тај начин је демонстрирано побољшање које је постигнуто коришћењем приступа који се базира на робусној естимацији. Како је приступ анализе грешке и формирања естиматора детаљно објашњен у овој дисертацији, дизајнирани системи се могу, уз додатна подешавања, применити и на проблеме праћења који се не односе само на праћење пешака. Практичност овог решења се огледа у томе што је статистичка анализа грешке дала увид у типичне ситуације које доводе до лошег рада алгоритама за праћење, док је робусни алгоритам за праћење могуће прилагодити различитим условима, који се могу јавити у практичним апликацијама и системима за надзор и надгледање.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

На основу прегледане дисертације Комисија процењује да је кандидат Наташа Влаховић у потпуности показала релевантне способности потребне за научно-истраживачки рад. Најпре је показана способност да, уз систематични преглед постојеће научне литературе, уочи практичне проблеме постојећих метода, као и простор за побољшање перформанси описаних система. Обављањем активности попут уочавања недостатака постојећих база података, формирања нове базе, као и статистичке анализе грешке одабраног алгорита се показала систематичност у раду кандидата. Такође, креативност и упорност кандидата се огледају у коришћењу постојећих техника робусне естимације приликом дизајна потпуно новог приступа праћењу објеката који одговара потребама савремених система за праћење, а то су свакако могућности прилагођења условима сцене. Кандидат је показао способност да увиди актуелност проблема који се изучава, и да прошири област примене већ постојећих техника робусне естимације, ради отклањања недостатака савремених алгоритама, чиме је показана зрелост у раду. Оригиналност идеје и научни доприноси описани у овој дисертацији потврђују способност кандидата за самостални научни рад. У прилог поменутом је и чињеница да је кандидат аутор низа научних радова који су резултат рада на дисертацији.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Током рада на дисертацији, кандидаткиња је остварила значајне научне доприносе:

- (1) Истраживањем постојеће литературе и савремених алгоритама за праћење покретног објекта на термалној сцени омогућен је шири увид у област праћења покретних објеката. На тај начин су уочени недостаци савремених алгоритама, као и метода за њихово тестирање.
- (2) Извршена је анализа осетљивости различитих дескриптора одлика, ради одабира дескриптора који даје најбоље резултате у области праћења у термалном домену. На основу ове анализе је и одабран СУРФ алгоритам, као основа за праћење у термалном домену.
- (3) Формирана је нова база података за потребе статистичке анализе проблема праћења једног покретног објекта на термалној слици, која поседује следеће карактеристике: довољне је дужине да би задовољила врло строге критеријуме статистичког

закључивања; довољно је богата различитим врстама сценарија кретања покретног објекта; све врсте сценарија су снимљене под истим условима сцене;

- (4) Извршена је статистичка анализа података са термалне камере и грешке одабраног СУРФ алгоритма за праћење. Ова анализа је дала одговоре на питања каква је врста расподеле грешке естимације, у којој мери је оправдана декорелација по појединим правцима у простору, у којој мери је нестационарност изражена и да ли се промене статистика или динамике корелације могу занемарити уколико се тип сценарија кретања објекта не мења;
- (5) Извршена је детаљна анализа сценарија који доводе до грешке система за праћење. На тај начин се стиче увид у основне типове грешке, и начин на који утичу на перформансу система за праћење.
- (6) У циљу добијања решења које се може прилагодити различитим условима сцене и различитим сценаријима, испитан је рад више врста робусних естиматора. На тај начин је дат увид у ефикасност испитиваних решења и дат је предлог дизајна је експертског система који има способност промене функције утицаја у зависности од ситуације на сцени.
- (7) Дизајниран је нов робусни систем за праћење покретних објеката на термалној слици који обезбеђује добар компромис између ефикасности праћења и робусности на лоша мерења у секвенци, а који истовремено током рада алгоритма врши процену тренутне контаминације аутлајерима и аутоматски подешава параметре функције утицаја која је задужена за тај компромис.
- (8) Дата је детаљна експериментална анализа перформансе предложених решења, на различитим врстама расположивих података. Експерименти су дали увид у прилагодљивост решења различитим ситуацијама, а приказана је и предност у односу на савремене алгоритме.

Решења предложена у овој дисертацији описују нови приступ дизајну алгоритма за праћење са СУРФ дескриптором, који није до сада познат у литератури, јер недостатке СУРФ дескриптора отклања уз помоћ робусног Калман-овог филтра, а не додатним поправкама самог дескриптора који прати објекат од интереса.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Сагледавањем постављених хипотеза, циљева истраживања и остварених резултата Комисија може са задовољством да констатује да је кандидаткиња успешно одговорила на сва релевантна питања у циљу решавања проблема дефинисаног циљем истраживања. Набројани научни доприноси су важни за област праћења покретних објеката као и за области термовизије и дигиталне обраде слике. Фокус истраживања у оквиру ове дисертације био је дизајн робусног алгоритма за праћење на термалној слици и то на начин да се постигне баланс између робусности и ефикасности естиматора. Кандидаткиња је показала систематичан приступ анализи доступне литературе и дала критички осврт на на рад различитих алгоритама за праћење, као и више врста дескриптора одлика. Уочени су недостаци постојећих база података, па је формирање нове базе података за потребе дисертације њена детаљна статистичка анализа значајан допринос. Коришћењем теорије робусне естимације је проширен опсег употребе оваквог типа естиматора на начин да се могу користити за савремене задатке праћења. Испитан је рад више врста робусних естиматора и предложена су решења која дају најбоље резултате у циљу прилагођења условима на сцени који се мењају, али и балансу између робусности и ефикасности. Сви резултати су и експериментално потврђени низом различитих врста експеримената. Представљени доприноси су верификовани објављивањем резултата у престижном часопису од међународног значаја, као у часописима од националног значаја и на конференцијама од међународног и националног значаја.

4.3. Верификација научних доприноса

Научни доприноси су верификовани следећим радовима:

Категорија M22:

1. **Vlahović N.**, Đurović Ž.: Robust tracking of moving objects using thermal camera and speeded up robust features descriptor, - *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, vol. 35, no. 4, pp. 549-566, 2021. (IF: 3.637) (DOI:10.1002/acs.3212)

Категорија M33:

1. Stojanović M., **Vlahović N.**, Stanković M. and Stanković S.: Object Tracking in Thermal Imaging using Kernelized Correlation Filters – *Proceedings of 17th International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH)*, pp.1-6, 2018. (DOI: 10.1109/INFOTEH.2018.8345549)
2. **Vlahović N.**, Đurović Ž.: Object Tracking in Thermal Image with SURF, KLT Feature Tracker and Kalman Filter, - *Proceedings of Papers – 5th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN 2018)*, Palić, Serbia, pp. 629-633, 2018. (ISBN 978-86-7466-752-1)
3. Pavlović R., **Vlahović N.** and Petrović V., Comparative Analysis of Feature Descriptor Algorithms in Multisensor Systems, *Proceedings of Papers – 5th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN 2018)*, Palić, Serbia, pp.772-776, 2018. (ISBN 978-86-7466-752-1)
4. **Vlahović N.**, Stojanović M., Tomić Lj., Mišković K., Stojanović B., Thermal Image Noise Reduction Post-procesiong techniques, *Proceedings of 8th International Scientific Conference on Defensive Technologies OTEH*, Beograd, 2018.
5. **Vlahović N.**, Pavlović R., UAV tracking on fused thermal and color image, *Proceedings of 8th International Scientific Conference on Defensive Technologies OTEH*, Beograd, 2018.
6. Stojanović M., **Vlahović N.**, Stanković M., Stanković S., Deep Features in Correlation Filters for Thermal Image Tracking, *Proceedings of 14th Symposium on Neural Networks and Applications (NEUREL)*, pp. 1-6, 2018. (ISBN: 978-1-5386-6974-7)
7. **Vlahović N.**, Đurović Ž., Robust Object Tracking based on SURF in Thermal Images, - *Proceedings of Papers – 6th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN 2019)*, Srebrno jezero, Serbia, pp. 142-147, 2019. (ISBN: ISBN 978-86-7466-785-9)

Категорија M51:

1. **Vlahović N.**, Graovac S., Sensibility analysis of object tracking algorithms in thermal images, *Scientific Technical Review*, vol. 67, no. 1, pp.13-20, 2017. (DOI: 10.5937/STR1701013V)

Категорија M63:

1. **Vlahović N.**, Barbarić Ž., Tomić Lj., Tomić P., Analiza šuma na termalnoj slici scene, - *Zbornik 61. Konferencije za elektroniku, telekomunikacije, računarstvo automatiku i nuklearnu tehniku*, (ETRAN 2017), Kladovo, Srbija, pp. EK 1.2-1.5, 2017. (ISBN 978-86-7466-692-0)

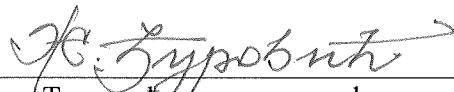
5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Током писања овог извештаја Комисија је узела у обзир све релевантне чињенице које формирају коначну слику о докторској дисертацији. Докторска дисертација кандидаткиње Наташе Влаховић под називом „Робусно праћење покретних објеката на термалној слици“ је у целини написана у складу са образложењем које је наведено у пријави теме и испуњава све законске, формалне и суштинске услове и критеријуме који се примењују приликом вредновања докторске дисертације. Научни доприноси, иновативни приступ дизајну робусних естиматора за праћење објеката на термалној слици сцене, као и примењивост добијених резултата у реалним системима за надзор показују зрелост кандидата и способност за самосталан научно-истраживачки рад. Комисија је мишљења да докторска дисертација садржи оригиналне научне доприносе са доказаном практичном применљивошћу у области Управљања системима и обраде сигнала, конкретно дигиталне обраде слике и праћења покретних објеката на термалној слици.

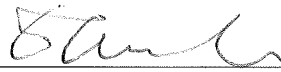
Комисија са задовољством предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да се докторска дисертација кандидаткиње Наташе Влаховић, под називом „Робусно праћење покретних објеката на термалној слици“ прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

У Београду,
Дана 03.11.2021.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



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



др Бранко Ковачевић, професор емеритус
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Зоран Бањац, научни сарадник
Институт Влатаком