

ВЕЋУ ДОКТОРСКИХ СТУДИЈА

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Вељка М. Марковића

Одлуком бр. 229/2 од 11.02.2021. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Вељка М. Марковића под насловом

ПРЕПОЗНАВАЊЕ ГЕОМЕТРИЈСКИХ ПРИМИТИВА ИЗ ТРОДИМЕНЗИОНАЛНОГ ОБЛАКА ТАЧАКА

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

Кандидат Вељко Марковић уписао је Докторске академске студије (ДАС) на Машинском факултету Универзитета у Београду 2013/14. школске године. Другу годину ДАС уписао је први пут 2014/15. школске године, а затим је ову годину 2015/16. школске године обновио. Кандидат је испите из свих предмета предвиђених планом и програмом ДАС положио са просечном оценом 9,97. Трећу годину ДАС уписује школске 2016/17. године и обнавља је 2017/18, 2018/19, а као студент који је у радном односу након позитивног решавања одговарајуће молбе 2019/20. и 2020/21. добија продужен статус студента.

Кандидат је 25.04.2017. године поднео захтев број 921/1 да му се одобри израда докторске дисертације са темом „Препознавање геометријских примитива из тродимензионалног облака тачака“ под менторством др Живане Јаковљевић, ванредног професора на који је сагласност дала Катедра за производно машинство. Одлуком Наставно-научног већа Машинског факултета Универзитета у Београду бр. 921/3 од 22.06.2017. Вељку Марковићу, маг. инж. маш. прихвата се тема докторске дисертације „Препознавање геометријских примитива из тродимензионалног облака тачака“, именује се ментор др Живана Јаковљевић, ванредни професор и именује се Комисија за подношење реферата о теми докторске дисертације у саставу:

- др Живана Јаковљевић (ментор), ванредни професор Машинског факултета Универзитета у Београду
- др Бојан Бабић, редовни професор Машинског факултета Универзитета у Београду
- др Зоран Миљковић, редовни професор Машинског факултета Универзитета у Београду

- др Радован Пузовић, редовни професор Машинског факултета Универзитета у Београду
- др Игор Будак, ванредни професор Факултета техничких наука у Новом Саду

На основу извештаја наведене комисије бр. 921/4 од 07.07.2017, Наставно-научно веће Машинског факултета Универзитета у Београду 13.07.2017. године доноси Одлуку бр. 921/5 да се прихвата научна заснованост теме докторске дисертације и констатује да студент Вељко Марковић испуњава услове за израду докторске дисертације: „Препознавање геометријских примитива из тродимензионалног облака тачака“, а за ментора се именује др Живана Јаковљевић, ванредни професор. Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду 28.08.2017. године доноси Одлуку бр. 61206-3094/2-17 да се даје саласност на предлог теме докторске дисертације Вељка Марковића под називом „Препознавање геометријских примитива из тродимензионалног облака тачака“.

На основу обавештења др Живане Јаковљевић, редовног професора да је кандидат Вељко М. Марковић завршио докторску дисертацију као и предлога Катедре за производно машинство, Наставно-научно веће Машинског факултета Универзитета у Београду 11.02.2021. године доноси Одлуку бр. 229/2 о именовану Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације у саставу:

- др Живана Јаковљевић (ментор), редовни професор Машинског факултета Универзитета у Београду
- др Бојан Бабић, редовни професор Машинског факултета Универзитета у Београду
- др Зоран Миљковић, редовни професор Машинског факултета Универзитета у Београду
- др Саша Живановић, редовни професор Машинског факултета Универзитета у Београду
- др Игор Будак, редовни професор Факултета техничких наука у Новом Саду

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација Вељка М. Марковића под називом „Препознавање геометријских примитива из тродимензионалног облака тачака” припада научној области Машинско инжењерство – ужа научна област Производно машинство за коју је Универзитет у Београду – Машински факултет матичан. Дисертација је рађена под менторством проф. др Живане Б. Јаковљевић која у протеклих 10 година има објављених 13 радова категорије М23-М21а из уже научне области Производно машинство.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Вељко М. Марковић рођен је 16.06.1988. у Ћуприји, Република Србија. Основну школу „13. октобар“ у Ћуприји завршио је са одличним успехом и као носилац дипломе „Вук Караџић“. Средњу техничку школу у Ћуприји завршио је са одличним успехом и запаженим резултатима са стручних такмичења као ђак генерације.

Школске 2007/2008. уписао је Основне академске студије (B.Sc.) на Машинском факултету у Београду које је завршио 2010. године са просечном оценом 9,54. Дипломске академске студије (M.Sc.) на Катедри за производно машинство Машинског факултета Универзитета у Београду уписао је школске 2010/2011, а завршио их је 2012. године са просечном оценом 9,95. Дипломски (M.Sc.) рад на тему „Аутономни мобилни робот за кретање у 2Д простору – Морфолошка варијанта базирана на диференцијалној актуацији“ – ментор проф. др Петар Б. Петровић одбранио је са оценом 10. Током студија на Машинском факултету више пута је

награђиван за одличан успех поводом Дана Факултета. Такође, двоструки је носилац стипендије „Доситеја“ Фонда за младе таленте Републике Србије, као и стипендија Министарства просвете.

Докторске академске студије уписује школске 2013/2014. године где полаже све испите предвиђене програмом усавршавања. На основу научно-истраживачког рада током Докторских академски студија као аутор или коаутор објавио је пред широм научном и стручном јавношћу 10 радова и то 2 рада у међународним часописима (1 категорије M23 и 1 категорије M24), 1 рад у часопису националног значаја – категорија M52 као и 4 рада који су представљени на међународним и 3 на домаћим скуповима. Као студент Докторских академских студија, школске 2013/14. и 2014/15. године учествовао је у извођењу вежби из предмета Компјутерска графика на Основним академским студијама на Машинском факултету Универзитета у Београду. При студентском вредновању педагошког рада наставника у летњем семестру школске 2013/14. године остварио је оцену 4,61 од 5,00.

Вељко Марковић поседује вишегодишње радно искуство. Од 2012. године до 2013. године био је запослен у предузећу за пројектовање и производњу медицинске опреме „Висарис“ у Земуну где је био задужен за процесе пројектовања радиографских уређаја и додатне опреме. Након краће паузе, 2014. године поново се враћа у исту компанију на радно место руководиоца машинског сектора развоја медицинских апарата. Почетком 2020. године као инжењер за подршку серијској производњи запошљава се у компанији „ZF“ у Панчеву где и данас ради.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација студента докторских студија Вељка Марковића под насловом: Препознавање геометријских примитива из тродимензионалног облака тачака представљена је на 130 страна А4 формата, писана је коришћењем *Times New Roman* фонта величине 12pt са једностраним проредом. Садржи 65 слика, 28 табела и 50 једначина, а структурирана је у следећих девет поглавља:

1. Увод
2. Реверзно инжењерство геометријских модела
3. Преглед постојећих метода за процесирање 3Д облака тачака
4. Структурирање облака тачака
5. Редукција броја тачака у оквиру 3Д облака
6. Препознавање једне класе површи другог реда из структурираних облака тачака
7. Препознавање цилиндара и равни из неструктурираних облака тачака
8. Оптимизација параметара алгоритама за препознавање геометријских примитива
9. Закључак

Поред тога, дисертација садржи и списак литературе са 153 литературних извора као и резиме на српском и енглеском језику, садржај, биографију аутора, Изјаву о ауторству, Изјаву о истоветности штапане и електронске верзије докторског рада и Изјаву о коришћењу.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У уводном поглављу наводе се предмет и циљеви истраживања докторске дисертације који се односе на развој метода за редукацију броја тачака из облака добијених тродимензионом дигитализацијом објеката уз истовремено задржавање информационог садржаја као и метода за препознавање геометријских примитива из ових облака. Узимајући у обзир тренутне потребе и стање у областима примене техника 3Д дигитализације као и савремене методе у областима обраде тродимензионалних сигнала, машинског учења и вештачке интелигенције наводе се три полазне хипотезе. На крају поглавља приказује се основна структура рада са кратким описом садржаја поглавља.

Друго поглавље односи се на анализу фаза реверзног инжењерства геометријских модела са посебним освртом на степен њихове аутоматизације. Анализирају се контактне и бескотактне технике за 3Д дигитализацију објеката као и специфичности облака тачака које оне генеришу. Коначно, даје се преглед примене техника 3Д дигитализације у машинском инжењерству, при чему је посебан акценат стављен на примену ових техника у управљању производним процесима.

Детаљна анализа постојећих метода за процесирање облака тачака дата је у поглављу 3. Ова анализа обухвата постојеће методе за редукацију броја тачака и методе за сегментацију и препознавање геометријских примитива. Анализирају се методе за редукацију облака тачака засноване на директној редукацији облака и редукацији положоналне мреже. Такође, врши се и детаљна анализа постојећих метода за сегментацију и препознавање геометријских примитива из облака тачака и то са и без претходне сегментације, као и на основу троугаоних мрежа добијених из облака тачака или директно из тачака облака.

У четвртом поглављу дефинише се алгоритам за структурирање неструктурираних облака тачака. Алгоритам је заснован на z бафер алгоритму који се примењује за креирање растерске слике у дијаграму тока компјутерске графике и репрезентацији троуглова у барицентричним координатама, а на улазу поред правца посматрања има и троугаону мрежу креирану над неструктурираним облаком тачака.

Оригинална метода за редукацију броја тачака из структурираних 3Д облака уз висок степен задржавања информационог садржаја која је развијена у оквиру дисертације приказана је у поглављу 5. Метода је заснована на ε -инсензитивној регресији носећим векторима која је укратко описана у овом поглављу. Поред детаљног описа, извршена је и анализа утицаја параметара методе на резултате редукације и дате су основне смернице за избор ових параметара у зависности од карактеристика облака чија се редукација врши. Посебно је анализиран утицај одабраног кернела на резултате редукације. Предложена метода је експериментално верификована и њене перформансе су илустроване коришћењем реалних облака тачака. Метода је упоређена са алтернативном методом при чему је за одређивање квантитативних критеријума за поређење коришћена апроксимација неуниформним рационалним Б сплајном.

Поглавље 6 приказује оригиналну методу за аутоматско препознавање једне класе површи другог реда (квадрика) из структурираних облака тачака која је развијена у оквиру ове докторске дисертације. Метода спада у методе засноване на расту региона и базирана је на карактеристикама информационе матрице добијене приликом регресије елипсе над тачкама скенираних линија у оквиру структурираних облака тачака. Као услов за раст региона током сегментације користи се блискост нули реципрочног фактора условљености наведене информационе матрице. Поред описа и псеудокода за имплементацију наведене методе, у поглављу су приказани и резултати њене експерименталне верификације на синтетизованим и реалним облацима тачака. Показано је да наведена метода даје резултате не само у препознавању (елиптичких) цилиндара, равни, елипсоида (сфера), већ и у препознавању

(елиптичких) торуза из структурираних облака тачака. Уз примену методе структурирања која је описана у поглављу 4, ова метода се може применити и на неструктуриране облаке.

Седмо поглавље односи се на оригиналну методу за препознавање цилиндара и равни као најзаступљенијих геометријских примитива у машинству директно из неструктурираних облака тачака. И ова метода је развијена у оквиру дисертације. Она представља екстраполацију методе описане у оквиру поглавља 6 на неструктуриране облаке тачака и такође се извршава без асистенције корисника. У оквиру поглавља дат је детаљан опис методе и псеудокодови алгоритма за њену реализацију. Верификација методе је извршена на неколико реалних облака тачака добијених скенирањем објеката, а извршена је и компаративна анализа са алтернативним методама из литературних извора.

Методе за препознавање геометријских примитива из облака тачака (како методе развијене у оквиру ове дисертације, тако и методе из литературних извора) захтевају подешавање значајног броја параметара који имају утицај на резултате класификације. Самим тим ручно подешавање ових параметара може значајно утицати на аутономност алгоритма за препознавање. Овим проблемом се бави осмо поглавље докторске дисертације у коме се излаже оригинална метода за естимацију прагова за препознавање квадрика из структурираних облака на основу карактеристика које се аутоматски екстрахују из самог облака. Метода је заснована на вештачким неуронским мрежама које као улазне параметре поред тачака са саме контуре користе и њену валовитост и средњу висину. Експериментална верификација је показала да прагови одређени аутоматски коришћењем методе развијене у оквиру ове дисертације дају боље резултате од прагова који су одређени ручно (хеуристички) у оквиру шестог поглавља.

У последњем поглављу сумирана су спроведена истраживања, развијене методе и њихови резултати. Изведени су закључци који се односе на резултате истраживања, карактеристике развијених метода и могућности њихове практичне примене. Предложени су и могући правци даљих истраживања у предметној области.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Докторска дисертација кандидата Вељка Марковића под називом: „Препознавање геометријских примитива из тродимензионалног облака тачака“ представља савремен и оригиналан научни рад у области анализе 3Д облака тачака. У оквиру дисертације развијене су четири оригиналне методе и то оригинална метода за редукацију броја тачака из 3Д облака тачака уз задржавање високог степена информационог садржаја, две оригиналне методе за аутономно препознавање геометријских примитива из структурираних и неструктурираних облака тачака као и оригинална метода за естимацију параметра алгоритма за препознавање заснована на вештачким неуронским мрежама. Захваљујући својој аутономности, развијене методе представљају значајан прилог решавању једног од најактуелнијих проблема у прозводном машинству – аутономно управљање производним процесима на основу информација добијених тродимензионалним скенирањем објеката.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Током израде докторске дисертације коришћени су референтни и актуелни литературни извори из релевантних области и то пре свега радови из научних часописа и са међународних конференција, као и одговарајућа монографска литература. Детаљно су анализирани

литературни извори из области аквизиције и редукције 3Д облака тачака, препознавања геометријских примитива из њих, регресионе анализе кривих и површи другог реда, машинског учења итд. Они су послужили не само као подлога за опсежан преглед истраживања у области процесирања 3Д облака тачака који је дат у другом и трећем поглављу дисертације, већ и као основа за развој нових метода. О актуелности коришћене литературе говори и чињеница да је већина наведених радова публикована у претходних десет година, а поред радова из врхунских међународних часописа, анализирани су и радови објављени на водећим светским конференцијама како би у обзир била узета и најновија истраживања у области. Потребно је нагласити и да су током израде рада коришћени и репозиторијуми облака тачака и одређених кодова (пре свега за упоређивање резултата алтернативних метода) са водећих светских институција које се баве решавањем предметних проблема.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У току израде докторске дисертације коришћене су следеће актуелне научне методе:

1. Методе машинског учења засноване на статистичкој теорији учења (пре свега машине са носећим векторима и различите методе кластеровања),
2. Методе машинског учења засноване на вештачким неуронским мрежама,
3. Статистичке методе за регресиону анализу базиране на полиномалној регресији посебно прилагођене појединим геометријским облицима,
4. Статистичке методе за естимацију параметара математичког модела из података,
5. Методе компјутерске графике: геометријска репрезентација тродимензионалних објеката и креирање растеризоване слике,
6. Методе аналитичке геометрије,
7. Методе за тродимензионалну дигитализацију објеката

које су током истраживања примењене на адекватан начин. Резултати истраживања су експериментално верификовани коришћењем облака тачака добијених скенирањем реалних објеката, али и вештачки генерисаних облака тачака.

3.4. Применљивост остварених резултата

Управљање производним процесима (управљање процесима заваривања, хватања делова, позиционирања делова на машини алатки, навигација мобилних робота, контрола квалитета производа...) на основу информација добијених из 3Д облака тачака представља изузетно актуелну истраживачку област. Нажалост, тренутно стање је такво да је примена ових техника у индустријским условима спорадична из више разлога међу којима се издвајају неаутономност и осетљивост алгоритама за препознавање геометријских примитива на разне поремећаје, као и превелико прорачунско оптерећење изазвано пре свега количином тачака у оквиру облака. Методе предложене у оквиру ове докторске дисертације представљају прилог решавању управо ова два проблема. Развијена метода за редукцију броја тачака омогућује висок степен смањења броја тачака уз истовремено задржавање информације о геометрији објекта што даље доводи до значајног умањења прорачунског оптерећења уз задржавање квалитета резултата у наредним фазама обраде 3Д сигнала. Метода за препознавање геометријских примитива, с друге стране, показује добру способност аутоматског препознавања разматраних геометријских форми и може се применити у управљању различитих процеса у производним системима у неструктурираном радном окружењу.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Током израде докторске дисертације кандидат Вељко Марковић (који је током студија запослен у привреди) је показао посебну заинтересованост и афинитет за научно-истраживачки рад као и способност не само да самостално овладава научним методама користећи релевантне литературне изворе већ и да самостално препозна и решава проблеме, што представља основу за успешан будући научно-истраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

У оквиру докторске дисертације: „Препознавање геометријских примитива из тродимензионалног облака тачака“ кандидата Вељка М. Марковића остварен је научни допринос кроз развој следећих оригиналних метода и пратећих алгоритама:

1. Метода за редукцију броја тачака у оквиру 3Д облака тачака уз истовремено задржавање информационог садржаја (поглавље 5 дисертације, верификовано у раду наведеним под [1] у одељку 4.3 реферата)
2. Методе за аутономно препознавање и параметарску репрезентацију површи другог реда из структурираних 3Д облака тачака (поглавља 6 и 8 дисертације, чије су поједине фазе током развоја верификоване у радовима наведеним под [2, 6, 7, 9, 10] у одељку 4.3 реферата)
3. Методе за аутономно препознавање и параметарску репрезентацију површи другог реда из неструктурираних 3Д облака тачака (поглавље 7 дисертације, прелиминарни резултати су публиковани у радовима наведеним под [3-5, 7, 8] у одељку 4.3 реферата, а део резултата ће бити публикован у наредном периоду).

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

На основу прегледа референтне литературе у области као и компаративне анализе предложених метода са алтернативним методама из референтних литературних извора која је изложена у оквиру дисертације, констатујемо да су резултати истраживања спроведених у оквиру ове докторске дисертације значајни и научно утемељени. Предложена метода редукције броја тачака кроз препознавање тачака у областима значајне локалне промене геометрије води ка њиховој адаптивној елиминацији која обезбеђује висок степен редукције броја тачака уз истовремено задржавање информације о геометрији објекта. Поред тога, оригинална метода за препознавање геометријских примитива показала је релевантно унапређење броја препознатих примитива из облака тачака у односу на референтне методе из литературних извора што значајно утиче на робусност система за аутономно препознавање геометријских примитива из облака тачака. Коначно, оригинални приступ за естимацију параметара алгорита за препознавање геометријских примитива заснован на вештачким неуронским мрежама показује велики потенцијал и за примену у другим областима имајући у виду значај одабира параметара, пре свега прагова, у великом броју алгоритама за решавање различитих проблема.

4.3. Верификација научних доприноса

Научни доприноси наведени у тачки 4.1. верификовани су радом категорије M23 чији је Вељко М. Марковић први аутор и једини аутор без доктората:

Рад у међународном часопису (M23)

- [1] **Markovic, V.**, Jakovljevic, Z., Miljkovic, Z., *Feature sensitive three-dimensional point cloud simplification using support vector regression*, Tehnicki Vjesnik, Vol. 26, No. 4, pp. 985-994, 2019, ISSN: 1330-3651, DOI: 10.17559/TV-20180328175336 (M23, IF(2019): 0.670, 80/91)

као и следећим радовима:

Рад у часопису међународног значаја верификованом посебном одлуком (M24)

- [2] **Marković V.**, Jakovljević Ž., *Recognition of one class of surfaces from structured point clouds*, FME Transactions, Vol. 45, No. 4, pp. 481-490, 2017. DOI: 10.5937/fmet1704481M

Саопштење са међународног скупа штампано у целини (M33)

- [3] Jakovljevic, Z., **Markovic, V.**, Puzovic, R., Majstorovic, V., *Recognition of one class of quadrics from 3D point clouds*, 49th CIRP Conference on Manufacturing Systems (CIRP-CMS 2016), Stuttgart, Germany, 25-27, 2016. Procedia CIRP, Vol. 57C, pp. 292-297, 2016, ISSN 2212-8271 doi: 10.1016/j.procir.2016.11.051
- [4] Jakovljevic, Z., **Markovic, V.**, Zivanovic, S., *Recognition of quadrics from 3D point clouds generated by scanning of rotational parts*, Proceedings of 12th International Scientific Conference MMA 2015 – Flexible Technologies, Novi Sad, Serbia, 25-26 September, 2015, pp. 149-152, ISBN 978-86-7892-722-5
- [5] Jakovljevic, Z., **Markovic, V.**, *Recognition of one class of quadric surfaces from unstructured point cloud*, International Working Conference “Total Quality Management – Advanced and Intelligent Approaches”, Proceedings, Belgrade, Serbia, 2nd – 5th June, 2015, pp. 353-360, ISBN: 978-86-7083-858-1
- [6] Jakovljevic, Z., **Markovic, V.**, Miladinovic, M., *Recognition of elliptical segments in scanned lines*, International Scientific Conference ETIKUM, Novi Sad, 2014, pp. 19-22, ISBN 978-86-7892-616-7

Рад у часопису националног значаја (M52)

- [7] Jakovljevic, Z., **Markovic, V.**, Zivanovic, S. *Recognition of quadrics from 3D point clouds generated by scanning of rotational parts*, Journal of Production Engineering, Vol. 19, No. 1, pp. 65-68, ISSN: 1821-4932, 2016

Саопштење са скупа националног значаја штампано у целини (M63)

- [8] **Марковић, В.**, Јаковљевић, Ж., Будак, И., *Препознавање цилиндара и равни у тродимензионим облацима тачака*, 41. ЈУПИТЕР конференција, Зборник радова, Београд, 2018, стр. 2.9-2.18, ИСБН 978-86-7083-978-6 (M63)
- [9] **Марковић, В.**, Јаковљевић, Ж., Миљковић, З., *Сегментација једне класе површи другог реда из структурираног облака тачака: проблем одређивања прагова*, 40. ЈУПИТЕР конференција, Зборник радова, Београд, 2016, стр. 4.7-4.17
- [10] **Марковић, В.**, Јаковљевић, Ж., *Сегментација једне класе површи другог реда из структурираног облака тачака*, 39. ЈУПИТЕР конференција, Зборник радова, Београд, 2014, стр. 4.13-4.22, ИСБН: 978-86-7083-838-3

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу детаљног прегледа и анализе докторске дисертације „Препознавање геометријских примитива из тродимензионалног облака тачака“ кандидата Вељка М. Марковића, маг. инж. маш, Комисија за преглед, оцену и одбрану констатује да је дисертација успешно завршена у складу са предметом и постављеним циљевима истраживања и да представља оригинални научни рад са научним доприносом у ужој научној области производног машинства.

Имајући у виду наведено, Комисија предлаже Научно-наставном већу Машинског факултета Универзитета у Београду да усвоји овај Реферат и да се докторска дисертација под називом „Препознавање геометријских примитива из тродимензионалног облака тачака“ кандидата **Вељка М. Марковића, маг. инж. маш.** прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

У Београду, 19.02.2021. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....
Др Живана Јаковљевић, редовни професор, ментор
Универзитет у Београду, Машински факултет

.....
Др Бојан Бабић, редовни професор,
Универзитет у Београду, Машински факултет

.....
Др Зоран Миљковић, редовни професор
Универзитет у Београду, Машински факултет

.....
Др Саша Живановић, редовни професор
Универзитет у Београду, Машински факултет

.....
Др Игор Будац, редовни професор
Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких
наука