

НАЗИВ ФАКУЛТЕТА Факултет техничких наука
FACULTY: Faculty of Technical Sciences

15.07.2019.

ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ
-обавезна садржина- свака рубрика мора бити попуњена

(сви подаци уписују се у одговарајућу рубрику, а назив и место рубрике не могу се мењати или изоставити)

REPORT ON THE EVALUATION OF DOCTORAL DISSERTATION
-mandatory content- each section must be filled out

(all data is entered in the appropriate box, and the name and location of the column can not be changed or omitted)

I ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ
<p>1. Датум и орган који је именовео комисију</p> <p>27.06.2019., бр. 012-199/39-2017, Декан Факултета техничких наука на предлог Наставно научног већа ФТН</p>
<p>2. Састав комисије са назнаком имена и презимена сваког члана, звања, назива уже научне области за коју је изабран у звање, датума избора у звање и назив факултета, установе у којој је члан комисије запослен:</p> <p>1. Др Миодраг Хаџистевић, редовни професор, УНО: Метрологија, квалитет, еколошко-инжењерски аспекти, алати и прибори; изабран у звање 22.04.2015. год., Факултет техничких наука, Нови Сад, председник;</p> <p>2. Др Нуман Дуракбаса, редовни професор, УНО: Геометријске спецификације производа и верификација, изабран у звање 05.04.2004. год., Технички универзитет у Бечу, Институт за производно инжењерство и фотонске технологије, члан;</p> <p>3. Др Ђорђе Вукелић, ванредни професор, УНО: Метрологија, квалитет, еколошко - инжењерски аспекти, алати и прибори; изабран у звање: 21.10.2015. год., Факултет техничких наука, Нови Сад, члан;</p> <p>4. Др Живана Јаковљевић, ванредни професор, УНО: Производно машинство; изабрана у звање: 08.02.2016. год., Машински факултет, Београд, члан;</p> <p>5. Др Марко Катић, доцент, УНО: Стројарство; изабран у звање: 08.07.2015. год., Факултет стројарства и бродоградње, Загреб, члан;</p> <p>6. Др Игор Будак, ванредни професор, УНО: Метрологија, квалитет, еколошко-инжењерски аспекти, алати и прибори, изабран у звање 02.06.2015., Факултет техничких наука, Нови Сад, ментор.</p>
I INFORMATION ABOUT THE COMMITTEE
<p>1. Date and body that appointed the committee</p> <p>27.6.2019, no. 012-199/39-2017, Dean of the Faculty of Technical Sciences at the proposal of the Scientific Council of FTN</p>
<p>2. The elected members of the committee with an indication of the name and surname of each member, title, title of the narrow scientific field for which he/she has been elected, the date of election and the name of the faculty, the institution where the committee member is employed:</p>

1. PhD Miodrag Hadžistević, full professor, NSF: Metrology, Quality, Ecological - Engineering Aspects, Tools and Fixtures; elected: 22.04.2015., Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, president;
2. PhD Numan Durakbasa, full professor, NSF: Geometrical product specifications and verifications, elected: 05.04.2004., Vienna University of Technology , Institute for Production Engineering and Laser Technology, member;
3. PhD Đorđe Vukelić, associate professor, NSF: Metrology, Quality, Ecological - Engineering Aspects, Tools and Fixtures; elected: 21.10.2015., Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, member;
4. PhD Živana Jakovljević, associate professor, NSF: Production Engineering; elected: 08.02.2016., Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, member;
5. PhD Marko Katić, Assistant Professor, NSF: Mechanical Engineering; elected: 08.07.2015., Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, Zagreb, member;
6. PhD Igor Budak, associate professor, NSF: Metrology, Quality, Ecological - Engineering Aspects, Tools and Fixtures, elected: 02.06.2015., Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, mentor.

II ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

1. Име, име једног родитеља, презиме:
Марио, Жељко, Шокац
2. Датум рођења, општина, држава:
29.10.1989., Сомбор, Р. Србија
3. Назив факултета, назив студијског програма дипломских академских студија – мастер и стечени стручни назив
Факултет техничких наука Универзитета у Новом Саду, Производно машинство, Мастер инжењер машинства
4. Година уписа на докторске студије и назив студијског програма докторских студија
2013. год., Машинство

II INFORMATION ABOUT THE CANDIDATE

1. Name, single parent's name, surname:
Mario, Željko, Šokac
2. Date of birth, municipality, country:
October 29, 1989, Sombor, Republic of Serbia
3. Name of faculty, name of the study program of graduate academic studies - Master and professional title
Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad, Production Engineering, Master in Mechanical Engineering
4. Year of enrollment in doctoral studies and the title of study program of doctoral studies
2013, Mechanical Engineering

5. Назив факултета, назив магистарске тезе, научна област и датум одбране:

-

5. Name of the faculty, title of master of science thesis, scientific field and date of defense:

-

6. Научна област из које је стечено академско звање магистра наука: -
6. Scientific area from which is obtained academic degree of Master of Science: -
III НАСЛОВ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:
Хибридни модел за сегментацију снимака генерисаних применом компјутеризоване томографије
III THE TITLE OF DOCTORAL DISSERTATION:
A Hybrid Model for Segmentation of Images Generated by X-Ray Computed Tomography
IV ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:
Навести кратак садржај са знаком броја страна, поглавља, слика, шема, графикона и сл.
<p>Докторска дисертација кандидата Марија Шокца је прегледно и јасно изложена у оквиру осам поглавља:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Увод 2. Компјутеризована томографија у области 3Д дигитализације 3. Анализа метода за сегментацију слика 4. Хибридни модел за сегментацију снимака генерисаних применом компјутеризоване томографије 5. Верификација хибридног модела 6. Закључци 7. Литература 8. Прилози <p>У уводном поглављу је представљена област истраживања докторске дисертације, образложен је предмет истраживања, дефинисани су циљ и хипотезе истраживања, а дат је и краћи приказ структуре докторске дисертације. Друго поглавље се бави принципима рада компјутеризоване томографије и применом ове технологије у области 3Д дигитализације и координатног мерења. Представљен је значај примене сегментације код обраде ЦТ снимака, као и основни принципи који се тичу сегментације. Посебна пажња је посвећена разлозима настајања артефаката и њиховој класификацији. У другом делу овог поглавља је дат преглед тренутног стања у области компјутеризоване томографије са аспекта развоја и примене различитих метода које се баве сегментацијом и екстракцијом информација са генерисаних ЦТ снимака. Такође су приказане и методе које се баве пре-процесирањем резултата аквизиције са ЦТ система, као и модификацијом хардверске структуре, а све са циљем редукције настанка шума и артефаката. Треће поглавље је посвећено поступку сегментације и његовом значају за целокупан поступак обраде ЦТ снимака. Познато је да је екстракција структура од значаја са ЦТ снимака карактерисана као веома важна у области индустријске ЦТ метрологије. Из тог разлога је у овом поглављу спроведена анализа најчешће примењиваних метода сегментације. Применом SWOT анализе приказане су њихове основне предности и мане код примене, док су такође представљене и методе које се баве анализом обраде слике у области индустријске метрологије и области медицине, а које су примењене у оквиру ове докторске дисертације. У четвртом поглављу је детаљно приказан развој хибридног модела за сегментацију снимака генерисаних применом ЦТ-а, као и развој програмског система који је омогућио практичну примену развијеног хибридног модела код сегментације и обраде ЦТ снимака. Поглавље садржи детаљан приказ графичког корисничког интерфејса, као и корисничких панела развијеног програмског система названог ПроСЕГ3Д. Такође су представљене функције и методе које се користе у оквиру развијеног програмског система. Пето поглавље обухвата верификацију хибридног модела. Верификација је спроведена на три студије случаја. Две студије случаја су из области машинског инжењерства, а фокусиране су на сегментацију објеката који садрже више различитих материјала присутних на ЦТ снимцима. За компаративну анализу су коришћени комерцијални софтвери, специјализовани за обраду индустријских ЦТ снимака. Трећа студија случаја је из области биомедицинског инжењерства, у оквиру које је хибридни модел упоређен са још три методе (изабране на основу анализе одговарајуће научне литературе) које се баве сегментацијом медицинских ЦТ снимака. У шестом поглављу су дати закључци који су изведени на основу истраживања спроведених у оквиру докторске дисертације, са посебним акцентом на научне доприносе ове докторске</p>

дисертације, као и на отварање нових праваца истраживања. Седмо поглавље се састоји из списка научне и стручне литературе која је коришћена у оквиру ове докторске дисертације. У последњем, осмом поглављу су дати прилози.

Дисертација је написана на 151 страни А4 формата, садржи 8 поглавља, 101 слику, 29 табела, 178 цитираних литературних извора и 9 прилога.

IV OVERVIEW OF DOCTORAL DISSERTATION:

Specify a short content with an indication of the number of pages, chapters, pictures, charts, etc.

The doctoral dissertation of candidate Mario Šokac is clearly and concisely presented within eight chapters:

1. Introduction
2. Computed tomography in the field of 3D digitization
3. Analysis of image segmentation methods
4. A hybrid model for segmentation of images generated using computed tomography
5. Verification of the hybrid model
6. Conclusions
7. Literature
8. Annexes

The introductory chapter presents the field of doctoral dissertation research, the subject of the research is explained, the aim and the hypotheses of the research are defined, and a brief overview of the doctoral dissertation's structure is given at the end of this chapter. The second chapter deals with the principles of X-ray computed tomography and its application in the fields of 3D digitization and coordinate measurement. The significance of the application of segmentation in the processing of X-ray CT images is presented, as well as the basic principles regarding image segmentation. Special attention is paid to the causes of artefacts occurrence and their classification. The second part of this chapter provides an overview of the current state of computed tomography from the aspects of the development and application of various methods that deal with segmentation and extraction of information from X-ray CT images. Here are also presented methods that deal with the pre-processing of acquisition results from the CT systems, as well as the analyses of modifications of the hardware structure, with the main goal of reduction of noise and artefacts. The third chapter is devoted to the segmentation and its significance for the entire CT scanning procedure. It is well known that the extraction of important structures from X-ray CT images is characterized as a very important issue in the field of industrial CT metrology. For this reason, within this chapter analysis of some of the most commonly used methods for image segmentation were performed. SWOT analysis is used to emphasize advantages and disadvantages of these segmentation methods, while also describing the methods for image analysis in the field of industrial metrology and the field of medicine, which were applied within this doctoral dissertation. The fourth chapter gives the details on the development of a hybrid model for the segmentation of X-ray CT images. Second part of this chapter presents the developed software solution which enabled practical application of the developed hybrid model in segmentation and processing of X-ray CT images. This part provides a detailed overview of the graphical user interface (GUI) of the developed software which is titled as ProSEG3D. The functions and methods used in the developed software are also described. The fifth chapter comprises the verification of a hybrid model. The verification was carried out using three case studies. Two case studies are from the field of mechanical engineering, focused on the segmentation of objects that contain several different materials present on CT images. For comparative analysis, commercial software specialized for the processing of industrial X-ray CT images, were used. The third case study is from the field of biomedical engineering, in which the hybrid model is compared with three other methods (selected on bases of the scientific literature analyses) dealing with the segmentation of medical CT images. The sixth chapter provides conclusions drawn from the research conducted in the framework of the doctoral dissertation, with a special emphases on the scientific contributions of the doctoral dissertation, as well as the possible future research directions. The seventh chapter consists of a list of scientific literature used in this doctoral dissertation. In the eighth chapter annexes of this doctoral dissertation are given.

The dissertation was written on 151 pages of A4 format, containing 8 chapters, 101 images, 29 tables, 178 cited literary sources and 9 annexes.

V ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Предмет истраживања докторске дисертације је проистекао из актуелне тенденције да се унапреди квалитет резултата 3Д дигитализације применом индустријских ЦТ система, а усмерен је на унапређење сегментације генерисаних ЦТ снимака са циљем реконструкције димензионално тачнијих површинских 3Д модела, односно добијање тачнијих резултата мерења. Да би се могла спровести димензионална мерења неког дела, неопходно је пажљиво одредити граничне вредности интензитета пиксела присутних на 2Д ЦТ снимцима, јер је то критичан параметар од којег зависи тачност сегментације слике и последично тачност реконструисане 3Д површине објекта. У идеалном случају, тј. при скенирању хомогених објеката који се састоје из само једног материјала, са јасно дефинисаним границама објекта и уз претпоставку да нема присутва артефаката на генерисаним 2Д ЦТ снимцима, реконструкција површинског 3Д модела је релативно једноставна. Међутим, у пракси су такви идеални случајеви ретки, јер је појава артефаката на 2Д ЦТ снимцима доста честа, било као последица отврдњавања снопа X-зрака, расипања зрачења или недовољног продора X-зрака кроз објекат. Ово се често јавља као резултат аквизиције ЦТ снимака код објеката који се састоје од два или више материјала различитих густина (ММЦ од енгл. назива *Multi-Material Component*). Иако ЦТ технологију карактеришу одређене предности у односу на класичне координатне мерне технологије, мерење ММЦ и даље представља изазов за ЦТ системе, посебно у случајевима где је потребно реконструисати све компоненте из којих се ММЦ састоји. Развој 3Д алгоритама за одређивање површине за ММЦ још није достигао задовољавајући ниво. Употреба јединствене вредности прага код дефинисања интензитета пиксела и екстракције површина на бази 2Д ЦТ снимака није погодна за ММЦ, због чега је често неопходно пост-процесирање резултата сегментације и накнадна интервенција оператера.

Имајући у виду претходно, а респектујући могућности као и ограничења метода за сегментацију 2Д ЦТ снимака на којима се налазе ММЦ, за основни **циљ истраживања** је постављен развој функционалног хибридног модела са циљем унапређења генерисаних 2Д ЦТ снимака на којима се налазе ММЦ и њихове сегментације, што ће последично допринети реконструкцији димензионално тачнијих површинских 3Д модела, односно тачнијим резултатима мерења геометријских величина. Циљ је обухватио и практичну примену хибридног модела у оквиру одговарајућих студија случаја, чиме је остварена и његова верификација. Изабране студије случаја су, имајући у виду актуелну примену ЦТ система, укључиле конкретне примере из области машинског инжењерства, као и из области биомедицинског инжењерства.

У складу са постављеним циљем, дефинисане су **хипотезе**:

Прва хипотеза – да је могуће развити хибридни модел, заснован на комбиновању метода фази Ц кластеризације и раста региона, који ће омогућити побољшану сегментацију генерисаних 2Д ЦТ снимака – је потврђена кроз развој хибридног модела и његову практичну примену преко развијеног програмског система ПроСЕГ3Д у оквиру одговарајућих студија случаја. Примена ПроСЕГ3Д програмског система је потврдила да је могуће извршити побољшану сегментацију и генерисање тачнијег 3Д модела што је и верификовано кроз детаљне експерименталне димензионалне, запреминске и геометријске анализе.

Друга хипотеза – да је могуће развити приступ за дефинисање центра сегментираних региона неправилне геометрије, заснован на стандардној девијацији интензитета пиксела – је потврђена кроз развој иновативног приступа који омогућава тачно дефинисање ХУ координата иницијалног семена које се налази унутар жељеног региона на 2Д ЦТ снимцима, а који је неопходан за примену методе раста региона и адекватну сегментацију. Верификација развијеног приступа је спроведена на три студије случаја, при чему је у све три студије постигнут максималан учинак од 100%, односно ХУ координате тачака се налазе унутар региона од интереса за све анализираних 2Д ЦТ снимке.

Трећа хипотеза – побољшана сегментација ЦТ снимака применом развијеног хибридног модела ће омогућити генерисање 3Д модела унапређене тачности – је потврђена детаљним геометријским анализама генерисаних површинских 3Д модела у оквиру три студије случаја. Модели су добијени са значајно редукованим/уклоњеним шумом, што је за резултат имало реконструисане 3Д моделе објеката веће тачности. Примена ПроСЕГ3Д програмског система је показала боље резултате од комерцијалних софтвера код сегментације ММЦ у две студије

случаја из области машинске индустрије. Ово је потврђено применом савремених метода у оквиру модула за анализу слике, као и одговарајућим димензионалним мерењима. Одговарајућим анализама примењеним у трећој студији случаја је потврђено да примена ПроСЕГЗД програмског система, у поређењу са другим методама изабраним на основу анализе литературе, даје тачније резултате и у области сегментације медицинских 2Д ЦТ снимака.

Одговарајући **закључци** реализованих истраживања су изведени у шестом поглављу докторске дисертације. Након краћег осврта на реализацију циља и потврђене хипотезе истраживања, посебно су коментарисани доприноси реализованих истраживања, као и могући правци даљих истраживања који су отворени реализацијом ове докторске дисертације. Резултати истраживања, у општем смислу, представљају допринос код унапређења димензионалне тачности генерисаних површинских 3Д модела, као и анализе резултата сегментације 2Д ЦТ снимака на којима се налазе ММЦ. Када је реч о могућим правцима будућих истраживања, постоји више праваца истраживања који се отварају развојем новог хибридног модела интегрисаног у виду ПроСЕГЗД програмског система. Пре свега, треба поменути даљи развој програмског система кроз интеграцију нових метода за сегментацију 2Д ЦТ снимака са циљем његовог унапређења и повећања могућности примене. Поред тога, тестирање и верификација развијеног хибридног модела на резултатима аквизиције са других ЦТ система је такође узета у обзир. Пошто је мерна несигурност често непозната услед великог броја сложених фактора утицаја (који могу бити у вези са калибрацијом ЦТ система, подешавањем параметара аквизиције, утицајем оператера итд.) будућа истраживања ће се такође фокусирати и на ову област. Коначно, као један од будућих праваца се такође намеће и потенцијална интеграција развијеног хибридног модела у друге комерцијалне софтвере.

Коришћена **литература** обухватила је велики број научних и стручних публикација које су наведене у седмом поглављу. Највећи број цитираних публикација је новијег датума из међународних научних часописа са SCI листе. Такође су консултовани и актуелни међународни ИСО стандарди и смернице у оквиру ВДИ/ВДЕ стандарда.

V EVALUATION OF SOME PARTS OF DOCTORAL DISSERTATION:

The research subject of the doctoral dissertation was derived from the current tendency to improve the quality of 3D digitization results using industrial computed tomography systems and is aimed at improving the segmentation of generated 2D CT images with the purpose of reconstructing dimensionally more accurate surface 3D models and obtaining more accurate measurement results. In order to carry out dimensional measurements of a certain part, it is necessary to carefully determine the threshold values of the pixel intensities from 2D CT images, as this is a critical parameter on which the accuracy of image segmentation depends on, and consequently the accuracy of the reconstructed surface 3D model of the object. Ideally, i.e. when scanning homogeneous objects consisting of only one material with clearly defined boundaries of the object, and assuming that there is no presence of artefacts on generated 2D CT images, the reconstruction of the surface 3D model is relatively simple. However, in practice such ideal cases are rare because the appearance of artefacts on 2D CT images is quite common, whether as a result of beam hardening, radiation scattering, or the insufficient X-ray penetration depth through the object. This often occurs as a result of the acquisition of 2D CT images in objects consisting of two or more materials of different densities (commonly used term is *Multi-Material Component - MMC*). Although CT technology has certain advantages over tactile coordinate measurement systems, MMC measurement continues to be a challenge for modern X-ray CT systems, especially in cases where it is necessary to reconstruct all the components from which the MMC is composed. The development of 3D algorithms for accurate surface determination of MMC has not yet reached a satisfactory level. The use of a unique threshold value in defining the pixel intensity and surface extraction based on 2D CT images is not suitable for the MMC, which is why there is often need for post-processing of segmentation results and subsequent intervention by the operator.

Bearing in mind the above, while respecting the possibilities and limitations of methods for segmentation of 2D CT images on which MMCs are located, **the main goal of the research** was the development of a functional hybrid model aimed at improving the acquired 2D CT images on which MMCs are present and their segmentation, which will consequently contribute to the reconstruction of dimensionally more accurate surface 3D models, and more accurate results of dimensional measurements. The aim also included the practical application of the hybrid model within the appropriate case studies, thus achieving its verification. Selected case studies, having in mind the

current application of the CT system, included specific examples from the field of mechanical engineering as well as from the field of biomedical engineering.

In line with the defined goal, **hypotheses** are defined:

First hypothesis - that it is possible to develop a hybrid model, based on the combination of fuzzy C-means clustering and region growing method that will enable improved segmentation of acquired X-ray CT images - is confirmed through the development of the hybrid model and its practical application through the developed ProSEG3D software within selected case studies. The application of the ProSEG3D software has confirmed that it is possible to improve segmentation and reconstruct a more accurate surface 3D model, which is also verified through detailed experimental, dimensional, volumetric and geometrical analysis.

Second hypothesis - that it is possible to develop an approach for defining the centre of segmented regions of irregular geometry, based on standard deviation of pixel intensity - is confirmed through the development of an innovative approach that allows the accurate extraction of the XY coordinates of the initial seed located within the desired region on 2D CT images, and which is necessary for the application of the region growing method and adequate segmentation. Verification of the developed approach was carried out for all three case studies, with all the studies achieving a maximum effect of 100%, that is, XY coordinates of the initial seed are located within the region of interest for all analyzed 2D CT images.

The third hypothesis - improved CT segmentation using a developed hybrid model will enable the reconstruction of 3D models of improved accuracy - is confirmed by the detailed geometric analysis of generated surface 3D models in three case studies. The 3D models were obtained with significantly reduced/removed artefacts and noise, resulting in reconstructed 3D models of objects of higher accuracy. The application of the ProSEG3D software showed better results than commercial software in the MMCs segmentation in two case studies in the field of mechanical engineering. This is confirmed by the use of modern methods in the image analysis module, as well as by appropriate dimensional measurements. The corresponding analyzes applied in the third case study confirmed that the application of the ProSEG3D software, compared with other methods (selected on bases of the literature analyses), gives more accurate results in the field of segmentation of medical 2D CT images.

Appropriate **conclusions** of the realized research were carried out in the sixth chapter of the doctoral dissertation. After a brief review of the achievement of the research goal and the confirmed hypothesis of the research, scientific contributions made by the presented research were elaborated, while the possible directions of further research opened by the realization of this doctoral dissertation were noted. The results of the research, in general, contribute to the improvement of the dimensional accuracy of the reconstructed surface 3D models, as well as the analysis of the segmentation results of the 2D CT images on which the MMC is present. When it comes to possible directions for future research, there are several research directions that are opened by the development of a new hybrid model integrated into the form of ProSEG3D software. First of all, further development of the software through the integration of new methods for segmentation of X-ray CT images in order to improve and increase the possibilities of its application was mentioned. In addition, testing and verification of a developed hybrid model on the acquisition results from other CT systems is also taken into account. Since measurement uncertainty is often unknown due to a large number of complex factors (which may be related to calibration of the CT system, acquisition parameters, operator influence, etc.), future research will also focus on this area as well. Finally, as one of the future directions, the potential integration of the developed hybrid model into other commercial software is also being imposed.

The **literature** used included a large number of scientific publications that are listed in Chapter 7. The largest number of scientific publications are from a recent date and from international scientific journals from the SCI list. Also, the current international ISO standards and VDI/VDE guidelines have been consulted.

VI СПИСАК НАУЧНИХ И СТРУЧНИХ РАДОВА КОЈИ СУ ОБЈАВЉЕНИ ИЛИ ПРИХВАЋЕНИ ЗА ОБЈАВЉИВАЊЕ НА ОСНОВУ РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА У ОКВИРУ РАДА НА ДОКТОРСКОЈ ДИСЕРТАЦИЈИ

Таксативно навести називе радова, где и када су објављени. Прво навести најмање један рад објављен или прихваћен за објављивање у часопису са ISI листе односно са листе министарства надлежног за науку када су у питању друштвено-хуманистичке науке или радове који могу заменити овај услов до 01. јануара 2012. године. У случају радова прихваћених за објављивање, таксативно навести називе радова, где и када ће бити објављени и приложити потврду о томе.

VI. LIST OF SCIENTIFIC PAPERS PUBLISHED OR ACCEPTED FOR PUBLICATION BASED ON RESEARCH RESULTS WITHIN THE WORK ON DOCTORAL DISSERTATION

List all related publications, where and when were they published. First, state at least one article published or accepted for publication in the journal from the ISI list, or from the list of the ministry responsible for science when it comes to socio-humanistic sciences or works that can replace this requirement by January 1, 2012. In the case of papers accepted for publication, specify the names of the works, where and when they will be published, and provide a confirmation of their acceptance.

- [1] Budak I., Mirković S., **Šokac M.**, Santoši Ž., Puškar T., Vukelić Đ.: An approach to modelling of personalized bone grafts based on advanced technologies, International Journal of Simulation Modelling, 2016, Vol. 15, No 4, pp. 637-648, ISSN 1726-4529 – **M21**
- [2] Budak I., Kiralj A., **Šokac M.**, Santoši Ž., Eggebeer D., Peel S.: Computer-aided methods for single-stage fibrous dysplasia excision and reconstruction in the zygomatico- orbital complex, Rapid Prototyping Journal, 2019, ISSN 1355-2546 – **M21**
- [3] Mirković S., Budak I., Puškar T., Tadić A., **Šokac M.**, Santoši Ž., Đurđević Mirković T.: Application of modern Computer-Aided Technologies in the production of individual bone graft: A case report, Vojnosanitetski pregled, 2015, Vol. 72, No 12, pp. 1126-1131, ISSN 0042-8450 – **M23**
- [4] Budak I., Mirković S., **Šokac M.**, Puškar T.: Application of advanced engineering systems in design and fabrication of custom-made bone grafts, 1. International Scientific Conference on Dentistry, Novi Sad: Stylos doo Novi Sad, 17-19 Maj, 2016, pp. 60-65, ISBN 978-86-7473-59 – **M31**
- [5] **Šokac M.**, Santoši Ž., Puškar T., Mirković S., Soković M., Budak I.: Application of Different Segmentation Approaches on CB-CT Images for the Reconstruction of 3D Model of Mandible, 6. International Scientific and Expert Conference (TEAM), Kečkemet: Kecskemét College, Faculty of Mechanical Engineering and Automation, 10-11 Novembar, 2014, pp. 405-409, ISBN 978-615-5192-22-7 – **M33**
- [6] **Šokac M.**, Margan V., Car Z., Budak I.: Comparative analysis and evaluation of measurement capabilities of contact and non-contact devices, 555. International Conference on Innovative Technologies – In-Tech 2016, Prag: Faculty of Engineering, University of Rijeka, 6-8 Septembar, 2016, pp. 263-266, ISBN 1849- 0662 – **M33**
- [7] **Šokac M.**, Santoši Ž., Budak I., Vukelić Đ., Puškar T.: Improvement and development of modern diagnostic method in dentistry using advanced 3D digitizing systems, 8. PSU-UNS International Conference on Engineering and Technology - ICET, Novi Sad: University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, 8-10 Jun, 2017, pp. 1-4, ISBN 978-86-7892-933-5 – **M33**
- [8] **Šokac M.**, Santoši Ž., Budak I., Car Z., Vukelić Đ.: Combination of contact and optical 3D digitizing methods for their application in reverse engineering, 8. International Conference on Innovative Technologies INTECH, Ljubljana: Faculty of Mechanical Engineering, 11-13 Septembar, 2017, pp. 65-68, ISBN 0184-9069 – **M33**
- [9] Katić M., **Šokac M.**, Budak I.: Application of computed tomography on multi-material objects, 17. International Conference on Materials: corrosion, heat treatment, materials testing and tribology - MTECH, Zadar: Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, 4-7 Oktobar, 2017, pp. 217-222, ISBN 2584-4334 – **M33**
- [10] **Šokac M.**, Budak I., Santoši Ž., Kadvany K., Puškar T., Vukelić Đ.: Emergence of new technologies in the designing and fabrication of patient-specific removable partial dentures

- (RPDs): A case study, 8. International Conference on Information Society and Technology – ICIST, Kopaonik: Society for Information Systems and Computer Networks, 11-14 Mart, 2018, pp. 94-99, ISBN 978-86-8552-516-2 – **M33**
- [11] **Šokac M.**, Miljanović D., Santoši Ž., Vukelić Đ., Budak I.: Application of 3D Technologies for Design and Fabrication of Mandibular Implant: A Case Study, 8. Young Biomedical Engineers and Researchers Conference - YBERC, Košice: Faculty of Mechanical Engineering, 3-5 Oktobar, 2018, pp. 185-189, ISBN 978-80-8086-271-8 – **M33**
- [12] **Šokac M.**, Budak I., Mirković S., Santoši Ž., Movrin D., Puškar T.: The role of advanced 3D technologies and additive manufacturing in designing and manufacturing of customized bone grafts, Journal for Technology of Plasticity, 2017, Vol. 42, No 2, pp. 33-45, ISSN 0354-3870, UDK: 621.7 – **M51**
- [13] **Šokac M.**, Budak I., Ralević N., Soković M., Santoši Ž.: Accuracy analysis of clustering algorithms for segmentation of industrial CT images, Journal of Production Engineering, 2015, Vol. 18, No 1, pp. 65-68, ISSN 1821-4932, UDK: 621 – **M52**
- [14] **Šokac M.**, Budak I., Miljanović D., Santoši Ž., Vukelić Đ.: Computer-aided modeling and additive manufacturing fabrication of patient-specific mandibular implant, Clinician and Technology, 2018, Vol. 48, No 4, pp. 113-117, ISSN 0301-5491 – **M53**
- [15] **Šokac M.**, Budak I., Ralević N., Spasić A., Santoši Ž., Vučaj-Ćirilović V., Til V.: Primena metode klasterizacije C-srednjih vrednosti kod segmentacije medicinskih snimaka, 9. International Scientific Conference "Metrology and Quality in Production Engineering and Environmental Protection" - ETIKUM, Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka, 19-20 Jun, 2015, pp. 33-36, ISBN 978-86-7892-713-3 – **M63**
- [16] **Šokac M.**, Budak I., Santoši Ž., Spasić A., Jakovljević Ž.: Uloga statističkih evaluatora i njihova primena kod analize tačnosti segmentiranih medicinskih snimaka, 11. International Scientific Conference ETIKUM, Novi Sad: University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, 6-8 Decembar, 2017, pp. 153-156, ISBN 978-86-6022-00-68 – **M63**
- [17] **Šokac M.**, Budak I., Jakovljević Ž., Santoši Ž., Vukelić Đ.: Pregled stanja i analiza najčešće primenjivanih metoda za segmentaciju slike, 12. International Scientific Conference ETIKUM, Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka, 6-8 Decembar, 2018, pp. 81-84, ISBN 978-86-6022-123-2 – **M63**
- [18] **Šokac M.**, Budak I., Mirković S., Puškar T., Santoši Ž.: Metod za modelovanje kastomizovanih koštanih graftova u stomatologiji, Tehničko rešenje, Korisnik: Wisil M, Novi Beograd, i Klinika za stomatologiju Vojvodine, Novi Sad, Srbija, 2015 – **M85**

VII ZAKЉUČICI OДНОСНО РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА

Резултати истраживања представљени су кроз проверу постављене три хипотезе. Полазећи од прве хипотезе, развијен је иновативни хибридни модел који је заснован на комбиновању метода фази Ц кластеризације и метода раста региона, са циљем побољшане сегментације генерисаних 2Д ЦТ снимака. Резултат истраживања у вези са другом хипотезом је развијени иновативни приступ за дефинисање центра сегментираних региона неправилне геометрије, заснован на стандардној девијацији интензитета пиксела. У оквиру провере треће хипотезе развијени хибридни модел, интегрисан у апликативни програмски систем ПроСЕГЗД, је кроз три експерименталне студије случаја, потврдио очекивану побољшану сегментацију 2Д ЦТ снимака, односно генерисање површинских 3Д модела унапређене тачности. У остварене резултате истраживања, треба навести и обимну анализу метода за сегментацију ЦТ снимака засновану на великом броју одговарајућих научних литературних извора.

На основу остварених резултата истраживања, може се закључити да су полазне претпоставке истраживања потврђене, као и да је постављени циљ истраживања ове докторске дисертације у потпуности испуњен: *Иновативни хибридни модел, у оквиру којег је интегрисан иновативни приступ за тачно дефинисање XY координата иницијалног семена за сегментацију методом раста региона, омогућава постизање побољшане сегментације 2Д ЦТ снимака и консеквентно постизање веће тачности реконструисаних 3Д модела.*

VII CONCLUSIONS RELATED TO THE RESEARCH RESULTS

The research results are presented through the verification of the three hypotheses. Starting from the first hypothesis, an innovative hybrid model has been developed, which is based on the combination of fuzzy C-means clustering and region growing methods, with the aim of improving the segmentation of generated 2D CT images. The research result related to the second hypothesis is a developed innovative approach for defining the center of segmented regions of irregular geometry, based on the standard deviation of the pixel intensity. In the framework of the third hypothesis the developed hybrid model, integrated into the software ProSEG3D, through application within three experimental case studies confirmed the expected improved segmentation of 2D CT images and the reconstruction of surface 3D models of improved accuracy. The achieved research results also include comprehensive analysis of the methods for segmentation of CT images based on a large number of appropriate scientific literary sources.

Based on the research results, it can be concluded that the initial assumptions of the research have been confirmed and that the goal of the research of this doctoral dissertation is completely fulfilled: *An innovative hybrid model, within which is integrated an innovative approach for accurate extraction of XY coordinates of the initial seed for segmentation by region growing method, enables improved segmentation of 2D CT images and consequently achieving higher accuracy of reconstructed 3D models.*

VIII ОЦЕНА НАЧИНА ПРИКАЗА И ТУМАЧЕЊА РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА

Експлицитно навести позитивну или негативну оцену начина приказа и тумачења резултата истраживања.

Резултати истраживања, остварени у оквиру ове докторске дисертације, приказани су и тумачени на јасан и систематичан начин, у складу са карактером проблема истраживања и опште прихваћеном праксом у области истраживане проблематике, што је и потврђено цитатима из кредибилних и актуелних литературних извора. Резултати истраживања потврђују постављене хипотезе, што је кроз дискусију резултата детаљно и образложено.

Рад је проверен у софтверу за детекцију плагијаризма iThenticate, у Библиотеци ФТН-а.

VIII ASSESSMENT OF PRESENTATION AND INTERPRETATION OF THE RESEARCH RESULTS

Explicitly indicate a positive or negative assessment of how research results are presented and interpreted.

The research results, obtained within this doctoral dissertation, have been presented and interpreted in a clear and systematic manner, in accordance with the nature of the research problem and the generally accepted practice in the investigated fields, which is confirmed by citations from credible and current literary sources. The research results confirm the defined hypotheses, which have been explained in detail through the discussion of the results.

The work was checked in the iThenticate plagiarism detection software, at the FTN Library.

IX КОНАЧНА ОЦЕНА ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Експлицитно навести да ли дисертација јесте или није написана у складу са наведеним образложењем, као и да ли она садржи или не садржи све битне елементе. Дати јасне, прецизне и концизне одговоре на 3. и 4. питање:

1. Да ли је дисертација написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме?

Дисертација је написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме.

IX FINAL ASSESSMENT OF THE DOCTORAL DISSERTATION:

Explicitly indicate whether the dissertation is or is not written in accordance with the above explanation, and whether it contains or does not contain all the essential elements. Provide clear, precise and concise answers to questions 3 and 4:

1. Has the dissertation been written in accordance with the explanation stated in the thesis topic's application?

The dissertation is written in accordance with the explanation stated within the topic's application.

2. Да ли дисертација садржи све битне елементе?

Дисертација садржи све битне елементе карактеристичне за докторску дисертације у области техничко технолошких наука. Дефинисани су предмет и циљ истраживања и постављене су хипотезе истраживања, које су проверене и потврђене на одговарајући и систематичан начин, у складу са методом научног рада. Добијени резултати су адекватно представљени и детаљно дискутовани, а на крају су изведени одговарајући закључци. Кредибилна и актуелна литература је на одговарајући начин наведена и цитирана у тексту дисертације.

2. Does the dissertation contain all the essential elements?

The dissertation contains all the essential elements that are characteristic for doctoral dissertations in the field of technical - technological sciences. The object and purpose of the research are defined, and research hypotheses have been established, which have been verified and confirmed in an appropriate and systematic manner, in accordance with the method of scientific work. The results obtained were adequately presented and discussed in detail, and in the end, appropriate conclusions were drawn. Credible and current literature is appropriately listed and cited in the text of the dissertation.

3. По чему је дисертација оригиналан допринос науци?

Докторска дисертација, у општем смислу, представља допринос у области унапређења тачности сегментације генерисаних 2Д ЦТ снимака, односно унапређења тачности 3Д модела генерисаних на бази побољшаних ЦТ снимака. Поменути доприноси су реализовани кроз развој оригиналног хибридног модела заснованог на комбинацији метода фази Ц кластеризације и раста региона. Иновативни модел је формализован у виду апликативног програмског система под називом ПроСЕГ3Д, чиме је омогућена практична примена хибридног модела.

Посебан допринос докторске дисертације се огледа у иновативном приступу за дефинисање центра сегментираних региона неправилне геометрије, који је заснован на стандардној девијацији интензитета пиксела. Овај иновативни приступ омогућава тачно дефинисање XY координата иницијалног семена које се налази унутар жељеног региона на ЦТ снимцима, а који је неопходан за примену РГ методе и адекватну сегментацију.

Реализација три студије случаја, у оквиру којих је верификована функционалност хибридног модела у две различите инжењерске области (машинском инжењерству и биомедицинском инжењерству), представља још један специфични допринос ове докторске дисертације. Овај допринос, обухвата детаљне компаративне анализе предности и недостатака ПроСЕГ3Д система у односу на два комерцијална софтвера GOM Inspect и VGStudio Max.

Оригиналним доприносима дисертације свакако треба обухватити и анализу великог броја литературних извора, на основу које је систематизован приказ актуелног стања у области сегментације ЦТ снимака, као и дефинисане могуће правце будућих истраживања у овој пропульзивној области.

3. What is the dissertation's original scientific contribution?

The doctoral dissertation, in general terms, represents a contribution in the field of accuracy improvement for segmentation of 2D CT images, and accuracy improvement of surface 3D models reconstructed on the basis of improved CT images. These contributions were realized through the development of an original hybrid model based on the combination of fuzzy C-means clustering and region growing methods. The innovative model is formalized in the form of software titled ProSEG3D, which allowed the practical application of the hybrid model.

A special contribution to the doctoral dissertation is reflected in an innovative approach for defining the centre of segmented regions of irregular geometry, which is based on the standard deviation of the pixel intensity. This innovative approach enables the exact definition of the XY coordinate of the initial seed located within the desired region on the CT images, which is necessary for the application of the region growing method and an adequate segmentation.

The realization of three case studies, in which the functionality of the hybrid model is verified in two different engineering areas (mechanical engineering and biomedical engineering), is another specific contribution of this doctoral dissertation. This contribution includes a detailed comparative analysis of the advantages and disadvantages of the ProSEG3D software compared to two commercial software GOM Inspect and VGStudio Max.

The original contributions of the dissertation should certainly include the analysis of a large number of literary sources, based on which the state-of-the-art in the field of segmentation of CT images is systematically presented, as well as defined possible directions of future research in this propulsive field.

4. Недостаци дисертације и њихов утицај на резултат истраживања

Докторска дисертација нема недостатака који би битније утицали на резултате истраживања.

4. Disadvantages of the dissertation and their impact on the research result

The doctoral dissertation has no shortcomings that would significantly influence the research results.

X ПРЕДЛОГ:

На основу укупне оцене дисертације, комисија предлаже:

На основу свеобухватне анализе и укупне оцене докторске дисертације „Хибридни модел за сегментацију снимака генерисаних применом компјутеризоване томографије” кандидата Марија Шокца, Комисија предлаже Наставно-научном већу Факултета техничких наука и Сенату Универзитета у Новом Саду да се докторска дисертација прихвати и да се кандидату одобри јавна одбрана.

X PROPOSAL:

Based on the overall assessment of the dissertation, the committee proposes:

Based on the comprehensive analysis and overall assessment of the doctoral dissertation "A Hybrid Model for Segmentation of Images Generated by X-Ray Computed Tomography" by candidate Mario Šokac, the Committee proposes to the Teaching and Scientific Council of the Faculty of Technical Sciences and the Senate of the University of Novi Sad to accept the doctoral dissertation and that a candidate can be granted a public defence.

НАВЕСТИ ИМЕ И ЗВАЊЕ ЧЛАНОВА КОМИСИЈЕ
ПОТПИСИ ЧЛАНОВА КОМИСИЈЕ

THE NAME AND THE TITLE OF THE COMMITTEE MEMBERS
SIGNATURES OF THE DEFENDING COMMISSION MEMBERS

Др Миодраг Хаџистевић, редовни професор, УНО: Метрологија, квалитет, еколошко инжењерски аспекти, алати и прибори, Факултет техничких наука, Нови Сад, Председник
PhD Miodrag Hadžistević, full professor, NSF: Metrology, Quality, Ecological - Engineering Aspects, Tools and Fixtures, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, President

Др Нуман Дуракбаса, редовни професор, УНО: Геометријске спецификације производа и верификација, Технички универзитет у Бечу, Институт за производно инжењерство и фотонске технологије, Беч, Члан
PhD Numan Durakbasa, full professor, NSF: Geometrical Product Specifications and Verification, Vienna University of Technology, Institute of Production Engineering and Laser Technology, Vienna, Member

Др Ђорђе Вукелић, ванредни професор, УНО: Метрологија, квалитет, еколошко - инжењерски аспекти, алати и прибори, Факултет техничких наука, Нови Сад, Члан
PhD Đorđe Vukelić, Associate Professor, NSF: Metrology, Quality, Ecological - Engineering Aspects, Tools and Fixtures, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, Member

Др Живана Јаковљевић, ванредни професор, УНО: Производно машинство, Машински факултет, Београд, Члан
PhD Živana Jakovljević, Associate Professor, NSF: Production Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, Member

Др Марко Катић, доцент, УНО: Стројарство, Факултет стројарства и бродоградње, Загреб, Члан
PhD Marko Katić, Assistant Professor, NSF: Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, Zagreb, Member

Др Игор Будак, ванредни професор, УНО: Метрологија, квалитет, еколошко инжењерски аспекти, алати и прибори, Факултет техничких наука у Новом Саду, Ментор
PhD Igor Budak, Associate Professor, NSF: Metrology, Quality, Ecological - Engineering Aspects, Tools and Fixtures, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, Mentor