



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ

ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА



ПРИМЕНА БЕСКОНТАКТНИХ МЕТОДА ЗА 3Д ДИГИТАЛИЗАЦИЈУ СКУЛПТУРЕ И УГРАДЊА ЗАШТИТЕ ОД ЗЛОУПОТРЕБЕ У 3Д ВИРТУЕЛНИ МОДЕЛ

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Ментори:

проф. др Ратко Обрадовић

проф. др Бранислав Попконстантиновић

Кандидат:

Ивана Васиљевић

Нови Сад, 2021. године

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА¹

Врста рада:	Докторска дисертација
Име и презиме аутора:	Ивана Васиљевић
Ментор (титула, име, презиме, звање, институција)	др Ратко Обрадовић , редовни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду др Бранислав Попконстантиновић , редовни професор, Машински Факултет у Београду, Универзитет у Београду
Наслов рада:	Примена бесконтактних метода за 3Д дигитализацију скулптуре и уградња заштите од злоупотребе у 3Д виртуелни модел
Језик публикације (писмо):	Српски (латиница)
Физички опис рада:	Унети број: Страница 88 Поглавља 12 Референци 127 Табела 2 Слика 61 Графикона 0 Прилога 2
Научна област:	Рачунарска графика
Ужа научна област (научна дисциплина):	Рачунарска графика
Кључне речи / предметна одредница:	дигитализација; ауторска права; 3Д виртуелни модел; скулптура; културно наслеђе; <i>watermark</i> ; фотограметрија; 3Д дигитализација; визуелна перцепција
Резиме на језику рада:	Ово истраживање има за циљ креирање приступа за заштиту виртуелних 3Д модела од злоупотребе доступних широког аудиторјуму на интернету. Приступ предложен у истраживању је примењен на скулптури, изабраном објекту од историјског значаја. Заснива се на 3Д дигитализацији скулптуре која је измењена додавањем локалних детаља од глине, а које је предложио вајар и на дељењу на интернету 3Д виртуелног модела добијеног дигитализацијом скулптуре са уграђеним заштитним елементом. Детаљи од глине уграђени у скулптуру су асиметрични и дискретни да буду неприметни просечном посматрачу. Оригинална скулптура је такође 3Д дигитализована и генерисан је њен 3Д модел. Добијени 3Д модели су упоређени и измерено је одступање геометрије како би се утврдило у којој мери је уграђени заштитни елемент неприметан за просечног посматрача, али и да се тај елемент може детектовати и по потреби уклонити са 3Д модела са уграђеном заштитом.

¹ Аутор докторске дисертације потписао је и приложио следеће Обрасце:

5б – Изјава о ауторству;

5в – Изјава о истовестности штампане и електронске верзије и о личним подацима;

5г – Изјава о коришћењу.

Ове Изјаве се чувају на факултету у штампаном и електронском облику и не кориче се са тезом.

Датум прихватања теме од стране надлежног већа:	9.09.2021.
Датум одбране: (Попуњава одговарајућа служба)	
Чланови комисије: (титула, име, презиме, звање, институција)	Председник: др Драган Иветић , редовни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду Члан: др Игор Будак , редовни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду Члан: др Весна Стојаковић , ванредни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду Члан, ментор: др Ратко Обрадовић , редовни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду Члан, ментор: др Бранислав Попконстантиновић , редовни професор, Машински Факултет у Београду, Универзитет у Београду
Напомена:	

KEY WORD DOCUMENTATION²

Document type:	Doctoral dissertation
Author:	Ivana Vasiljević
Supervisor (title, first name, last name, position, institution)	Ratko Obradović , PhD, full professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad Branislav Popkonstantinović , PhD, full professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade
Thesis title:	Application of Non-Contact Methods for 3D Digitization of Sculpture and Watermark Embedding for Protecting a 3D Virtual Model from Abuse
Language of text (script):	Serbian language (latin script)
Physical description:	Number of: Pages 88 Chapters 12 References 127 Table 2 Illustrations 61 Graphs 0 Appendices 2
Scientific field:	Computer Graphics
Scientific subfield (scientific discipline):	Computer Graphics
Subject, Key words:	digitization; copyright; 3D virtual model; sculpture; cultural heritage; watermark; photogrammetry; 3D digitization; visual perception
Abstract in English language:	This research aims to suggest an approach for protecting virtual 3D models from abuse while making them available on the Internet. The proposed approach was applied to a sculpture, an object of cultural heritage. It is based on the digitization of the sculpture altered by adding local clay details proposed by the sculptor and on sharing on the Internet a 3D model obtained by digitizing the sculpture with a built-in error. The clay details embedded in the sculpture are asymmetrical and discreet to be unnoticeable to an average observer. The original sculpture was also digitized and its 3D model created. The obtained 3D models were compared and the geometry deviation was measured to determine that the embedded error was invisible to an average observer and that the built-in error can be extracted.

² The author of doctoral dissertation has signed the following Statements:

56 – Statement on the authority,

5B – Statement that the printed and e-version of doctoral dissertation are identical and about personal data,

5r – Statement on copyright licenses.

The paper and e-versions of Statements are held at the faculty and are not included into the printed thesis.

Accepted on Scientific Board on:	9.09.2021.
Defended: (Filled by the faculty service)	
Thesis Defend Board: (title, first name, last name, position, institution)	President: Dragan Ivetić , PhD, full professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad Member: Igor Budak , PhD, full professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad Member: Vesna Stojaković , PhD, Associate Professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad Member, mentor: Ratko Obradović , PhD, full professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad Member, mentor: Branislav Popkonstantinović , PhD, full professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade
Note:	

Zahvalnica

Ovaj rad rezultat je mog višegodišnjeg naučno-istraživačkog rada u oblasti digitalizacije kulturnog nasleđa, kao i zaštite istog. Tokom celog perioda istraživanja realizovano je nekoliko projekata u oblasti digitalizacije kulturnog nasleđa, a kao rezultat proizašao je veći broj radova prezentovanih na domaćim i međunarodnim konferencijama. Takođe, tri rada su publikovana i u odgovarajućim časopisima sa SCIE liste.

Iskrenu zahvalnost dugujem mentoru prof. dr Ratku Obradoviću koji je bio i moj savetnik na doktorskim studijama i bez čije bezrezervne stručne i moralne podrške, saveta i motivacije u teškim trenucima ovaj rad ne bi ugledao svetlost dana.

Značajnu stručnu podršku i podsticaj imala sam i od mentora prof. dr Branislava Popkonstantinovića na čemu sam mu beskrajno zahvalna.

Takođe, veliku zahvalnost dugujem članovima komisije za ocenu i odbranu doktorske disertacije prof. dr Draganu Ivetiću, prof. dr Igoru Budaku i prof. dr Vesni Stojaković koji su svojim konstruktivnim, stručnim savetima i sugestijama dali veliki doprinos pri izradi doktorske disertacije.

Posebno želim da se zahvalim i svojim prijateljima koji su sve vreme bili uz mene i imali razumevanja tokom svih ovih godina.

Na kraju, ali ne i na poslednjem mestu, neizmerno se zahvaljujem mojoj porodici, roditeljima, Vladinki i Stojanu, bratu Vladimiru i sestri Jeli, na ukazanoj bezrezervnoj podršci i razumevanju, безусловnoj ljubavi i ličnom odricanju tokom svih prethodnih godina mog školovanja i usavršavanja.

Novi Sad, 2021.

Ivana Vasiljević

Acknowledgement

This dissertation is the result of many years of my scientific research in the field of digitization of cultural heritage, as well as its protection. During the entire research period, several projects in the field of digitization of cultural heritage have been realized, and as a result, a large number of papers have been presented at domestic and international conferences. Also, three papers have been published in relevant journals from the SCIE list.

I owe my sincere gratitude to the mentor professor Ratko Obradović, who was also my advisor on doctoral studies and without whose unreserved professional and moral support, advice, and motivation in difficult moments, this work would not have seen the light of day.

I also had significant professional support and encouragement from the mentor professor Branislav Popkonstantinovic, for which I am infinitely grateful.

Also, I owe great gratitude to the members of the commission for the evaluation and defense of the doctoral dissertation: professor Dragan Ivetić, professor Igor Budak and professor Vesna Stojakovic, who, with their constructive, expert advice, and suggestion gave their great contribution to the preparation of the doctoral dissertation.

I would especially wish to thank my friends who have been with me all the time and were full of understanding during all these years.

Last but not least, I am immensely grateful to my family: parents Vladinka and Stojan, brother Vladimir, and sister Jela, for their unconditional love and support as well as personal sacrifice during all previous years of my education and training..

Novi Sad, 2021.

Ivana Vasiljević

Sadržaj

APSTRAKT	1
ABSTRACT	2
1. UVOD	3
1.1. Potreba za istraživanjem	3
1.2. Predmet istraživanja	3
1.3. Cilj istraživanja i hipoteze	5
1.4. Plan rada i faze istraživanja	6
1.5. Materijali i primenjene metode	7
1.5.1. Fotogrametrija	8
1.5.2. 3D skeniranje	16
1.6. Struktura doktorske disertacije	21
2. ANALIZA DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA U OBLASTI	22
2.1. Intelektualna svojina	22
2.2. Ugradnja zaštite od zloupotrebe u 3D virtuelni model	22
2.3. Tačnost sistema za 3D digitalizaciju i 3D štampača	26
3. KULTURNO NASLEĐE	27
3.1. 1D kulturno nasleđe	29
3.2. 2D kulturno nasleđe	29
3.3. 3D kulturno nasleđe	30
3.4. Digitalizacija u svrhu očuvanja kulturnog nasleđa	31
4. INOVATIVNI PRISTUP ZA ZAŠTITU 3D DIGITALIZOVANIH OBJEKATA KULTURNOG NASLEĐA	33
4.1. 3D digitalizacija skulpture i ugradnja zaštite od zloupotrebe u 3D virtuelni model	33
4.2. Proces 3D digitalizacije	34
4.2.1. Fotogrametrijsko snimanje	34
4.2.2. 3D digitalizacija strukturiranom svetlošću	37
5. EVALUACIJA DOBIJENIH REZULTATA	41
5.1. Geometrijske modifikacije originalnog 3D modela skulpture u softveru <i>Zbrush</i>	41
5.2. Anketa o geometrijskoj sličnosti skulptura	43
5.3. Poređenje geometrije modela dobijenih primenom skenera <i>EinScan Pro 2X</i> u <i>MeshLab</i> softveru	49
5.4. Poređenje geometrije modela dobijenih metodama fotogrametrije i strukturirane svetlosti u <i>CloudCompare</i> softveru	52
5.4.1. Poređenje modela manuelnim zadavanjem karakterističnih tačaka	53

5.4.2. Poređenje modela zadavanjem tačaka uz korišćenje ICP algoritma.....	57
6. EKSTRAKCIJA UGRAĐENE DIGITALNE ZAŠTITE IZ 3D VIRTUELNOG MODELA 63	
7. DISKUSIJA	65
7.1. Diskusija dobijenih rezultata.....	65
7.2. Mogućnost primene rezultata.....	66
8. ZAKLJUČAK I PRAVCI DALJIH ISTRAŽIVANJA	68
8.1. Zaključak.....	68
8.2. Pravci budućeg istraživanja.....	69
9. Pregled slika.....	70
10. Pregled tabela.....	73
11. Pregled korišćenih akronima.....	74
12. LITERATURA	75
PRILOZI.....	85
Spisak objavljenih naučnih radova	85
Biografija kandidata.....	88

APSTRAKT

Digitalizacija kulturnog nasleđa, posebno dvodimenzionalnog (2D), kao što su slike, fotografije, knjige, spisi i dokumenti, je uveliko rasprostranjena, samim tim postoji veliki broj različitih pristupa za zaštitu digitalizovanog kulturnog nasleđa ove vrste. Multimedijalne prezentacije 2D kulturnog nasleđa imaju za cilj da omoguće korisnicima sagledavanje umetničkog dela, odnosno, digitalizovanog objekta kulturnog nasleđa, sa više detalja i sa različitim tipovima pratećih informacija o samom delu.

Međutim, poslednjih godina sve je popularnija digitalizacija objekata kulturnog nasleđa u svrhu kreiranja virtuelnih izložbi i muzeja. Štaviše, institucije kulture koriste savremene metode digitalizacije za kreiranje trodimenzionalnih (3D) modela objekata od istorijskog značaja za formiranje digitalnih biblioteka i arhiva. Ovo istraživanje ima za cilj kreiranje pristupa za zaštitu spomenutih 3D modela od zloupotrebe istovremeno dostupnih širokom auditorijumu na internetu. Pristup predložen u istraživanju je primenjen na skulpturi, izabranom objektu od istorijskog značaja. Zasniva se na 3D digitalizaciji skulpture koja je izmenjena dodavanjem lokalnih detalja od gline, a koje je predložio vajar. Takav izmenjen 3D virtuelni model dobijen digitalizacijom skulpture sa ugrađenim zaštitnim elementom bio bi dostupan javnosti na internetu. Detalji od gline ugrađeni u skulpturu su asimetrični i diskretni da budu neprimetni prosečnom posmatraču. Originalna skulptura je takođe 3D digitalizovana i generisan je njen 3D model. Dobijeni 3D modeli su upoređeni i izmereno je odstupanje geometrije kako bi se utvrdilo u kojoj meri je ugrađeni zaštitni element neprimetan za prosečnog posmatrača, ali i da se ugrađeni element može detektovati i po potrebi ukloniti sa 3D modela u koji je ugrađen. Predloženi pristup istovremeno vrši zaštitu i čuva digitalizovane 3D modele skulptura, odnosno njihove 2D slike, uz očuvanje vizuelnog doživljaj tog umetničkog dela. Drugi postojeći pristupi to ne mogu garantovati.

Predloženi pristup je primenljiv i na druge vrste objekata 3D kulturnog nasleđa.

Ključne reči: digitalizacija; autorska prava; 3D virtuelni model; skulptura; kulturno nasleđe; watermark; fotogrametrija; 3D digitalizacija; vizuelna percepcija

ABSTRACT

Digitization of cultural heritage, especially two-dimensional (2D), such as paintings, photographs, books, writings, and documents, is widespread, so there are a large number of different approaches for the protection of the digitized cultural heritage of this kind. Multimedia presentations of 2D cultural heritage aim to enable users to view the work of art, that is, the digitized object of cultural heritage, in a higher level of detail and with different types of accompanying information about the work.

In recent years, the digitization of cultural heritage objects, for the purpose of creating virtual exhibitions and museums, is becoming increasingly popular. Moreover, cultural institutions use modern digitization methods to create three-dimensional (3D) models of objects of historical significance to form digital libraries and archives. This research aims to suggest a approach for protecting these 3D models from abuse while making them available on the Internet. The proposed approach was applied to a sculpture, an object of cultural heritage. It is based on the digitization of the sculpture altered by adding local clay details proposed by the sculptor. Such a modified 3D virtual model obtained by digitizing a sculpture with a built-in error would be available to the public on the Internet. The clay details embedded in the sculpture are asymmetrical and discreet to be unnoticeable to an average observer. The original sculpture was also digitized and its 3D model created. The obtained 3D models were compared and the geometry deviation was measured to determine that the embedded error was invisible to an average observer and that the built-in error can be extracted. The proposed approach simultaneously protects and preserves digitized 3D models of sculptures, i.e. their 2D images, while preserving the visual experience of that work of art. Other existing methods cannot guarantee this.

The proposed approach is applicable to other types of objects of three-dimensional cultural heritage.

Keywords: digitization; copyright; 3D virtual model; sculpture; cultural heritage; watermark; photogrammetry; 3D digitization; visual perception

1. UVOD

1.1. Potreba za istraživanjem

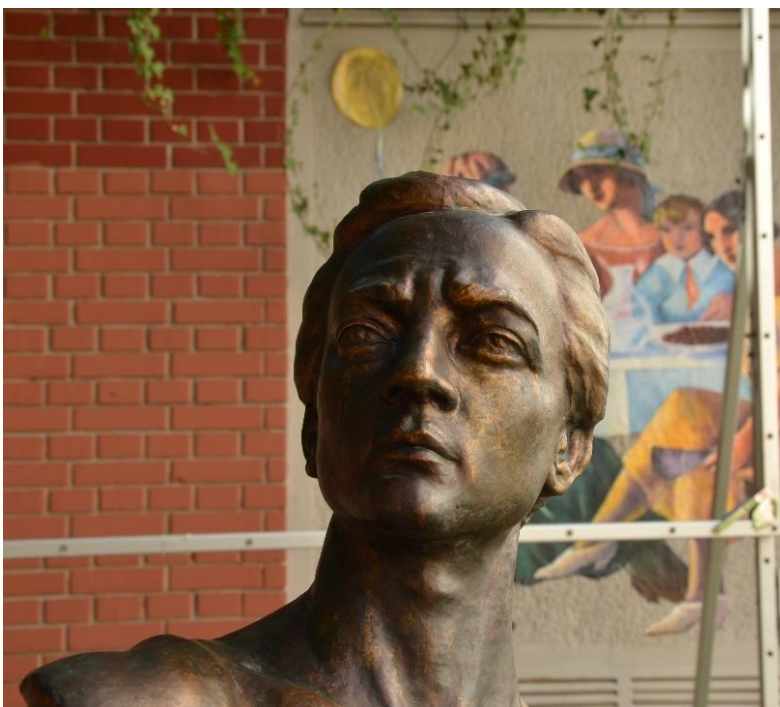
Intenzivan razvoj tehnika za trodimenzionalno (3D) modelovanje i 3D digitalizaciju kulturnog nasleđa (pokretnog i nepokretnog), kao što je fotogrametrija [1], uslovio je pokretanje pitanja o zaštiti i pravima preuzimanja dobijenih 3D modela. Iako je problem zaštite podataka od krađe i zloupotrebe ranije rešavan za niz drugih vrsta digitalnih informacija (softveri, softverski kod, audio i video datoteke) [2] mali broj rešenja je kreiran za zaštitu 3D modela. Potreba za zaštitom 3D modela značajno raste zajedno sa porastom primene 3D digitalizacije objekata kulturnog nasleđa, koja je u poslednjih nekoliko godina doživela procvat. Sve više ustanova kulture koristi spomenute savremene metode 3D digitalizacije za kreiranje visokokvalitetnih, realističnih 3D modela objekata od istorijskog značaja. Sve je više projekata koji su finansirani/podržani od strane države, kulturnih institucija i nadležnog Ministarstva, a bazirani su na digitalizaciji kulturnog nasleđa i kreiranju digitalnih biblioteka i arhiva [3-5]. Takođe, kreiranje virtuelnih muzeja [6-11] i virtuelnih prezentacija kulturnog nasleđa uz korišćenje inovativnih tehnologija, kao što su virtualna i proširena realnost postaje sve popularnije [12-14]. Svi 3D modeli nastali 3D digitalizacijom objekata u okviru takvih projekata su nasleđe kulturnih institucija i država, a ugovor dozvoljava distribuciju dobijenih 3D modela određenoj grupi ljudi (uglavnom zaposlenim u ustanovama kulture ili naučnicima) za nekomercijalnu upotrebu. Iako bi većina populacije želela da 3D modeli budu široko dostupni kako bi bili korišćeni u različite svrhe, pa i komercijalne, 3D modeli objekata od kulturnog značaja mogu biti zloupotrebjeni ako se distribuiraju bez zaštite. Takođe, strah od kopiranja njihovog rada i krađe ideja (na osnovu 3D modela) zastupljen je i kod kustosa.

1.2. Predmet istraživanja

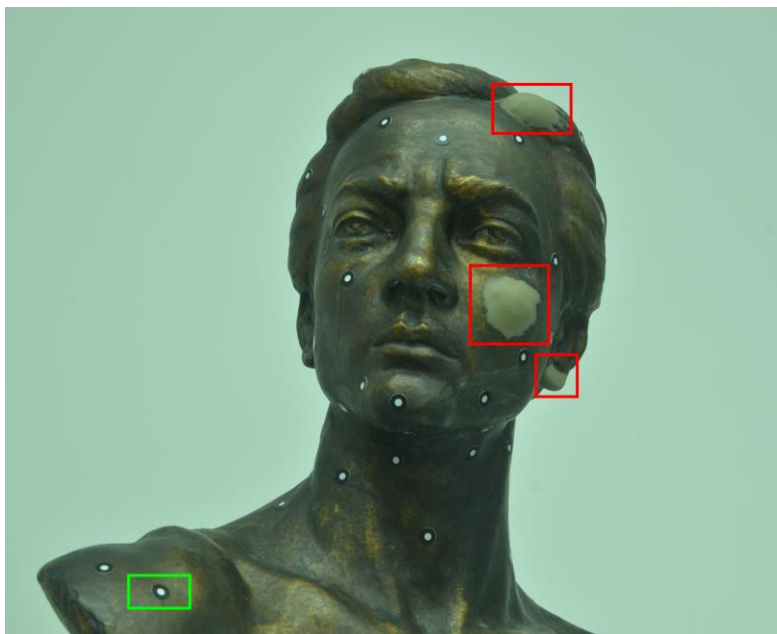
U okviru ovog istraživanja, na primeru skulpture prikazane na slici 1, biće opisano i prikazano idejno rešenje za zaštitu 3D modela nastalih 3D digitalizacijom kulturnog nasleđa (odnosno, 3D modela uopšte) od zloupotrebe i kopiranja. Skulptura prikazuje gornji deo ljudske figure (glavu, vrat i deo torza), izlivena je u gipsu. Objektom dominira zlatno-žuta boja, ali i tamnije nijanse braon boje. Akcenat je bio na 3D digitalizaciji glave/lica skulpture, gabaritnih dimenzija: širina \times visina \times dubina = 203mm \times 254mm \times 203mm. Ideja je da se na delove skulpture dodaju mase glinom u boji koja odgovara boji skulpture. Kustos (vajar) iz Galerije Matice srpske, koja je reprezentativna institucija kulture, je podržao ideju kao smisljeno rešenje i njegov predlog bio je da se te mase dodaju na pramen kose (na levoj strani), ušnu resicu (na levoj strani) i na jagodicu (na levoj strani), odnosno na delove gde bi te mase prosečnom posmatraču bile neprimetne. Takođe, vođeno je računa o količini gline koja je naneta iz istog razloga. Delovi od gline dodati su na levoj strani skulpture iz razloga što je ljudska figura koju skulptura prikazuje predstavljena iz poluprofila gde se leva strana više vidi ako skulpturu posmatramo frontalno. Pažnja je bila usmerena i na to da se skulptura ne ošteti, kako u toku nanošenja gline, tako i u samom procesu 3D digitalizacije. Kod 3D digitalizacije objekata kulturnog nasleđa, kontaktne metode nisu

prihvatljive zbog mogućeg nenamernog oštećenja. Iz tog razloga prednost se daje beskontaktnim metodama za 3D digitalizaciju. Zbog svoje relativne jednostavnosti i potrebe za minimalnim hardverskim i softverskim resursima, kao i zadovoljavajuće tačnosti, fotogrametrija predstavlja jedno od boljih dostupnih rešenja za 3D digitalizaciju. Osim fotogrametrije, u ovom slučaju, 3D digitalizacija strukturiranom svetlošću (eng. *fringe projection method*) predstavlja takođe dobro rešenje.

U većini aktuelnih istraživanja u ovoj oblasti [83-104], ugradnja digitalne greške (eng. *watermark embedding*) 3D modela vrši se pomoću različitih matematičkih pristupa i algoritama, gde se svakom objektu pristupa na isti način i algoritam uglavnom transformiše pozicije čvorova na mreži digitalnog 3D modela. Za razliku od spomenutih algoritama, pretpostavka je da je pojedinačni pristup svakom umetničkom 3D delu dobar pristup za prezentaciju kulturnog nasleđa, ali i očuvanju istog od zloupotrebe. Na slici 2 prikazana je skulptura sa ugrađenom greškom od strane vajara.



Slika 1. Digitalizovana skulptura (originalna skulptura)



Slika 2. Skulptura sa ugrađenom greškom – detalji od gline označeni su crvenim pravougaonicima i markeri za potrebe 3D digitalizacije označeni su zelenim pravougaonikom

1.3. Cilj istraživanja i hipoteze

Cilj istraživanja predstavlja kreiranje novog pristupa u zaštiti digitalizovanog 3D pokretnog kulturnog nasleđa koji lokalizuje zaštitu kako bi se očuvao vizuelni identitet umetničkog dela za razliku od postojećih zaštita ugradnjom *watermark*-a. Ovaj pristup moguće je primeniti na različite tipove objekata pokretnog i nepokretnog kulturnog nasleđa. Uprkos rastućoj potrebi za zaštitu od zloupotrebe digitalnih 3D modela kulturnog nasleđa, mali je broj istraživanja koja se bave ovom problematikom. Na osnovu dosadašnjih istraživanja postojećih pristupa i kreiranih algoritama, razvijen je pristup za kreiranje 3D modela skulpture sa umetnički dodatim fizičkim elementom zaštite, koja će biti izložena na uvid javnosti. Umetnički vođeno dodavanje zaštitnog elementa pretpostavlja da prosečni posmatrač, odnosno, posetilac muzeja i kulturnih institucija i njihovih internet prezentacija, ne bi primetio na modelu digitalni zaštitni element koji je dodat. Posebno što na sajt ne bi bio postavljen 3D model originalne skulpture, pa prema tome ne bi bilo ni moguće poređenje skulpture sa ugrađenim zaštitnim elementom sa originalnom skulpturom. Važno je reći da 3D model originalne skulpture nikako ne sme biti dostupan javnosti na internetu već mora biti arhiviran i zaštićen od strane onih koji su i digitalizovali tu skulpturu. To znači da 3D model originalne skulpture neće ni biti postavljen na server na kojem se nalazi prezentacija institucije kulture. Na ovaj način šira javnost bi imala priliku da posmatra, analizira i uživa u svim lepotama mnogih umetničkih dela koja su deo kulturnog nasleđa, ali bez mogućnosti njihove zloupotrebe. Pretpostavka je, takođe, da posmatrači umetničkog dela nemaju potrebu da percipiraju geometrijski tačan (veran) 3D model skulpture i da neće biti lišeni doživljaja lepote umetničkog dela.

Mada je digitalizacija kulturnog nasleđa uzela maha, ona se za sada dominantno odnosi na digitalizaciju dvodimenzionalnog (2D) kulturnog nasleđa, poput slika, fotografija, knjiga. Za zaštitu ovakvih 2D digitalnih modela postoje različiti algoritmi. S druge strane, digitalizacija trodimenzionalnog kulturnog nasleđa još uvek nije tako masovna pojava. Osnovna hipoteza ovog rada jeste da je moguće digitalizovati 3D kulturno nasleđe i istovremeno omogućiti zaštitu digitalnog 3D modela od zloupotrebe ili krađe. Mada je dominantna tehnika zaštite 3D modela kreiranje tzv. *watermark*-a, a ova tehnika podrazumeva kreiranje šuma preko cele površine modela korišćenjem različitih matematičkih algoritama. Na taj način narušava se estetski doživljaj modela sa ugrađenim *watermark*-om.

Druga hipoteza ovog rada jeste da je drugačijim pristupom u zaštiti 3D digitalnih modela moguće očuvati estetski doživljaj umetničkog dela. Da bi bila potvrđena ova hipoteza urađena je anketa u kojoj je učestvovalo 195 ispitanika, a postupak tokom ankete i sami rezultati prikazani su u petom poglavlju.

Treća hipoteza rada jeste da je moguće kreirati postupak kojim se utvrđuje da li je 3D digitalni model prikazan na internetu, odnosno njegova fizička reprodukcija, original ili falsifikat. Detalji o ovom postupku prikazani su u šestom poglavlju.

1.4. Plan rada i faze istraživanja

Izrada doktorske disertacije obuhvata sledeće faze istraživanja:

1. Teorijska istraživanja

U cilju pravilne sistematizacije različitih pristupa i metoda za ugradnju zaštite od zloupotrebe u 3D virtuelne modele, u okviru doktorske disertacije prvo je urađena analiza aktuelne naučne literature. Sastavni deo analize su i istraživanja iz oblasti digitalizacije kulturnog nasleđa, ali i o zaštiti autorskih prava. Prema tematici analizirana istraživanja podeljena su u četiri grupe, a to su:

- istraživanja u oblasti zaštite autorskih prava;
- istraživanja u oblasti 3D digitalizacije kulturnog nasleđa fotogrametrijom i strukturiranom svetlošću;
- istraživanja o vizuelizaciji kulturnog nasleđa (kreiranje virtuelnih prezentacija, biblioteka i muzeja);
- istraživanja o zaštiti virtuelnih 3D modela objekata kulturnog nasleđa od zloupotrebe, a koji su izloženi javnosti na uvid.

2. Razvoj konceptualnog rešenja

Nakon analize aktuelnih istraživanja u oblasti 3D digitalizacije kulturnog nasleđa, kao i zaštite virtuelnih 3D modela izloženih javnosti na uvid, kreiran je novi pristup koji je tema doktorske disertacije, a razvoj konceptualnog rešenja sastoji se iz sledećih faza:

- Odabir skulpture pogodne za analizu u okviru istraživanja, sa aspekta oblika, bez uzimanja u obzir informacije o teksturi umetničkog dela;
- 3D digitalizacija odabrane skulpture;
- Saradnja sa kustosom (vajarom) i kreiranje jedinstvenog lokalnog zaštitnog elementa na skulpturi (eng. *digital built-in error*);
- 3D digitalizacija skulpture sa ugrađenom zaštitnim elementom (VAJ_GRE);
- Digitalno kreiranje zaštitnog elementa koja se kreira na 3D modelu originalne skulpture (VAJ_ZBR). Teži se da ova greška bude identična sa ugrađenom “vajarskom greškom”;
- Softversko poređenje dobijenih 3D modela skulpture sa ugrađenim zaštitnim elementom (VAJ_GRE) i originalne skulpture (ORIG);
- Softversko poređenje dobijenih 3D modela skulpture primenom metoda fotogrametrije i strukturirane svetlosti;
- Evaluacija i procena preciznosti posmatranih 3D modela skulpture sa ugrađenim zaštitnim elementom (VAJ_GRE) i originalnog modela (ORIG);
- Evaluacija i procena preciznosti dobijenih modela na osnovu različitih pristupa 3D digitalizacije (fotogrametrija i strukturirana svetlost);
- Evaluacija i procena preciznosti dodatog digitalnog zaštitnog elementa (VAJ_ZBR) u odnosu na dodatnu „vajarsku grešku“ (VAJ_GRE);
- Anketa o geometrijskoj sličnosti (radi vizuelnog poređenja) 3D modela originalne skulpture (ORIG) i skulpture sa ugrađenim zaštitnim elementom (VAJ_GRE).

3. Ekstrakcija ugrađene digitalne greške iz 3D virtuelnog modela

U okviru ove faze cilj je da se prikaže način ekstrakcije ugrađenog zaštitnog elementa u 3D virtuelni model, uz pomoć kojeg se može lako utvrditi da li je 3D model prikazan na internetu ili odštampan, original ili falsifikat.

1.5. Materijali i primenjene metode

U okviru doktorske disertacije analizirani su postojeći pristupi zaštite 3D modela objekata kulturnog nasleđa koji su izloženi na uvid javnosti u okviru virtuelnih izložbi i muzeja i kreiran je novi i jedinstveni pristup ugradnje “vajarske greške“ u saradnji sa vajarom iz Galerije Matice srpske u Novom Sadu. Takođe, analizirani su Zakoni i metode zaštite autorskih prava. Primena fotogrametrijskog snimanja i modelovanja, kao i 3D digitalizacija strukturiranom svetlošću prikazani su na primeru skulpture koja je u vlasništvu Galerije Matice srpske. Procesi snimanja, modelovanja i softverskog poređenja dobijenih 3D modela biće detaljno opisani u narednim poglavljima, gde fotografisanje skulpture predstavlja početnu fazu, odnosno korak prikupljanja podataka o originalnoj skulpturi i skulpturi sa ugrađenom “vajarskom greškom”. Poseban akcenat je na analizi zajedničkih karakteristika, kao i specifičnostima oba korišćena pristupa 3D digitalizacije skulpture. Realizovani su analiza i procena preciznosti 3D modela originalne i

skulpture sa ugrađenim zaštitnim elementom, kako bi i softverski bila potvrđena hipoteza da “vajarska greška” (dodata glina na skulpturi) ne narušava vizuelni identitet i estetiku umetničkog dela. Takođe, analizirani su dobijeni 3D modeli radi vizuelnog poređenja sa još tri skulpture koje su dobijene modifikovanjem 3D modela originalne skulpture u softveru *Zbrush* [15] koji je specijalizovan za digitalno vajanje. Ova analiza urađena je pomoću ankete u kojoj je učestvovalo 195 ispitanika, a koji su imali mogućnost da istovremeno posmatraju svih pet verzija 3D modela skulpture.

1.5.1. Fotogrametrija

Danas, sa razvojem softvera za 3D rekonstrukciju i obradu slika, fotogrametrija je postala relativno jednostavna i jeftina metoda za kreiranje 3D virtuelnih modela kulturnog nasleđa [16]. Veliki značaj fotogrametrije za kreiranje 3D virtuelnih modela objekata kulturnog nasleđa leži u činjenici da je to beskontaktna metoda. Kod fotogrametrije se, na bazi obrađenog skupa slika, kreira 3D geometrija objekta. Taj proces se izvodi automatizovano u specijalizovanim softverima. Popularni softveri za fotogrametriju su intuitivni za upotrebu, a korisnicima nude veći broj naprednih alata. Danas je dostupan veći broj različitih besplatnih softvera za modelovanje na osnovu slika, kao što su *AliceVision*, *VisualSFM*, *COLMAP*, *OpenMVS* i *Regard 3D*, kao i komercijalnih softvera, poput *Reality Capture*, *Autodesk Recap Photo*, *Context Capture*, i *AgiSoft Metashape* [17–20]. Treba spomenuti i *GRAPHOS*, automatski besplatni softver sa dobro razvijenom edukativnom komponentom i naprednim automatskim alatima za fotogrametrijsku rekonstrukciju [21]. Da bi se dobio precizan, detaljan i fotorealističan 3D model koji je koristan za vizualizaciju ili arhivsku dokumentaciju, potrebno je zadovoljiti određene kriterijume [22]. Estimacija strukture iz pokreta (eng. *Structure from Motion* - SfM) je metoda za fotogrametrijsko snimanje u kojoj se moraju uz pomoć unapred kreiranog plana snimanja precizno odrediti položaji i orijentacija kamere za fotografisanje objekta. Pri obradi podataka, softver određuje položaje i orijentacije kamere sa fotografija na bazi ključnih tačaka (eng. *key features*) prepoznatih na više (bar dve) slika, da bi se u drugoj iteraciji te izračunate pozicije iskoristile za dopunu oblaka tačaka uključivanjem manje karakterističnih obeležja (eng. *features*). Pažljivo planiranje i pravilno prikupljanje fotografija omogućavaju generisanje tačnih i realističnih modela sa 3D teksturom sa korišćenjem pristupačne fotografske opreme [23,24]. To znači da se posebna pažnja mora posvetiti kreiranju plana snimanja [22]. Jedan od faktora koji fotogrametrijsko snimanje favorizuje je difuzno osvetljenje. Stoga, precizno kreiran plan snimanja i difuzno osvetljenje garantuju uspešno fotogrametrijsko snimanje. Nakon prikupljanja fotografija, fotogrametrijska rekonstrukcija se vrši u nekoliko glavnih koraka: izgradnja gustog oblaka tačaka, generisanje 3D modela i kreiranje teksture na osnovu fotografija. Konačni rezultat fotogrametrijskog modelovanja je visoko detaljan i realan prikaz geometrije objekta (njegov 3D model), sa realističnom teksturom [12].

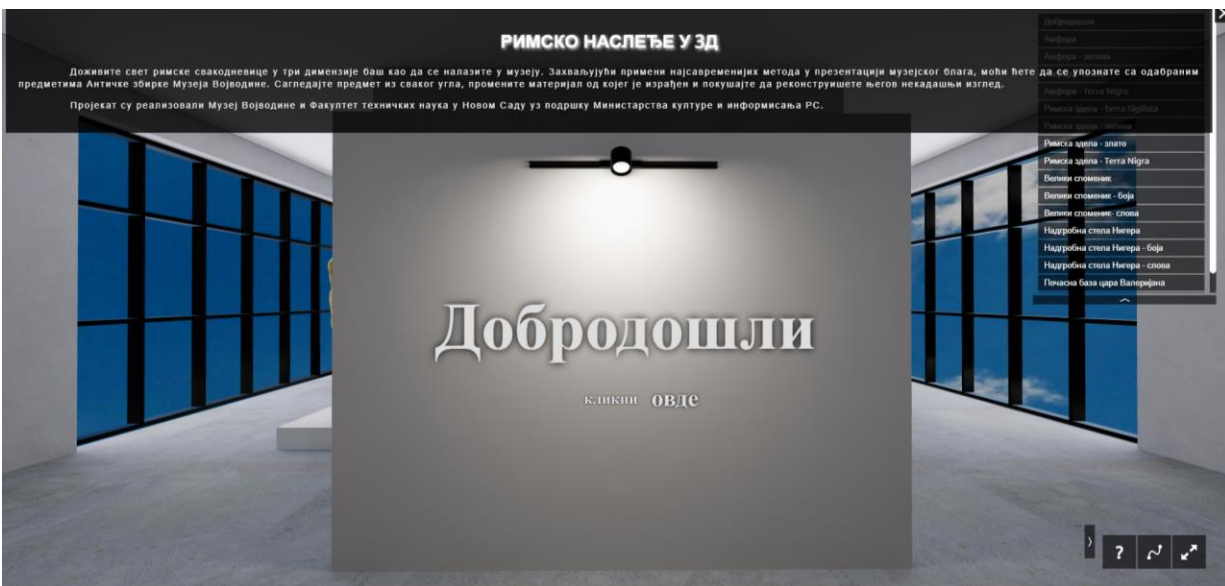
Globalni izazov za sve industrije u svetu je da se što više povežu sa svojim korisnicima kako u realnom, tako i u virtuelnom svetu. Iz tog razloga se sve češće u te svrhe koriste modeli koji su realistični, a dobijeni su fotogrametrijskom rekonstrukcijom. Na prvom mestu tu spada 3D

digitalizacija kulturnog nasleđa, zatim slede muzeji i umetničke galerije koji kreiraju virtuelne ture i izložbe, industrijski dizajn, vesti i novinarstvo, naftna i gasna industrija, *online* kupovina, turizam, građevinarstvo i arhitektura, marketing i oglašavanje, obuka i obrazovanje, film, igre i zabava [25].

Kulturno nasleđe suočava se sa izazovima kao što su prirodne katastrofe, starenje, oružani sukobi, itd. Takođe, ograničenje kretanja usled pandemije korona virusa, podstaklo je sve više interesovanja i javnog finansiranja od strane ustanova kulture i nadležnog Ministarstva ka digitalizaciji (slika 3). Sve češće muzeji i galerije pribegavaju kreiranju virtuelnih izložbi i tura (slika 4) i na taj način pokušavaju da popularizuju posete takvim ustanovama rušeći fizičku barijeru distance sa svojim korisnicima.



Slika 3. Digitalizacija kulturnog nasleđa - primer [26]



a)



b)

Slika 4. Primer upotrebe 3D modela dobijenih fotogrametrijom za potrebe virtuelne izložbe Muzeja Vojvodine:
a) početna strana; **b)** 3D model dobijen fotogrametrijom

Što se tiče obrazovanja, 3D modeli dobijeni fotogrametrijom primenjivi su u oblastima kao što je građevinarstvo, geodezija i geomatika [27] i arhitektura. Konkretno, u radu [28] je predstavljen novi pristup primene fotogrametrije za potrebe proučavanja arhitektonskog merenja i dizajna koji se među studentima pokazao kao dobar pristup za učenje (slika 5).



Slika 5. Primena fotogrametrije za arhitektonsko merenje – mere dobijene fotogrametrijom poklapaju se sa realnim [28]

Fotogrametrijske 3D modele ikonostasa (slika 6) moguće je matematički opisati i klasifikovati karakteristike oblika glavnih arhitektonskih elemenata istih, u svrhu određivanja umetničkog perioda kojem ikonostas pripada. Ideja je da se dizajnira odgovarajući pristup koji će preko više deskriptora oblika omogućiti numeričku procenu razmatranih karakteristika oblika [29].



Slika 6. Ortofoto 3D modela ikonostasa sa istaknutim karakterističnim oblicima ikona koji se koriste u analizi oblika

U edukativne svrhe u oblasti geodezije, za kreiranje simulacije snimanja terena (slika 7) iz vazduha primenjuje se takozvana vazдушna fotogrametrija (eng. *aerial photogrammetry*) [30].



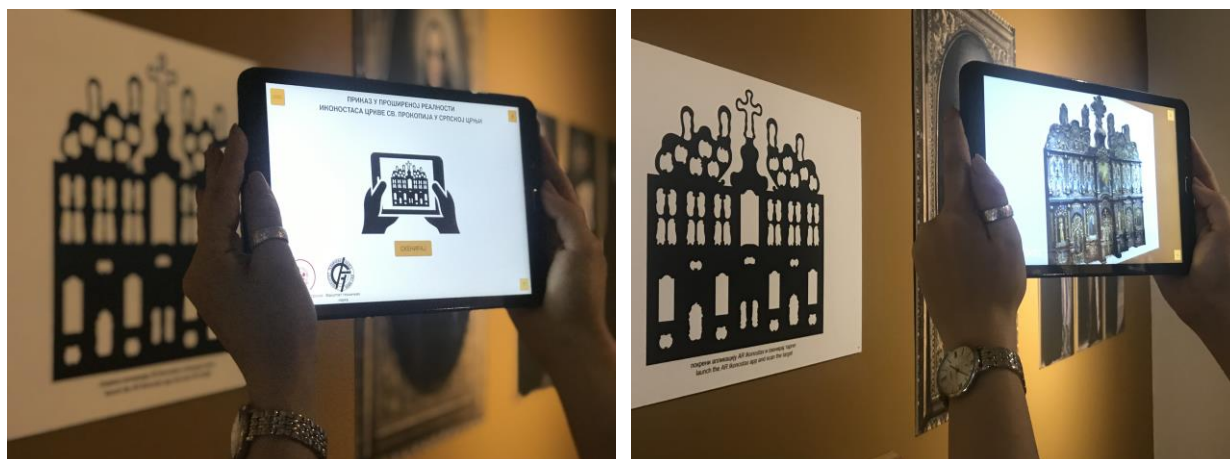
Slika 7. Simulacija snimanja terena iz vazduha [31]

Ovakav pristup i inače se koristi za potrebe snimanja terena iz vazduha. Kreiranje terena na osnovu satelitskih snimaka može se uraditi i korišćenjem fotogrametrije u kombinaciji sa proceduralnim modelovanjem [31]. Primer ovakvog kombinovanog modelovanje prikazan je na slici 8. Pojam proceduralno, u računarskoj grafici, definiše sve procese urađene automatski, a ne ručno. Kod ovakvog načina modelovanja scene ili predmeti za igre, simulacije ili filmove kreiraju se prema unapred definisanim obrascima i algoritmima [32]. Ulazne parametre definiše korisnik. Na ovaj način rešavaju se kompleksni problemi i kreiraju se definicije koje skraćuju vreme izvršenja kada su u pitanju procesi koji se ponavljaju.



Slika 8. 3D model dobijen korišćenjem fotogrametrije u kombinaciji sa proceduralnim modelovanjem [31]

Za potrebe različitih vrsta obuka u različitim oblastima koje se izučavaju, primena fotogrametrije u kombinaciji sa modernim tehnologijama, kao što su virtuelna i proširena realnost (slike 9 i 10) postaje sve popularnije [33,34].



Slika 9. 3D model ikonostasa dobijen fotogrametrijom korišćen za potrebe virtuelne prezentacije u proširenoj realnosti



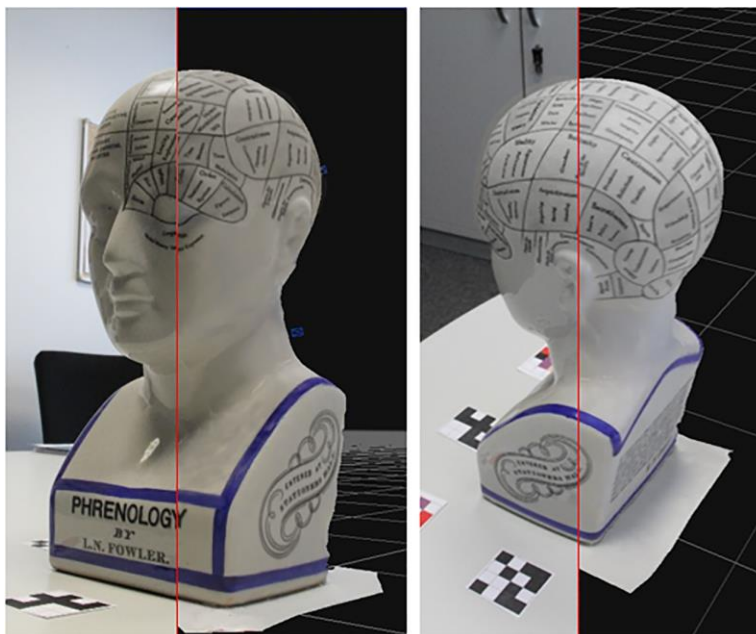
Slika 10. 3D model ikonostasa dobijen fotogrametrijom korišćen za potrebe virtuelne prezentacije u virtuelnoj realnosti

Jedna od oblasti primene fotogrametrije za obuku, odnosno, 3D modela dobijenih fotogrametrijom je i veterinarska ortopedija, (slika 11) [35].



Slika 11. Primena fotogrametrijskih 3D modela u oblasti veterinarske ortopedije [35]

Kako se uz primenu fotogrametrije dobijaju realistični modeli koji verno imitiraju realnost, pronašli su primenu i u istraživanjima u oblasti kognitivne psihologije [36]. Upotreba ovakvih 3D modela može značajno da utiče i menja kognitivnu obradu podataka u procesu učenja (slika 12).



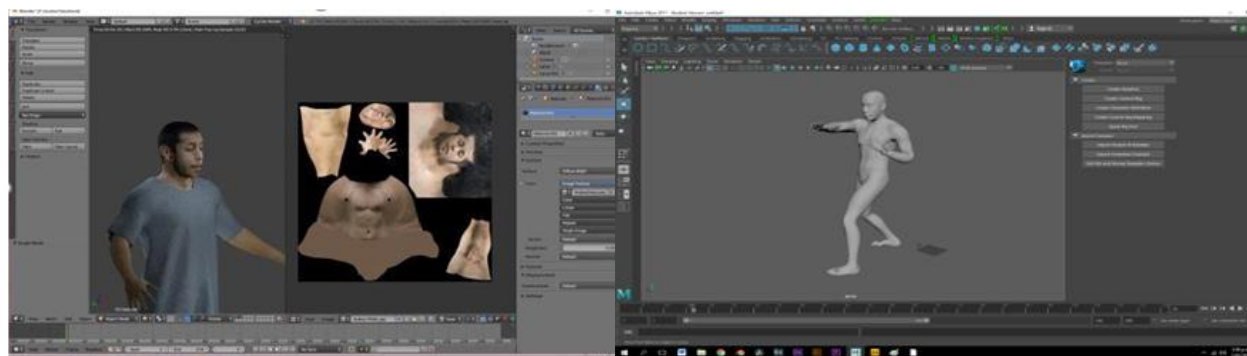
Slika 12. Primer primene 3D modela dobijenih fotogrametrijom u psihologiji [36]

U video igrama (slika 13), fotogrametrija se primenjuje za kreiranje 3D modela ljudi koji se koriste kao avatari [37].



Slika 13. Primer avatara u video igri dobijenog fotogrametrijom [37]

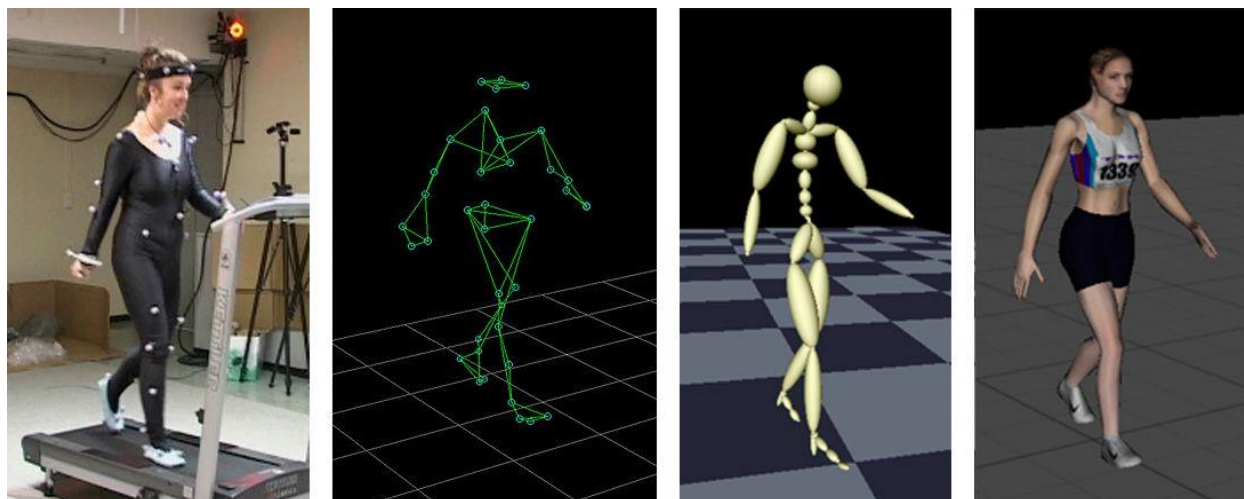
U filmskoj industriji realistični 3D modeli glumaca dobijeni fotogrametrijom koriste se kao digitani dvojnici istih, primer prikazan na slici 14. To znači da se za snimanje scena koje su rizične ili kada glumci nisu u mogućnosti da prisustvuju snimanju, njihovi digitalni dvojnici naknadno dodaju u snimak [38]. Pokreti glumaca dodaju se uz korišćenje *Motion Capture* (MOCAP) sistema [39]. *Motion Capture* sistem ili sistem za akviziciju pokreta koristi se za snimanje pokreta subjekata (ljudi ili životinja) u realnom svetu, a zatim se podaci snimljenog kretanja prenose, u odgovarajućem softveru, na 3D virtuelni model. Osnovni elementi koje sistem mora da sadrži su: kamere (infracrvene i video), aktivni štapi, reflektivni marker, giganet stanica, upravljački računar, odgovarajući softver za obradu podataka. Na subjekat koji se snima, lepe se reflektivni marker na karakteristične delove, kamere prate i beleže pozicije markera u toku vremena i na taj način zapravo prikupljaju podatke o pokretu (slika 15).



a)

b)

Slika 14. Digitalni dvojnik glumca: a) 3D model dobijen fotogrametrijom; b) pokret digitalnog karaktera kreiran uz korišćenje MOCAP sistema [38]



Slika 15. Primer akvizicije i aplikacije podataka u MOCAP sistemu [40]

1.5.2. 3D skeniranje

Poslednjih godina 3D skeniranje postalo je široko rasprostranjena tehnika prikupljanja informacija o obliku objekata kulturnog nasleđa (slika 16), u oblastima malih istorijskih objekata [41–43], skulptura [44–47], prostorija [48,49] ili velikih zgrada i čitavih arhitektonskih nalazišta [50–53]. Tehnologija strukturiranog osvetljenja pogodna je za digitalizaciju objekata kulturnog nasleđa jer je beskontaktna metoda za 3D digitalizaciju [54]. Drugi razlog za široku upotrebu 3D skenera u digitalizaciji kulturnog nasleđa je visoka preciznost dobijenih modela [55, 56] i činjenica da se 3D model može dobiti relativno brzo [57]. Rezultati skeniranja su vidljivi u realnom vremenu u odgovarajućem softveru koji je kreiran za naknadnu obradu prikupljenih podataka. Tehnika 3D skeniranja razvijena je tokom poslednje polovine 20. veka u pokušaju precizne rekonstrukcije površina različitih objekata [58]. 3D skeneri koji rade na principu strukturirane svetlosti (eng. *digital fringe projection*) projektuju kodirani šablon (eng. *pattern*) svetlosti na objekat, beleže deformaciju uzorka na objektu i na taj način prikupljaju podatke o obliku predmeta koji se skenira. Skener koji koristi posebnu tehniku strukturiranog svetla sa kodiranim uzorcima razvijen je za snimanje, rekonstrukciju i rendering detalja objekata velike kompleksnosti [59].



Slika 16. Odštampan ornament čiji je 3D model dobijen tehnikom 3D skeniranja strukturiranom svetlošću [60]

Tehnika 3D skeniranja strukturiranom svetlošću se ne koristi samo u svrhe 3D digitalizacije kulturnog nasleđa. Zbog visoke preciznosti i nivoa detalja, modeli dobijeni ovakvim načinom 3D digitalizacije imaju široku upotrebu. Istraživanja [61-63] pokazuju da se modeli dobijeni 3D skeniranjem najviše koriste u inženjerskim strukama, zatim u medicini i stomatologiji. U oblasti medicine, 3D modeli dobijeni 3D skeniranjem našli su primenu u ortopediji, za izradu protetičkih stopala (slika 17) koja se izrađuju po meri [64].



Slika 17. Primena 3D modela dobijenog 3D skeniranjem u ortopediji [64]

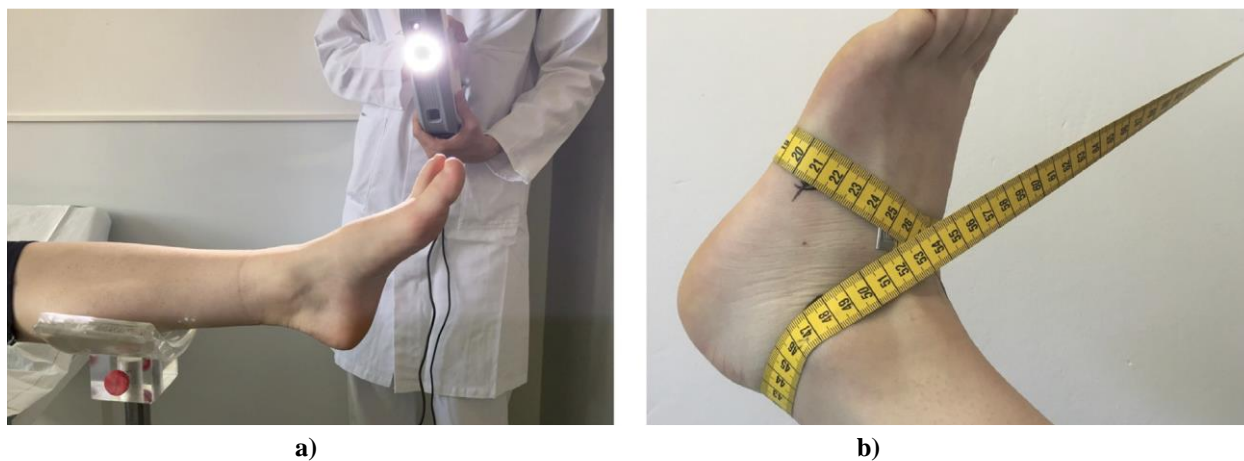
Naime, pored protetičkih stopala mogu se izrađivati protetičke ušne školjke (slika 18) i drugi delovi tela [65].



Slika 18. Protetičko uho: **a)** virtuelni 3D model; **b)** odštampan 3D model [65]

Određivanje i merenje deformacije stopala, ali i zaštitne obuće kod populacije starije od 60 godina vrši se na digitalizovanim modelima koji su dobijeni 3D skeniranjem [66,67].

Procena volumena regije stopala i skočnog zgloba (slika 19) u kliničkim uslovima kod bolesnika koji usled bolesti imaju problem sa edemom (otokom) može se vršiti uz pomoć 3D skenera [68].



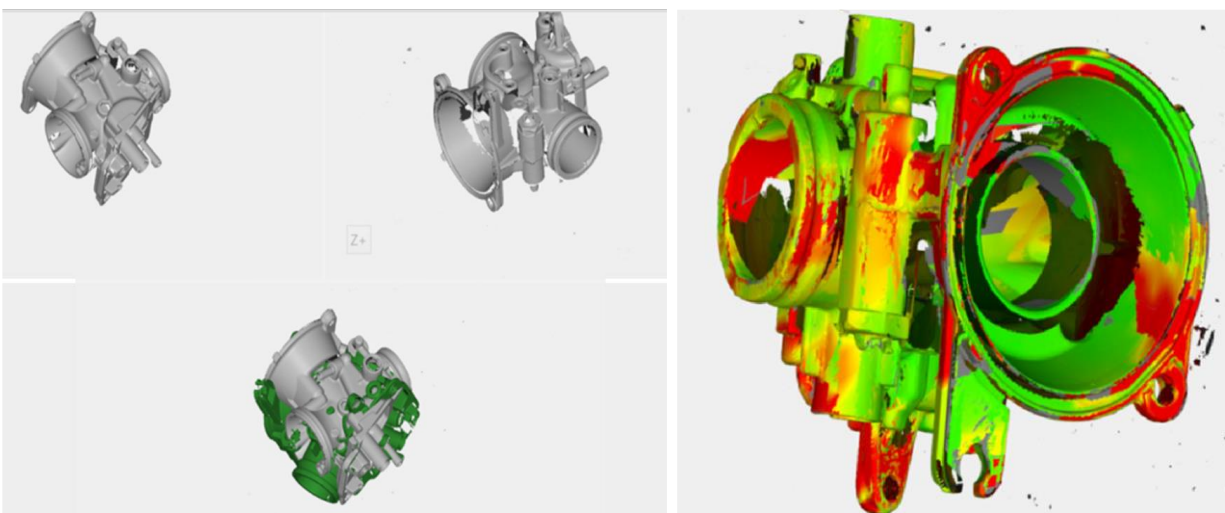
Slika 19. Eksperimentalna postavka za određivanje volumena regije stopala i skočnog zgloba: **a)** pozicioniranje pacijenta za potrebe skeniranja; **b)** pravilno pozicioniranje trake duž stopala i skočnog zgloba pomoću metoda osmice [68]

Pravilno i temeljno dokumentovanje mesta zločina (slika 20) je od najveće važnosti za razotkrivanje zločina, ali proces jeste često kompleksan i radno intenzivan. Tehnika 3D skeniranja omogućava brzo kreiranje visoko detaljnih 3D modela fizičkog okruženja. Poslednjih godina, usvajanje tehnike 3D skeniranja se širi i među jedinicama za istraživanje mesta zločina (eng. *Crime Scene Investigation* - CSI) širom sveta kako bi se pomoglo u istražnom procesu. Ova tehnologija omogućava istražiteljima da detaljnije analiziraju mesta zločina pomoću skeniranog 3D modela [69,70].



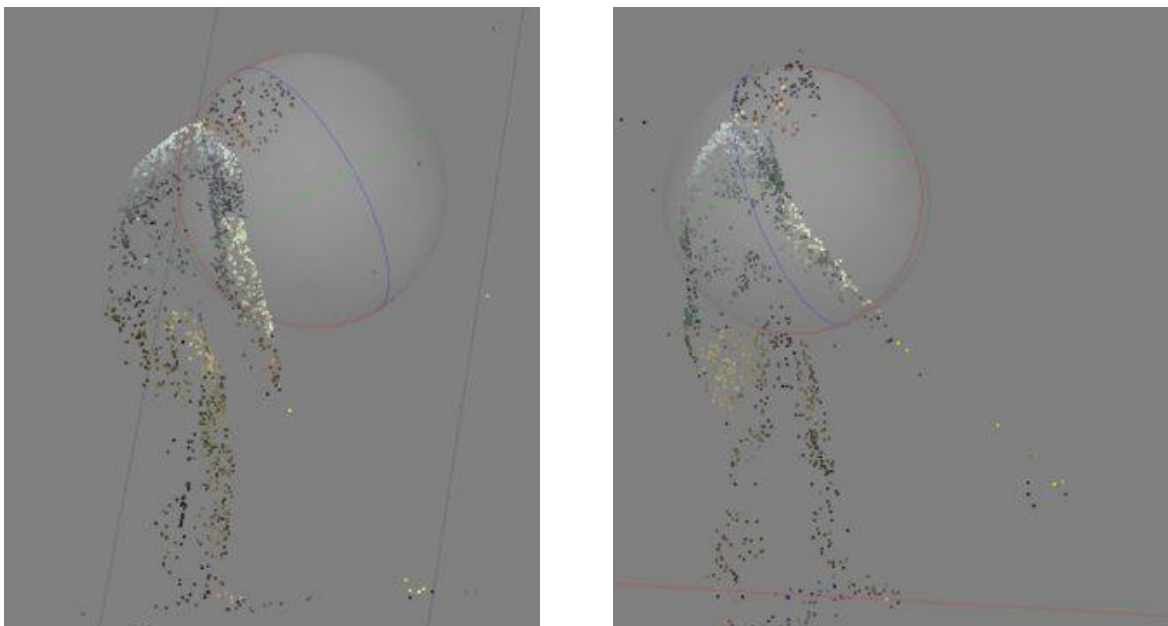
Slika 20. 3D model mesta zločina dobijen tehnikom 3D skeniranja [69]

Savremena industrija zahteva brzu izradu prototipa pa je tehnika 3D skeniranja doživela procvat u okviru oblasti reverzibilnog inženjerstva, ali i inspekcije proizvoda gde se 3D modeli koriste za kontrolu kvaliteta izrade i detekciju grešaka na proizvodima (slika 21), ukoliko iste postoje. Na ovaj način se izbegava mogućnost velikih finansijskih gubitaka u proizvodnji [71-73].



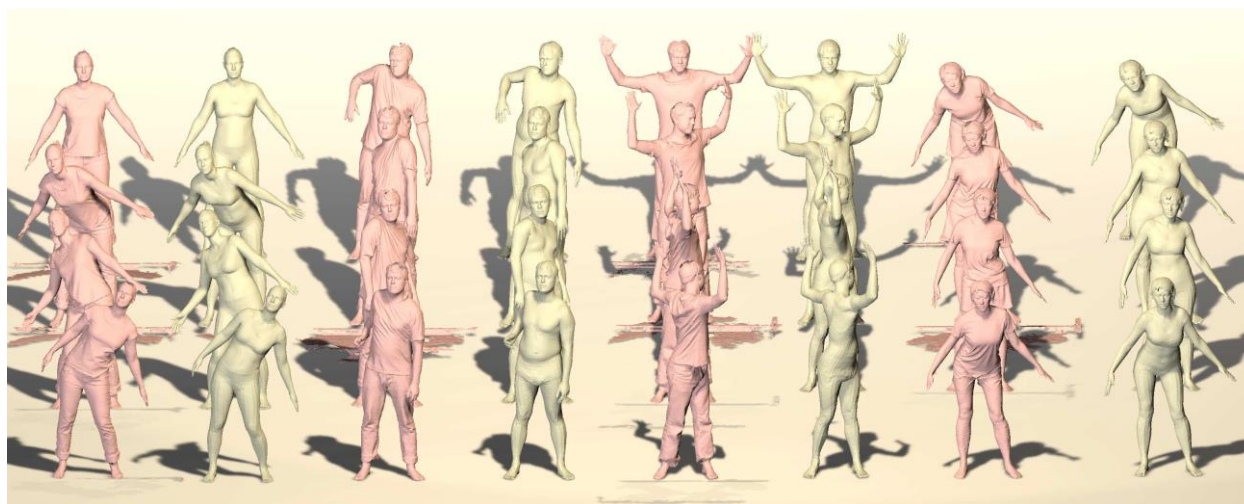
Slika 21. Primena 3D modela dobijenih skeniranjem za kontrolu kvaliteta proizvoda na primeru karburatora [71]

Modeli dobijeni spomenutom tehnikom skeniranja pronašli su svoju primenu i u sportu. Odštampani 3D modeli mogu da se koriste u svrhu istraživanja i određivanja performansi sportista (slika 22). Takođe, vrši se skeniranje pokreta sportista za potrebe različitih procena i istraživanja. Konkretno, u radu [74] opisan je proces procene zamaha sportiste u golfu, kao i određivanje grešaka koje su napravljene u toku zamaha.



Slika 22. Oblak tačaka dobijen 3D skeniranjem – pozicije igrača golfa u toku zamaha [74]

Procena i određivanje ljudske poze i oblika tela uz korišćenje tehnike 3D skeniranja koristi se i u mnoge druge svrhe, kao što su npr. virtuelni asistent za vežbanje, praćenje promena na telu kao dela zdravstvenih problema pacijenata i kreiranje avatara za virtuelnu realnost (slika 23), kao što je i ranije spomenuto [75,76].



Slika 23. Beleženje poza ljudskog tela tehnikom 3D skeniranja, zabeležena je poza i u odelu, ali i golog tela [76]

1.6. Struktura doktorske disertacije

Doktorska disertacija se sastoji iz ukupno dvanaest poglavlja, u okviru kojih su predstavljeni svi elementi realizovanog istraživanja.

U *prvom poglavlju* data su uvodna razmatranja, predstavljeni su cilj, hipoteze i predmet istraživanja. Detaljno su objašnjeni materijali i metode 3D digitalizacije korišćene za izradu doktorske disertacije. Dat je i plan rada i faze istraživanja u okviru doktorske disertacije.

Drugo poglavlje prikazuje dosadašnja istraživanja u oblasti zaštite autorskih prava, ugradnje zaštite od zloupotrebe u 3D virtuelni model, što je i tema doktorske disertacije. Takođe, dat je i kratak pregled istraživanja o tačnosti 3D štampača.

Treće poglavlje bavi se kulturnim nasleđem i tipovima objekata kulturnog nasleđa, kao i podelom istog. Dat je i pregled primene 3D digitalizovanog kulturnog nasleđa.

U *četvrtom poglavlju* detaljno je opisan inovativni pristup za zaštitu od zloupotrebe 3D digitalizovanih modela kulturnog nasleđa, koji je razvijen u okviru ove doktorske disertacije. Detaljno je opisan proces 3D digitalizacije skulpture beskontaktnim metodama, fotogrametrijom i strukturiranom svetlošću. Zatim je prikazano na koji način je izvršena ugradnja zaštite od zloupotrebe u 3D model.

Poglavlje pet bavi se evaluacijom dobijenih rezultata. U ovom poglavlju prikazani su rezultati ankete o geometrijskoj sličnosti (rađene radi vizuelnog poređenja) 3D modela originalne skulpture i skulpture sa ugrađenim zaštitnim elementom. Urađeno je i detaljno opisano softversko poređenje dobijenih 3D modela skulpture sa ugrađenim zaštitnim elementom i originalne skulpture, kao i evaluacija i procena preciznosti dobijenih modela na osnovu različitih pristupa 3D digitalizacije (fotogrametrija i strukturirana svetlost). Evaluacija i procena preciznosti dobijenih 3D modela urađena je na dva načina, manuelno i automatski. Takođe, urađeno je i poređenje 3D modela digitalizovane skulpture sa ugrađenim zaštitnim elementom od strane vajara i 3D modela u koji je ugrađen zaštitni element na istim mestima, ali u *Zbrush* softveru.

Šesto poglavlje opisuje mogućnost ekstrakcije digitalne zaštite iz 3D virtuelnog modela.

U *sedmom poglavlju* urađena je diskusija dobijenih rezultata, a dat je i pregled mogućnosti primene rezultata dobijenih u okviru istraživanja koje je tema doktorske disertacije.

U *osmom poglavlju* izvedeni su zaključci sa posebnim osvrtom na naučni i stručni doprinos istraživanja doktorske disertacije. Predstavljene su teme za buduća istraživanja.

U *devetom i desetom poglavlju* dati su pregledi slika i tabela prikazanih u doktorskoj disertaciji.

Jedanaesto poglavlje prikazuje korišćene akronime.

Poslednje, *dvanaesto poglavlje*, daje pregled korišćene literature.

2. ANALIZA DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA U OBLASTI

2.1. Intelektualna svojina

Jedan od standardnih načina zaštite digitalnog sadržaja je licenciranje, ukoliko se govori o softverima ili deljenju muzike, ali u slučaju 3D virtuelnih modela rešenje je kriptografija [77]. U moderno doba ugradnja *watermark*-a je dominantan način zaštite 3D virtuelnog umetničkog dela. Politika zaštite digitalnog sadržaja u većini kulturnih institucija koje se bave očuvanjem kulturnog nasleđa nije razvijena, a kreirane arhive su tehnološki zastarele [78]. Most između inženjeringa (digitalizacije) i sajber kriminala je 3D štampanje jer se digitalni sadržaji stvoreni ili ukradeni u jednoj zemlji ili ustanovi mogu transportovati širom sveta putem interneta radi kreiranja fizičkog modela. U mnogim zemljama zakoni su previše primitivni da bi uspešno regulisali slične vrste sajber kriminala [79]. Digitalnim arhivama i sadržajima digitalizovanog kulturnog nasleđa potrebne su posebne veštine upravljanja autorskim pravima i intelektualnom svojinom. Takođe, odnos intelektualne svojine i digitalizacija nije u potpunosti pravno regulisan [80]. Proces zaštite autorskih prava zahteva detaljno razmatranje pitanja koja se odnose na ravnotežu između poštenih uslova za pristup objektima kulturnog nasleđa za digitalizaciju i savremenih medija za prezentaciju [81]. Pored pitanja intelektualne svojine u digitalizaciji objekata od kulturnog značaja i njihovu prezentaciju, potrebno je uzeti u obzir i mnoštvo etičkih principa i pitanja [82].

2.2. Ugradnja zaštite od zloupotrebe u 3D virtuelni model

Urađen je pregled aktuelne naučne literature o dosadašnjim istraživanjima u oblasti digitalizacije i vizuelizacije kulturnog nasleđa, kao i o zaštiti digitalizovanih 3D modela objekata kulturnog nasleđa od zloupotrebe. Analizirani su naučni radovi objavljeni u najprestižnijim naučnim časopisima i naučnim konferencijama.

Hou i njegovi saradnici [83] kreirali su robustan algoritam za ugradnju *watermark*-a za zaštitu digitalnih i odštampanih 3D modela zasnovan na ugradnji *watermark*-a duž unapred definisane ose, a duž koje se vrši štampanje 3D modela, jer debljina sloja i promena ose duž koje se model štampa utiču na tačnost i detaljnost dobijenog 3D modela [84, 85]. U ovom algoritmu slojevi 3D modela posmatraju se kao šabloni koji pružaju informacije o orijentaciji *watermark*-a u procesu njegove detekcije.

Praun i koautori [86] konstruisali su robusni algoritam za ugradnju *watermark*-a u 3D mrežni model (eng. *mesh*) i kreirali su skup osnovnih skalarnih funkcija nad čvorovima mreže modela, gde se analiza detaljnosti modela vrši u više prolaza. *Watermark* pomera čvorove mreže duž pravca normale površine i ponderisan je različitim osnovnim funkcijama kao što su šesir, derbi i sombrero. Ovakav *watermark* je pouzdana zaštita u slučaju velikog broja transformacija, poput transformacije pozicija čvorova, dodavanja šuma, sečenja, zaglađivanja, uprošćavanja i umetanja drugog *watermark*-a.

U radu [87] kreiran je algoritam za ugradnju *watermark*-a koji je zasnovan na prilagođavanju rastojanja od centra 3D modela do tačke na površini uz pomoć tehnike modulacije koja vrši

pomeranje tačaka sa njihovih inicijalnih pozicija. Na ovaj način menja se geometrija modela, ali topologija ostaje ista. Udaljenost od centra poligona do centra 3D modela izračunava se kao Euklidska udaljenost. Postupak kvantizacije i ugrađivanje *watermark*-a prvo se rade na najvećoj udaljenosti od centra mreže.

Shinichi Nakazawa i saradnici [88] kreirali su metod za ugradnju *watermark*-a koji se sastoji iz dve faze: prva uključuje određivanje perceptivno uočljivih regiona na 3D modelu na osnovu zakrivljenosti mreže, a druga je selektivno ugrađivanje *watermark*-a u odabrane regione. Za prvu fazu autori su koristili postupak koji su kreirali *Lee* i saradnici [89] gde su izračunali srednju zakrivljenost i tako odredili vrednost zakrivljenosti u čvoru (eng. *vertex*) mreže. Zakrivljenost mreže zasniva se na Gausovoj funkciji i zavisi od parametra koji je proizvoljno podešen. Nakon izdvajanja istaknutih područja iz 3D mreže, autori ugrađuju *watermark* u ove regione i ovo je druga faza. U tu svrhu koristili su statistički pristup koji su razvili *Cho* sa saradnicima [90]: za svaki čvor iz ekstrahovane istaknute regije, autori su izračunali normu čvora kao rastojanje između čvora i baricentra 3D mreže. Prema dimenziji datih istaknutih normi čvorova u poređenju sa ostalim čvorovima, posmatranom čvoru se dodaje *watermark*. Prikazana metoda uzima u obzir da je vizuelni izgled 3D oblika očuvan, što je poseban kvalitet ovog rada.

Marko Botta sa saradnicima [91] je predstavio „slepi“, ireverzibilni algoritam za ugradnju *watermark*-a za zaštitu 3D modela. Algoritam koji za detekciju *watermark*-a ne zahteva postojanje originalnog modela naziva se „slepi“, u suprotnom algoritam „nije slep“ [92]. Algoritam koji može oporaviti izvorne podatke je reverzibilan, u suprotnom se naziva algoritam sa gubicima ili ireverzibilni. Digitalni *watermark* može biti robustan, poluosetljiv i krhki. Krhki *watermark* stvara minimalnu modifikaciju digitalnog objekta, a njegova područja primene su zaštita integriteta i autentifikacija. Autori su sistematizovali radove koji prikazuju robusne *watermark*-e i krhke *watermark*-e. Takođe su predstavili diskretnu *Karhunen – Loeve* transformaciju (KLT) koja je linearna transformacija i preslikava vektore iz jednog n -dimenzionalnog vektorskog prostora u drugi vektorski prostor iste dimenzije. Predloženi algoritam štiti geometriju modela (koordinate čvorova) i topologiju (struktura poligona), ali ne i svojstva, kao što su tekstura i normala. Svaki čvor se smatra ugradnom jedinicom (eng. *Embedding Unit* - EU) i definišu ga tri prostorne koordinate i poligoni kojima taj čvor pripada. Metoda ugradnje *watermark*-a se sastoji od dva glavna modula: modul ugradnje (čuva *watermark* u 3D modelu) i ekstraktor (izdvaja *watermark* prisutan u 3D modelu pomoću tajne KLT osnove koju obezbeđuje modul za generisanje ključeva) i tri prateća modula: generator ključeva (definiše tajnu osnovu KLT -a za navođenje prostora za ugradnju), generator *watermark*-a (stvara niz bitova *watermark*-a koji će se čuvati u svakoj EU) i verifikator (upoređuje izdvojeni *watermark* sa onim koji bi trebalo da se nalazi u temenima).

Wang [93] je kreirao algoritam za ugradnju *watermark*-a zasnovan na zapremeni. Prvi korak je konverzija koordinata temena iz kartezijskog koordinatnog sistema u cilindrični koordinatni sistem. Ovaj korak naziva se mrežnom normalizacijom. Nakon normalizacije mreže, mreža se deli na zakrpe i njeni h i θ domeni se diskretizuju u cilindričnom sistemu. Za zakrpe odabrane za učešće u koraku ugradnje *watermark*-a, potrebno je umetnuti neke pomoćne čvorove koji se uklanjaju nakon izvođenja postupka ugradnje *watermark*-a. Modifikacija zakrpa se vrši iterativno.

Deformisanje zakrpa izvodi se tako da izmene budu nevidljive prosečnom posmatraču. Tajni ključ K se koristi za deformaciju zakrpa i ugradnju *watermark*-a. Nakon ugradnje *watermark*-a, vrši se naknadna obrada podataka kako bi bilo provereno da li su izmenjeni čvorovi mreže 3D modela povezani i omogućilo kreiranje iste normalizovane/inicijalne poze 3D modela za potrebe ekstrakcije *watermark*-a.

Rad [94] prikazuje tri pristupa zaštiti autorskih prava digitalnog 3D sadržaja, a to su kriptografija, upravljanje digitalnim pravima (eng. *Digital Rights Management* - DRM) i digitalni *watermark* i otisci prstiju. Autori su stvorili tri scenarija za ilegalnu distribuciju 3D sadržaja: okruženje za digitalno deljenje 3D objekata bez 3D štampanja, deljenje štampanog modela dobijenog iz digitalnog modela i deljenje originalnog štampanog modela od strane autora. Takođe su pokazali dva pristupa zaštiti autorskih prava za 3D sadržaj, a to su tehnike u digitalnom domenu i dodatne hardverske tehnike. Tehnike digitalnih domena su *watermark* koji nije slep, „slepi“ *watermark* i *watermark* koji se ugrađuje unutar štampanog 3D objekta. S druge strane, dodatni hardverski materijal uključuje upotrebu oznaka za radio-frekvencijsku identifikaciju (eng. *Radio Frequency Identification* - RFID), zatim korišćenje spektralnih potpisa proizvedenih od hemijskih supstanci, kao i tehnologiju za zaštitu od falsifikovanja 3D štampanih modela zasnovanu na detekciji kvantnih tačaka [95], [96]. Ova metoda se zasniva na kvantnim tačkama koje se nasumično dodaju samom objektu, kreirajući tako jedinstveni fizički otisak prsta poznat samo proizvođaču.

Roland Hu i saradnici [97] kreirali su algoritam ugradnje *watermark*-a za sigurno prenošenje 3D poligonalne mreže kroz senzorsku mrežu. Ovaj metod zasnovan je na odabiru „zubaca“, tj. na odabiru istaknutih čvorova kao uobičajenih deskriptora 3D površina. Autori su koristili isturene/izbočene čvorove jer ovi regioni sadrže najviše informacija o površinskom obliku.

Nikolić i koautori [98] kreirali su metod zaštite geometrijskih podataka automatski restituisanog 3D modela dvorca *Versailles*. Koristili su optimizovanu adaptivnu modulaciju indeksa oskudne kvantizacije (eng. *Quantization Index Modulation* - QIM) za ugradnju bitova podataka u 3D generisani model.

Amar i saradnici [99] su predložili algoritam za ugradnju *watermark*-a zasnovan na modifikovanju položaja temena mreže 3D modela. Prvi korak je identifikacija čvorova čiji će položaj biti promenjen. Nakon toga se određuje središte mase i izračunava Euklidska udaljenost između centra mase i izabranih temena prema vrednosti bita *watermark*-a, a zatim se *watermark* ugrađuje u 3D mrežu.

Giao Pham [100] je kreirao i predstavio algoritam za zaštitu autorskih prava 3D modela na osnovu ugrađivanja podataka o *watermark*-u u karakteristične tačke 3D modela. Glavna ideja algoritma je sečenje 3D digitalnog modela na reznjeve po z osi. 3D model se preseče sa ravni pre štampanja. Dobijene tačke preseka modela i ravni kojom je model presečen korišćene su za ugrađivanje *watermark*-a u 3D model. Skup poligona (trouglova) takođe se izdvaja iz 3D modela. Zajedničke tačke izdvojenih trouglova iz modela i tačke preseka sa reznjevima su karakteristične tačke za ugradnju *watermark*-a. Kada se izdvoje karakteristične tačke, *watermark* se ugrađuje u 3D model promenom samo x i y koordinata ovih tačaka, dok se z koordinata ne menja. Razlog

zbog kojeg koordinata z ostaje ista je potreba za kasnijim izdvajanjem *watermark*-a iz 3D štampanog (fizičkog) modela sa ugrađenim *watermark*-om. *Pham* je naglasio da ranije predstavljene metode za ugradnju *watermark*-a u 3D model zasnovane u geoprostornom domenu (promena topologije, dužina, površina poligona ili koordinata čvorova i geometrijskih obeležja) ili u frekvencijskom domenu (kao što je diskretna Furijeova transformacija, diskretna *wavelet* transformacija, diskretna kosinusna transformacija) su korisne za zaštitu autorskih prava digitalnih 3D modela, ali ne i za fizičke i odštampane 3D modele.

U članku [101] *Giao Pham* i koautori su kreirali algoritam za zaštitu autorskih prava 3D štampanih modela na osnovu *Menger*-ove zakrivljenosti i klasterizacije metodom K -srednjih vrednosti. On je ukazao na različite pristupe ugradnje *watermark*-a, ali je objasnio razliku u pristupu za zaštitu autorskih prava 3D digitalnih modela i 3D štampanih modela. Kao i u [100], *Pham* je naveo metode zasnovane na geoprostornom domenu i frekvencijskom domenu kao korisne algoritme za zaštitu autorskih prava digitalnih 3D modela. Metoda predstavljena u ovom radu prvo izdvaja poligone iz 3D štampanog modela, a nakon toga se poligoni razvrstavaju u različite grupe na osnovu vrednosti *Menger*-ove zakrivljenosti i korišćenjem algoritama grupisanja K -srednjih vrednosti. Broj grupa zavisi od korisnički definisanog ključa *watermark*-a i to je tajni ključ.

Beugnon [102] je kreirao efikasan metod selektivnog šifrovanja za binarne formate 3D modela. Geometrijska izobličenja su uvedena kako bi delimično ili u potpunosti zaštitila 3D sadržaj, a autori delimično šifruju koordinate čvorova pomoću tajnog ključa. Ova metoda vrši šifrovanje odabranih bitova geometrije 3D modela da bi je vizuelno zaštitila, a ovaj postupak se dešava bez povećanja veličine datoteke, odnosno fajla u kojem se čuvaju podaci o 3D modelu.

U radu [103], *Hamidi* je kreirao algoritam za zaštitu 3D modela baziran na *wavelet* transformaciji, gde se ugradnja *watermark*-a vrši nakon kvantizacije najistaknutijih čvorova 3D modela. Kvantizacija tačaka se vrši na osnovu njihove udaljenosti od centra modela.

U radu [104] *Thran* sa saradnicima predložio je algoritam zasnovan na sečenju 3D mreže na 2D reznjeve u koji su ugrađeni podaci o *watermark*-u. Koordinate svake tačke u dobijenim 2D reznjevima se menjaju prema određenoj vrednosti srednje udaljenosti 2D reznja od centra modela.

Na osnovu analiziranih istraživanja u oblasti ugradnje zaštite od zloupotrebe u 3D virtuelne modele, može se zaključiti da su svi ili bar većina pristupa bazirani na ugradnji zaštite pomoću različitih matematičkih algoritama. To znači da se zaštitni element ugrađuje automatski i na isti način vrši se ugradnja zaštite na sve tipove objekata. Algoritmi su bazirani na transformaciji čvorova mreže digitalnih 3D modela koja se ponavlja i u nekoliko iteracija, narušavajući vizuelni identitet, kao i lepotu umetničkog dela. Uz korišćenje spomenutih algoritama i pristupa digitalni 3D modeli mogu biti transformisani do neprepoznatljivosti. Takođe, bitno je napomenuti da ovakav vid zaštite digitalnih 3D modela mogu kreirati samo oni koji imaju adekvatno znanje iz oblasti programiranja. Cilj doktorske disertacije je kreiranje novog pristupa za zaštitu digitalnih 3D modela koji ne narušava vizuelni identitet i očuvava lepotu umetničkog dela, a zaštita može biti kreirana i od strane zaposlenih u ustanovama kulture.

2.3. Tačnost sistema za 3D digitalizaciju i 3D štampača

Sisteme za 3D digitalizaciju karakteriše različita tačnost i ona se mora uzeti u obzir prilikom izbora skenera/metode za realizaciju 3D digitalizacije konkretnog umetničkog dela. Tačnost skenera (eng. *accuracy*) i rezolucija (eng. *point distance*) trebaju biti takvi da omoguće 3D digitalizaciju svih detalja koji su od značaja za kvalitetnu vizuelnu prezentaciju skulpture, odnosno dodatih zaštitnih grešaka. U slučaju da se planira izrada replike sa ugrađenim zaštitnim elementom primenom 3D štampača, isti mora imati tačnost i rezoluciju koje omogućavaju izradu najfinijih detalja. Iako se ovo istraživanje ne bavi greškom koja se javlja tokom 3D štampanja i prenosom podataka sa 3D digitalnog na 3D odštampani model, urađena je kraća analiza i u nastavku je dat kratak osvrt na temu tačnosti 3D štampača.

Uprkos brzom rastu tehnika 3D štampanja, tačnost 3D štampanih modela nije temeljno istražena [105]. Odstupanje dimenzije 3D štampanog modela od dimenzije 3D digitalnog modela definiše tačnost 3D štampe. Tačnost dimenzija od 98,81% postignuta je za komercijalne FDM (eng. *Fused Deposition Modeling*) 3D štampače [106]. Razni faktori utiču na tačnost štampanog 3D modela; to su temperatura na mlaznici, debljina mlaznice, skala filameta, temperatura ugrađene ploče, osnova za štampanje, visina sloja, gustina ispune, brzina štampanja tokom štampanja sa čistim polipropilenom, deformacija, ulazak niti, protok materijala i razmak između mlaznice i ploče [107]. To znači da čak i ako je model 3D digitalizovan sa visokom preciznošću, ta preciznost i nivo detalja mogu biti narušeni u procesu 3D štampanja. Dimenzionalna i geometrijska odstupanja koja se javljaju na štampanim 3D modelima i veličina odstupanja takođe mogu zavistiti od vrste formata prenosa datoteka [108]. Novi pristup u oblasti 3D štampanja, takozvano 3D štampanje na bazi prahe, poboljšalo je tačnost dimenzija, rezoluciju štampanja i brzinu proizvodnje. Karakteriše ga i fleksibilnost u dizajniranju složene strukture, upotreba različitih materijala u okviru jednog dizajna, smanjeni troškovi materijala za proizvodnju [109]. Ovaj pristup takođe ima svoja ograničenja kao što su veći troškovi materijala, duže vreme štampanja, zahtevna naknadna obrada, termičko izobličenje koje dovodi do savijanja i ograničen izbor materijala. Nova tehnika 3D štampanja je 3D štampanje u boji, koje takođe ima svoja ograničenja [110].

3. KULTURNO NASLEĐE

Kulturno nasleđe je skup resursa nasleđenih iz prošlosti koje ljudi identifikuju, nezavisno od vlasništva nad njima, kao odraz i izraz neprekidno evoluirajućih vrednosti, uverenja, znanja i tradicija. Ono obuhvata sve vidove životne sredine nastale interakcijom čoveka i prostora tokom vremena [111].

Postoji više podela kulturnog nasleđa. Dve osnovne podele kulturnog nasleđa bazirane su na formu objekata kulturnog nasleđa i na njihovu pokretljivosti.

Prema prvoj podeli ono se deli na:

- materijalno
- nematerijalno.

Dok se prema pokretljivosti, kulturno nasleđe deli na:

- pokretno
- nepokretno.

U materijalno kulturno nasleđe ubrajaju se:

- izuzetne građevine (sakralne ili svetovne),
- spomenici,
- materijalna umetnička dela.

Odnosno, materijalno kulturno nasleđe su stvari i tvorevine materijalne kulture od opšteg interesa koje uživaju posebnu zaštitu utvrđenu Zakonom o kulturnom nasleđu [112].

Nematerijalno kulturno nasleđe, ispoljava se u sledećim oblastima:

- usmenim tradicijama i izrazima, uključujući i jezik kao nosioca nematerijalnog kulturnog nasleđa,
- izvođačkim umetnostima,
- društvenim običajima, ritualima i svečanim događajima,
- znanjima i običajima koji se tiču prirode i svemira,
- veštinama vezanim za tradicionalne zanate [112].

Nepokretno kulturno nasleđe su

- spomenici kulture (slika 24),
- prostorne kulturno-istorijske celine,
- arheološka nalazišta i
- znamenita mesta.

Pokretno kulturno nasleđe su

- umetničko-istorijska dela (slika 25),
- arhivska građa,
- filmska građa i
- stare knjige.



Slika 24. Nadgrobni spomenik od belog mermera – primer nepokretnog kulturnog nasleđa



Slika 25. Amfora – primer pokretnog kulturnog nasleđa

3.1. 1D kulturno nasleđe

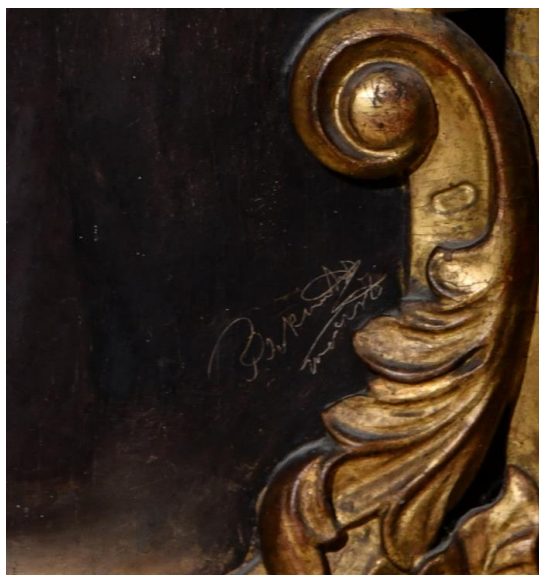
Jednodimenzionalnim kulturnim nasleđem smatra se zvuk. Do 2008. godine Narodna biblioteka Srbije, u okviru jednog projekta, digitalizovala je skoro 600 ploča. Tada je kreirana i internet prezentacija na sajtu Digitalne Narodne biblioteke Srbije, koja je integrisana u portal Evropske biblioteke [113]. Najstarija ploča u fondu Narodne biblioteke Srbije je izdanje *His Master's Voice*-a iz 1902. godine, sa snimkom arije iz *Verdi*-jeve opere *Don Carlo*. Ovaj vid digitalizacije (digitalizacija zvuka) najranije je standardizovan. Analogno snimanje zvuka u potpunosti je iskorenjeno sa početkom digitalizacije zvuka [114].

3.2. 2D kulturno nasleđe

U dvodimenzionalno kulturno nasleđe spadaju fotografije, umetničke slike, ikone i istorijski važna dokumenta. 2D digitalizacija omogućava čuvanje, ali i prezentaciju sadržaja ustanova kulture široj javnosti u okviru izložbi, koje mogu biti i virtuelne. Na ovaj način cele zbirke umetničkih slika i istorijskih dokumenata mogu biti prikazane posetiocima ustanova kulture, kao što su muzeji i galerije. Fotografije dobijene 2D skeniranjem omogućavaju čak i restauraciju i retuširanje istih u digitalnom formatu. Takođe, prikaz detalja sa fotografija i ikona u visokoj rezoluciji omogućava kako sagledavanje detalja i uživanje u lepotama umetničkih dela (slika 26), tako i analizu dela naučnim metodama, kao što su određivanje perioda kojem pripada umetničko delo (ukoliko nije poznato), tehnika kojom je rađeno, i slično [112].



a)



b)

Slika 26. Digitalizovana ikona – primer 2D kulturnog nasleđa: **a)** cela ikona; **b)** detalj u visokoj rezoluciji (potpis Đure Jakšića – crkva Svetog Prokopija u Srpskoj Crnji)

3.3. 3D kulturno nasleđe

Trodimenzionalno kulturno nasleđe predstavljaju svi objekti materijalnog (pokretnog i nepokretnog) kulturnog nasleđa, a to su tvrđave, arheološka nalazišta, spomenici kulture, umetničko-istorijska dela, poput skulptura, itd. U današnje vreme 3D digitalizacija objekata kulturnog nasleđa doživela je procvat, a beskontaktno metode 3D digitalizacije koje se primenjuju u te svrhe su fotogrametrija i 3D skeniranje. Ove metode su nedestruktivne u smislu da nema neposrednog kontakta sa objektom koji se snima. Na taj način izostavlja se mogućnost za nenamernim oštećenjem objekta. Sve je više ustanova kulture koje na svojim sajtovima nude mogućnost šetnje kroz njihove prostorije i sagledavanje postavke preko virtuelnih tura. Takođe, sve digitalizovane objekte kulturnog nasleđa čuvaju u digitalnim bibliotekama i arhivima. Kao i 2D digitalizovano kulturno nasleđe, tako i 3D digitalizovano kulturno nasleđe (slika 27) može biti korišćeno i u svrhu restauracije, ali i analize različitim naučnim metodama.



Slika 27. Digitalizovan ikonostas – primer 3D kulturnog nasleđa (crkva Svetog Nikole u Sremskim Karlovcima)

Na slici 27 korišćena su dva pristupa za fotografisanje ikonostasa. Za fotografisanje ikona korišćen je teleobjektiv za potrebe 2D multimedijalne prezentacije, a za kreiranje fotogrametrijskog 3D modela ikonostasa, standardni objektiv. Fotografisanje ikonostasa za fotogrametrijsku rekonstrukciju urađeno je prema unapred pripremljenom planu snimanja, koji definiše tačne pozicije i orijentacije kamere u odnosu na objekat koji se snima. U ovom slučaju, za fotografisanje različitih delova ikonostasa, menjan je i ugao kamere u odnosu na vertikalnu ravan ikonostasa. Dok kod drugog pristupa, tj. kod fotografisanja ikona optička osa zaklapala je ugao od 90° sa ravni ikone koja se fotografiše i na taj način je izbegnuta distorzija.

3.4. Digitalizacija u svrhu očuvanja kulturnog nasleđa

Digitalizacija je u svim oblastima podignuta na viši nivo posebno u 2020. godini sa pojavom virusa korona, gde su sve aktivnosti iz realnog života prenesene u virtuelni, pa tako i posete virtuelnim muzejima i galerijama.

Jedini način premošćavanja fizičkih distanci i približavanja široj javnosti objekata kulturnog nasleđa jeste digitalizacija istih. Digitalizacija kulturnog nasleđa doprinosi očuvanju, konzervaciji i promovisanju tradicije i nacionalnog identiteta u procesu globalizacije. Osnovna ideja digitalizacije kulturnog nasleđa jeste da se učini dostupnim i vidljivim i van fizičkih granica prostora u kojem se nalazi, kako domaćoj, tako i međunarodnoj javnosti. Proces 3D digitalizacije, osim toga što doprinosi očuvanju i promovisanju kulturnog nasleđa, takođe se koristi i u cilju daljeg proučavanja i analiziranja postojećeg stanja objekata, kao i za potrebe konzervacije. S obzirom na to da se mere konzervacije, u najvećoj meri baziraju na poštovanju saznanja o prvobitnom stanju u određenom vremenu, čuvanje i arhiviranje digitalnog zapisa postojećeg stanja objekta je od izuzetnog značaja za potrebe buduće analize, restauracije i rekonstrukcije. Fotogrametrijski rekonstruisani 3D modeli objekata, ali i oni dobijeni tehnikom 3D skeniranja sadrže niz informacija o realnom stanju objekta, kao što su precizna razmera i dimenzije objekta, realistični prikaz materijala, teksture i kompleksne forme. Sve ove informacije pogoduju potencijalnoj budućoj detaljnoj analizi stanja digitalizovanih objekata.

Značaj digitalizacije kulturnog nasleđa ogleda se u povećanju vidljivosti kulturnog nasleđa kroz interpretaciju nasleđa na inovativan način, ali i kroz afirmaciju aktivnog učešća institucija od značaja za razvoj i očuvanje nacionalnog identiteta u procesu 3D digitalizacije. Na ovaj način, a kroz zajedničku saradnju institucija kulture, crkve i naučno-obrazovnih ustanova podstiče se interdisciplinarni pristup u razvoju digitalizacije. Strategija razvoja kulture Republike Srbije u period od 2017. do 2027. prepoznaje digitalizaciju kulturnog nasleđa kao važan činilac u preventivnoj zaštiti kulturnog nasleđa, kojom se obezbeđuje veća vidljivost, kvalitetnija prezentacija i promocija kulturnog nasleđa Republike Srbije.

Ukoliko se analizira dvodimenzionalno kulturno nasleđe, kao što su dokumenti i različiti spisi, može se zaključiti da su oni po svojoj formi osetljivi i krhki. Izložba ove vrste materijalnog kulturnog nasleđa na uvid široj javnosti nije prihvatljivo rešenje zbog njihove osetljivosti na dodir. Digitalizacija 2D kulturnog nasleđa doprinosi očuvanju istog, a s druge strane čini ga dostupnim

javnosti i to u digitalnoj formi visoke rezolucije. Multimedijalne prezentacije 2D kulturnog nasleđa omogućavaju korisnicima sagledavanje različitih dela u više nivoa detaljnosti i uz prateće informacije, ukoliko za tim ima potrebe.

Pojedini objekti kulturnog nasleđa postoje u vidu ruševina ili su delimično srušeni. Digitalizacija spomenute vrste objekata kulturnog nasleđa omogućava arhiviranje trenutne forme. Na osnovu postojećih tehničkih crteža i sačuvanih podataka, takve vrste objekata moguće je restituisati, tj., vratiti u prvobitno stanje, bar u digitalnom, odnosno, virtuelnom svetu. Takođe, postoje objekti kojim zbog različitih uticajnih faktora preči nestanak. Takve objekte moguće je sačuvati od zaborava i nestanka u nepovrat jedino 3D digitalizacijom i arhiviranjem u digitalnoj formi.

S druge strane, postoje objekti kojim je otežan pristup ili im je u potpunosti nemoguće pristupiti iz verskih razloga i običaja, primer je Sveta gora, gde je ženama zabranjen ulazak. Digitalizacija ovog svetog mesta srušila bi barijeru koja trenutno postoji za žene.

4. INOVATIVNI PRISTUP ZA ZAŠTITU 3D DIGITALIZOVANIH OBJEKATA KULTURNOG NASLEĐA

4.1. 3D digitalizacija skulpture i ugradnja zaštite od zloupotrebe u 3D virtualni model

Cilj doktorske disertacije jeste da umesto 3D modela koji je dobijen 3D digitalizacijom originalne skulpture, na uvid javnosti bude izložen 3D model koji je dobijen 3D digitalizacijom skulpture sa ugrađenom “vajarskom greškom”. Naime, vajar je na originalnu skulpturu, prema sopstvenom iskustvu i nahodanju, dodao glinu na mesta na skulpturi za koja je smatrao da će biti najmanje vizuelno uočljiva. Tako je izabrao tri segmenta na licu koji se mogu videti na slici 2. Ovakva skulptura nazvana je skulptura sa ugrađenim zaštitnim elementom, a njen 3D model nazvan je 3D model sa digitalnom zaštitom. Nakon digitalizacije skulpture sa dodatom glinom, vajar je lako i bez oštećenja skulpture uklonio naneti materijal. U okviru doktorske disertacije korišćeni su sinonimi ugrađeni zaštitni element ili ugrađena zaštita za dodate detalje od glina. Korišćen je izraz zaštita jer sugerise na zaštitu prava vlasnika (autorska prava).

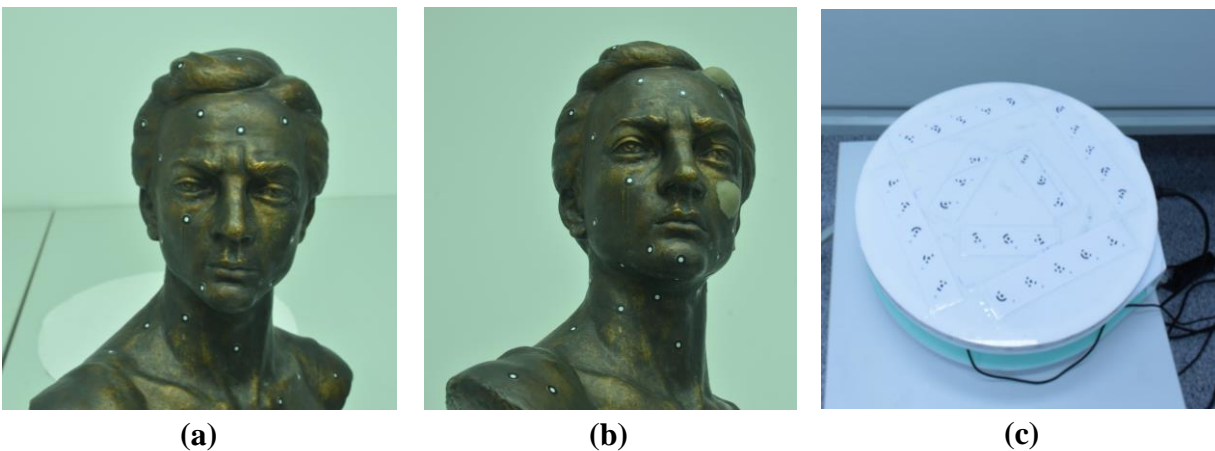
Ako bi postojala namera da se široj javnosti prikaže originalna skulptura u visokoj rezoluciji, odnosno njen 3D model, onda bi bio prikazan upravo 3D model digitalizovane skulpture sa ugrađenom zaštitom. Pretpostavka je da prosečan posmatrač, odnosno, posetilac muzeja i kulturnih institucija i njihovih sajtova, ne bi primetio na modelu digitalnu zaštitu koja je dodata. Posebno što na sajt ne bi bio postavljen 3D model originalne skulpture, pa prema tome ne bi bilo ni moguće poređenje skulpture sa digitalnom zaštitom sa originalnom skulpturom. Na taj način, u slučaju, bilo kakve zloupotrebe prikazanog 3D modela sa digitalnom zaštitom, npr. kada bi neko pokušao da odštampa 3D model te skulpture, autori koji su skulpturu učinili dostupnom javnosti lako bi mogli da ustanove originalnost svake kopije skulpture koja se pojavi bilo gde u svetu. To bi se postizalo tako što bi se kreirao 3D model odštampane kopije skulpture i poredio bi se sa 3D modelom originalne skulpture koji nije ni prikazan javnosti.

U okviru doktorske disertacije 3D digitalizovana je originalna skulptura koja je u vlasništvu Galerije Matice srpske u Novom Sadu, a to je institucija od nacionalnog značaja u oblasti kulture. Zatim je na toj skulpturi diskretno dodat materijal na nekoliko mesta od strane vajara/kustosa sa željom da prosečni posmatrač tu promenu i ne primeti. Tako korigovana skulptura je ponovo 3D digitalizovana. Nakon toga poređena je geometrija na 3D digitalnim modelima originalne skulpture i skulpture sa ugrađenim zaštitnim elementom. Ustanovljeno je da se dodata fizička zaštita može precizno detektovati poređenjem dva modela. Za detekciju razlike između 3D modela dve skulpture korišćeni su softveri *MeshLab* [115] i *CloudCompare* [116] pomoću kojeg su poređene Euklidske distance između korespondentnih tačaka na oblaku tačaka originalne skulpture (ORIG) (u *MeshLab*-u je korišćen 3D model za poređenje) i oblaku tačaka skulpture sa ugrađenom zaštitom (VAJ_GRE).

4.2. Proces 3D digitalizacije

Skulptura prikazana na slici 1 je 3D digitalizovana korišćenjem dve beskontaktno metode: fotogrametrija i skeniranje strukturiranom svetlošću. Najpre je 3D digitalizovana skulptura bez dodatih masa od gline. Na taj način su prikupljeni podaci o originalnom obliku/izgledu umetničkog dela. Nakon što je skulptura skenirana na oba navedena načina, kustos/vajar iz Galerija Matice srpske je dodao mase glinom na delove skulpture, a to su pramen kose (na levoj strani), ušna resica (na levoj strani) i jagodica (na levoj strani). Skulptura sa nanetim masama od gline prikazana je na slikama 2 i 28b.

Mase su dodate, prema osećaju skulptora, na delove na kojem bi prosečnom posmatraču bile neprimetne i u količini koja je takođe neprimetna za posmatrača. Naime, deo ovog istraživanja obuhvata i anketu nad 195 ispitanika, koja je opisana u poglavlju 5.2. Kad su mase dodate, skulptura je ponovo 3D digitalizovana, fotogrametrijom i strukturiranom svetlošću. Ovako digitalizovana skulptura nazvana je skulptura sa digitalnom zaštitom. Za obe vrste 3D digitalizacije, fotogrametriju i 3D skeniranje sa strukturiranim svetlom digitalizovana je skulptura sa nalepljenim markerima. Štaviše, markeri su nalepljeni i na obrtni sto (slika 28). Markeri su lepljeni na izabranoj udaljenosti, a ta definisana rastojanja između markera kasnije su korišćena za određivanje razmere i za kreiranje koordinatnog sistema u odgovarajućem softveru.



Slika 28. Skulptura i obrtni sto sa nalepljenim markerima: **a)** originalna skulptura; **b)** skulptura sa nanetom glinom; **c)** obrtni sto

4.2.1. Fotogrametrijsko snimanje

Za uspešnu fotogrametrijsku rekonstrukciju vrlo je važno da plan snimanja bude dobro osmišljen. Plan snimanja obuhvata određivanje pogodnih pozicija sa kojih će biti snimljene fotografije i određivanje parametara foto-aparata koji treba da budu u skladu sa uslovima snimanja. Ključni uslov je da treba da postoji preklapanje između dve susedne fotografije, što znači da dve susedne fotografije moraju imati minimum 60% istih piksela (istih tačaka na objektu), a optimalno 80%.

Najpre je određen GSD (eng. *Ground Sample Distance*) da bi se dobila željena detaljnost modela. Nakon što se odredi GSD proverava se koliko prostora će obuhvatati kadar, to se određuje korišćenjem GSD-a i broja piksela senzora foto-aparata. Nakon definisanog određenog prostora koji kadar obuhvata, proverava se da li je bolje okrenuti fotoapararat horizontalno (eng. *landscape mode*) ili vertikalno (eng. *portrait mode*).

Objektom dominiraju tamnije nijanse braon i zlatno žute boje, koje delimično pogoduju primeni fotogrametrije zasnovanoj na SfM algoritmu. Na osnovu geometrije objekta odabran je konvergentni plan snimanja. Konvergentni pristup se koristi kod slobodnostojećih objekata, te se pozicije foto-aparata ređaju ukrug oko objekta.

Za snimanje je korišćena oprema: stativ i foto-aparat marke NIKON D7000 (veličine piksela $4.78\mu\text{m}$, veličine senzora $23.6 \times 15.6\text{mm}$, raspona žižne daljine 18-109mm, krop faktora 1.53), sa manuelnim podešavanjima sledećih parametara: *f-stop*, *ISO speed*, *Exposure time*.

Odabrana vrednost GSD-a je 0.1mm jer detalji na objektu veličine 1mm treba da budu vidljivi. Obuhvaćeni prostor D na fotografiji određuje se uzimanjem u obzir broja piksela kamere:

$$D = \text{broj piksela} \cdot \text{GSD} .$$

U tom slučaju obuhvaćen prostor je $(0.1\text{mm} \cdot 4928) = 492.8\text{mm}$ (*portrait mode*) i $(0.1\text{mm} \cdot 3275) = 327.5\text{mm}$ (*landscape mode*). Korišćen je *landscape* mod za fotografisanje. Kada je određen GSD, proračunata je razmera

$$m = \frac{\text{GSD}}{\text{veličina piksela}} = \frac{0.1}{4.78 \cdot 10^3} = 0.0209 \cdot 10^{-3}$$

a udaljenost foto-aparata od objekta je

$$h = m \cdot c = 0.0209 \cdot 10^{-3} \cdot 35 = 0.735\text{m}$$

gde žižna daljina (c) iznosi 35mm.

Radijalno rastojanje foto-aparata od skulpture treba da bude isto sa svih strana. Ukupan obim kruga je $2\pi r = 2 \cdot 0.735 \cdot 3.14 = 4.615\text{m}$, pa je za pomeranje od 15° razmak između fotografija, odnosno, dužina tetive kruga $b = 19\text{cm}$.

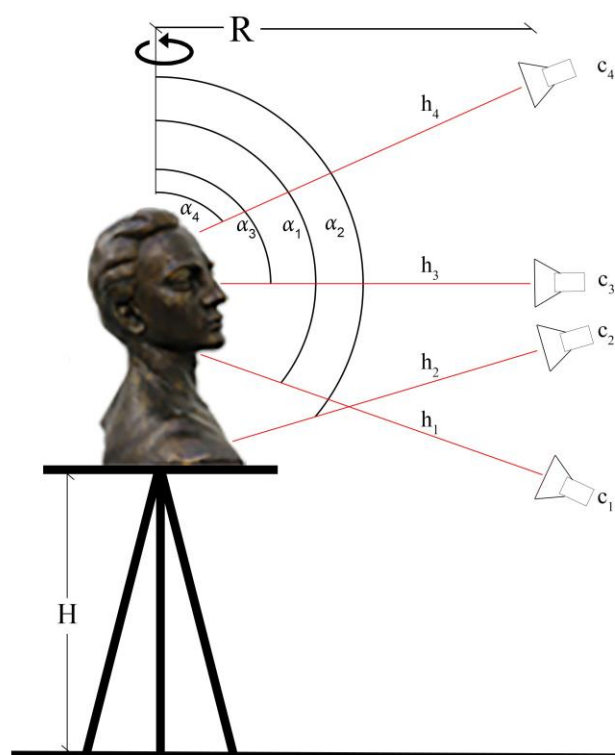
Finalna udaljenost kamere od objekta podešena je na 0.5m, kako bi bio napravljen kompromis između vidnog polja (eng. *Field of View* – FoV) i dubinske oštine (eng. *Depth of Field* - DoF). Da bi bio obezbeđen dovoljan nivo pokrivenosti skulpture fotografijama, snimanje je vršeno sa četiri različite visine, sa priraštajem ugla od 20° . U regiji lica, inkrement zakretanja je bio manji od predviđenih 20° . Snimanje je vršeno u četiri nivoa po visini (slika 29), prikazane su četiri pozicije kamere, označene sa C_1, \dots, C_4 , a rastojanje duž optičke ose od foto-aparata do objekta je označeno sa h_1, \dots, h_4 . Prvi nivo je ujedno i najniži nivo u kojem je bila postavljena kamera. Drugi nivo je bio podešen za snimanje postamenta. Na trećem nivou kamera je postavljena u nivou lica sa optičkom osom od 90° u odnosu na osu obrtanja, a u četvrtom i najvišem nivou kamera je postavljena iznad skulpture, tako da je optička osa zaklapala oštar ugao α_4 sa osom obrtanja obrtnog stola. Dodatne fotografija u regiji lica i temena glave su snimljene kako bi se prikupilo što više informacija sa površi objekta. Nakon snimanja, za kreiranje 3D modela u *AgiSoft Metashape* [117] softveru korišćeno je 100 fotografija. Parametri korišćeni za fotogrametrijsko snimanje prikazani su u tabeli 1.

Na osnovu prikazanog plana snimanja, fotografisana je i digitalizovana skulptura u junu 2020. Skica plana snimanja prikazana je na slici 29.

U tabeli 1 prikazani su parametri primenjeni kod fotogrametrijskog snimanja.

Tabela 1. Parametri primenjeni kod fotogrametrijskog snimanja

Parametri snimanja	Originalna skulptura i skulptura sa “vajarskom greškom”
GSD	0.1mm
D	0.33m
h	0.5m
b	0.19m
focal length (c)	35mm
focus point	0.7m
f-stop	f/11
ISO speed	100
exposure time	1/2sec



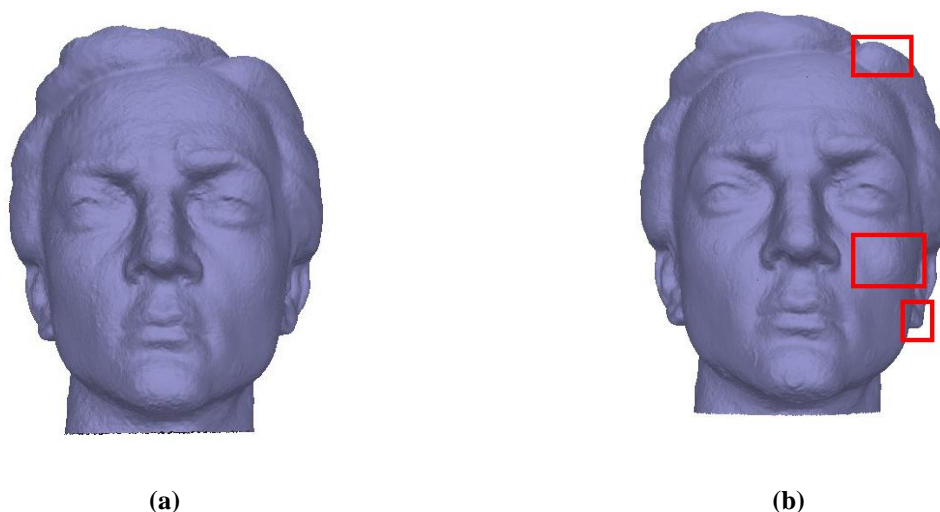
Slika 29. Skica plana snimanja skulpture

Slika 30 prikazuje enterijer laboratorije i postavku elemenata u kojoj je vršeno fotogrametrijsko snimanje skulpture, a koja se nalazi na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu.



Slika 30. Postavka elemenata u laboratoriji za potrebe fotogrametrijskog snimanja

Na slici 31 prikazani su rezultati dobijeni fotogrametrijom, na slici 31a prikazan je originalni model, a na slici 31b model sa dodatim detaljima od gline koji su označeni crvenim pravougaonicima.



Slika 31. 3D modeli kreirani pomoću fotogrametrije: **a)** originalni model; **b)** model sa dodatim detaljima od gline (uokvireni crvenim pravougaonicima)

4.2.2. 3D digitalizacija strukturiranom svetlošću

Skulptura je 3D digitalizovana pomoću skenera *EinScan Pro 2X*. Proces skeniranja urađen je u laboratoriji Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu. *EinScan Pro 2X* skener (slika 32) pruža visoku preciznost, veliku brzinu rada i jednostavan je za upotrebu. Ovi skeneri imaju širok spektar

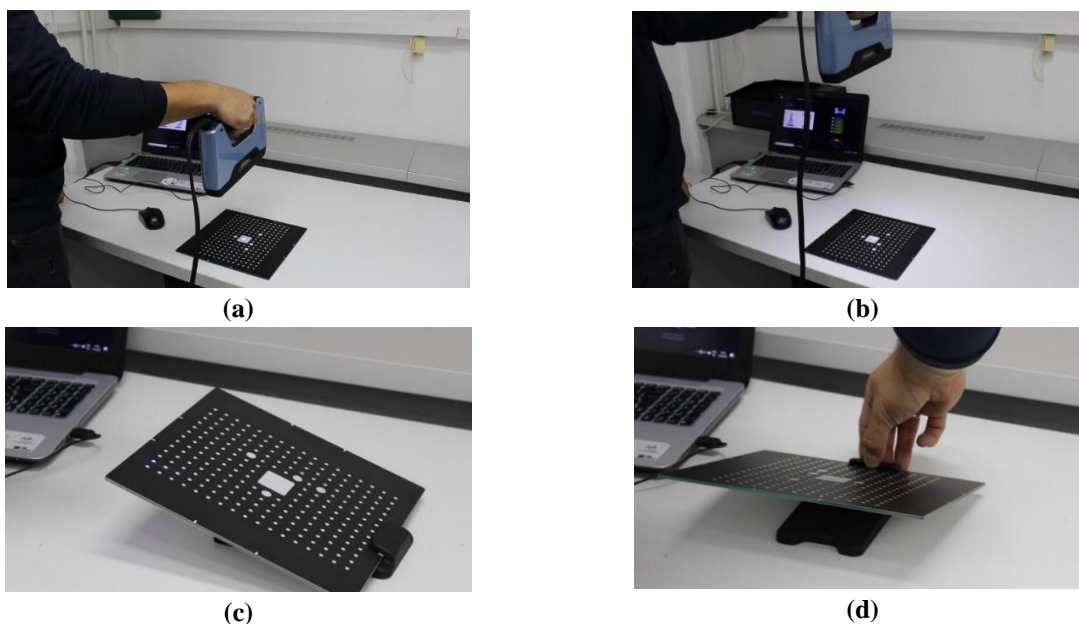
primene i mogu skenirati sve vrste objekata (male, velike, jednostavne i složene objekte). Uređaj pruža mogućnost lakog skeniranja velikih predmeta u ručnom režimu, dok u stacionarnom režimu omogućava visoku preciznost skeniranja manjih objekata kao i automatizaciju pomoću rotirajuće platforme. 3D skener obrađuje do 1.500.000 tačaka u sekundi (30 fps – *frames per second*) u režimu ručnog brzog skeniranja.

Preciznost ovog skenera za režim ručnog HD skeniranja ide do 0,05mm. *EinScan Pro 2X* skener je lagan i kompaktan što ga čini lako prenosivim [118, 119]. Nakon povezivanja skenera sa računarom putem USB-a i pokretanja softvera, urađen je postupak kalibracije (slika 33). Kalibracionu ploču je trebalo postaviti u pet različitih položaja i u svakom položaju je snimljeno po pet snimaka. Položaji ploče za kalibraciju prikazani su u uputstvu za rad softvera. Udaljenost između skenera i ploče za kalibraciju mora biti između 350mm i 450mm. Kada je kalibracija završena, softver automatski zatvara prozor za kalibraciju i ulazi na stranicu za izbor režima skeniranja.



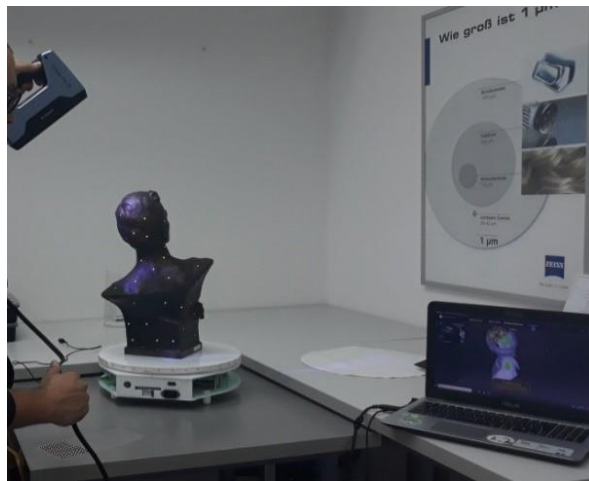
Slika 32. *EinScan 2X Pro* skener

Izabran je režim ručnog HD skeniranja i odabrano je skeniranje visoke rezolucije gde je rezolucija generisanog oblaka tačaka bila 0,2mm. Režim poravnanja postavljen je na *Mark Point*. Markeri su zalepljeni na skulpturu pre skeniranja u nasumičnom rasporedu, izbegavajući lepljenje markera u jednom redu. Nakon svih podešavanja pristupilo se procesu skeniranja. Potrebno je držati skener nasuprot objekta 3 sekunde i tek kad softver prikaže da su prikupljeni podaci sa trenutne pozicije, vrši se pomeranje skenera na sledeću poziciju. Da bi se poboljšala efikasnost skeniranja, kretanje treba da bude kontinuirano i ujednačeno. Udaljenost između skenera i skulpture mora biti između 350mm i 450mm zbog dubinske oštine. To znači da je postupak 3D skeniranja ograničen na blizinu poput bliske fotogrametrije.



Slika 33. Proces kalibracije za *EinScan 2X Pro* skener: **a)**, **b)**, **c)**, **d)** različite pozicije kalibracione table

Rezultati skeniranja su vidljivi u realnom vremenu u softveru *EinScan Pro* u kome se vrši naknadna obrada prikupljenih podataka (slika 34) [120]. Novi prikupljeni podaci o tačkama poravnavaju se sa prethodno prikupljenim na osnovu markera. Nove prikupljene tačke su označene zelenom bojom (slika 35). U ovom slučaju nisu prikupljeni podaci o teksturi nego samo o obliku skulpture, bez boje. Postoje dva razloga za to, prvi je što prezentacija teksture nije ključna za ovo istraživanje, a drugi je što *EinScan Pro* skener koji je korišćen za snimanje nema kameru u boji (eng. *texture camera*).



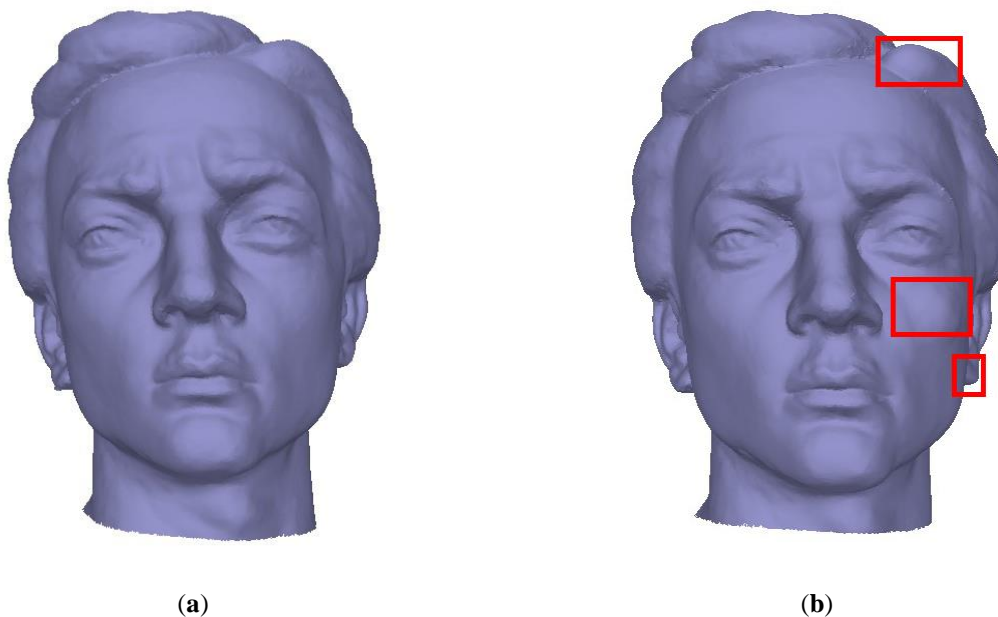
Slika 34. Prikupljanje i obrada podataka u realnom vremenu pomoću *EinScan 2X Pro* skenera

Proces skeniranja skulpture trajao je oko 45 minuta. Nakon što se sakupi oblak tačaka, moguće je kreirati geometriju 3D modela (eng. *mesh*) i izvršiti naknadnu obradu prikupljenih podataka. Na isti način skenirana je i skulptura sa dodatim masama od gline.



Slika 34. Prikupljeni oblak tačaka 3D skeniranjem: **a)** u toku prikupljanja; **b)** finalni oblak tačaka skulpture

Na slici 36 prikazani su rezultati dobijeni 3D skeniranjem, na slici 36a prikazan je originalni model, a na slici 36b model sa dodatim detaljima od gline koji su označeni crvenim pravougaonicima.



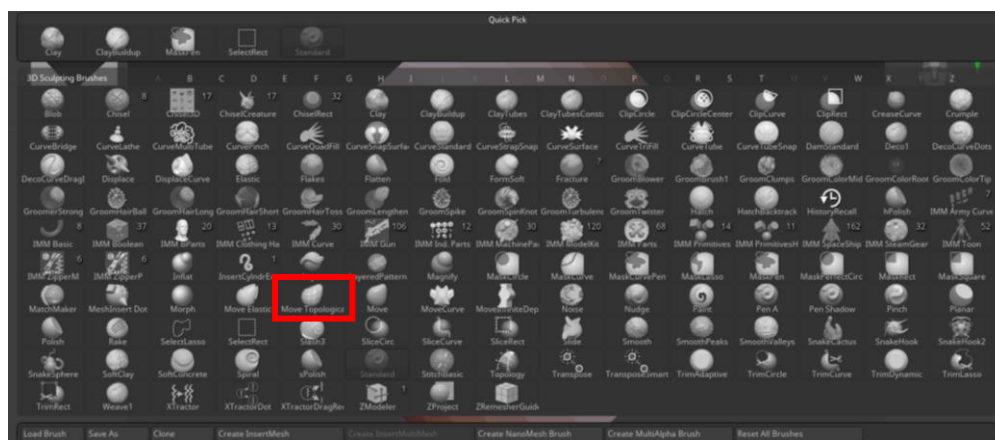
Slika 36. 3D modeli kreirani pomoću 3D skeniranja: **a)** originalni model; **b)** model sa dodatim detaljima od gline (uokvireni crvenim pravougaonicima)

5. EVALUACIJA DOBIJENIH REZULTATA

Verifikacija dobijenih rezultata urađena je na dva načina, softverskim poređenjem dobijenih 3D modela fotogrametrijom i 3D digitalizacijom strukturiranom svetlošću, ali i uz pomoć ankete koja je sprovedena nad 195 ispitanika. Kod softverskog poređenja 3D modela izmeren je sloj gline koji je nanet od strane vajara. To znači da je vršeno poređenje originalnih 3D modela (ORIG) sa 3D modelima sa digitalnom zaštitom (VAJ_GRE). U ovom koraku uporedna analiza je urađena nad 3D modelima dobijenih istom tehnikom 3D digitalizacije, tačnije, 3D model originalne skulpture dobijen fotogrametrijom upoređen je sa 3D modelom sa digitalnom zaštitom takođe dobijenim fotogrametrijom. Isti proces urađen je i za modele dobijene 3D digitalizacijom strukturiranom svetlošću. U sledećem koraku urađeno i poređenje 3D modela dobijenih različitim tehnikama, odnosno, urađena je uporedna analiza originalnih 3D modela dobijenih fotogrametrijom i 3D digitalizacijom strukturiranom svetlošću. Isti postupak ponovljen je za 3D modele sa ugrađenom zaštitom. Takođe, izmereno je odstupanje digitalne greške na 3D modelu koja je dodata prema instrukcijama vajara (VAJ_ZBR), ali u softveru, u odnosu na grešku koju je vajar fizički kreirao, nanošenjem gline na originalnu skulpturu.

5.1. Geometrijske modifikacije originalnog 3D modela skulpture u softveru *Zbrush*

Za potrebe ankete koja je deo istraživanja rađenog u okviru doktorske disertacije, a sprovedena je u svrhu evaluacije dobijenih rezultata, odnosno poređenja dobijenih 3D modela, kreirane su tri replike skulpture na kojim su geometrijske modifikacije urađene u *Zbrush* softveru. To znači da su na određene delove lica skulpture dodate mase u virtuelnom okruženju, bez ponovnog kontakta sa fizičkim objektom, kao što je to bio slučaj sa dodavanjem detalja od gline. Model originalne skulpture dobijen tehnikom 3D skeniranja (ORIG) importovan je u *Zbrush* softver i izmene su urađene pomeranjem čvorova mreže modela, vodeći računa o tome da topologija ostane ista. U tom slučaju za pomeranje čvorova mreže modela korišćena je četkica *Move Topological*. Na slici 37 prikazana je biblioteka četkica u *Zbrush* softveru.



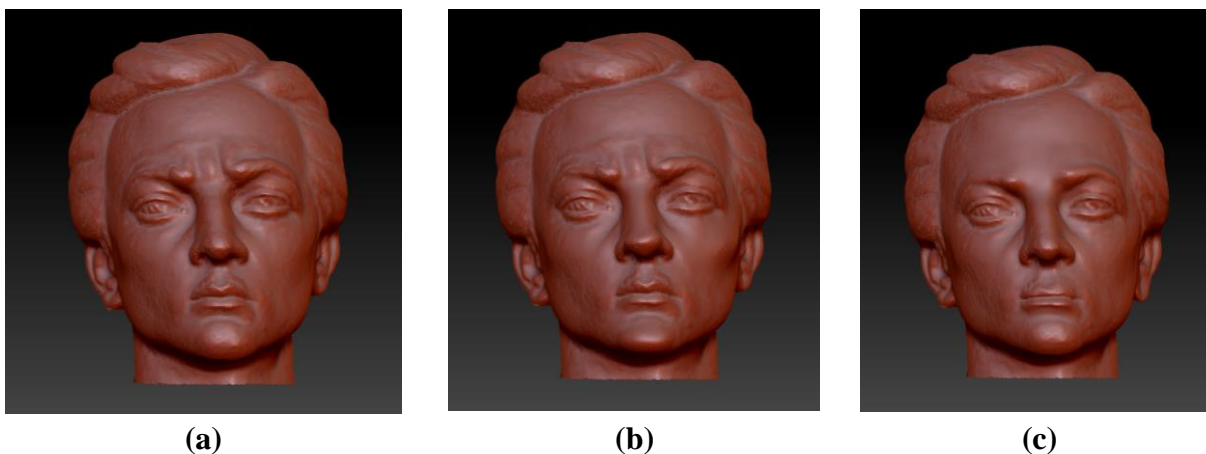
Slika 37. Biblioteka četkica u *Zbrush* softveru

Pomeranje čvorova modela u softveru urađeno je tako da imitira dodavanje masa od gline koje je urađeno od strane vajara. Digitalno vajanje u spomenutom softveru bazirano je na principima tradicionalnog vajanja, tako da su replike skulpture kreirane na ovaj način validne za korišćenje i poređenje koje je urađeno u anketi. Mase na skulpture označene sa ZBR1 i ZBR2 nisu dodate na iste delove lica na koje je vajar dodao mase od gline. Takođe, ove mase su dodate u većoj meri od onih od gline, odnosno, dodate su tako da prosečnom posmatraču budu vidljive i primetne. Promenom nekoliko parametara četkice (slika 38), moguće je u potpunosti definisati oblik i dimenzije dodatih masa na model. Parametar *Draw Size* definiše veličinu četkice, a parameter *Focal Shift* definiše površinu koja je u fokusu za izmene, dok *Z Intensity* predstavlja dubinu i pomeraj čvorova mreže u prostoru, sličnu ulogu ima i *Rgb Intensity* parametar koji pomeraj računa preko informacija o boji [121].

Na slici 39 prikazane su originalna skulptura (slika 39a), kao i replike skulpture sa dodatim detaljima u *Zbrush* softveru (slike 39b i 39c).



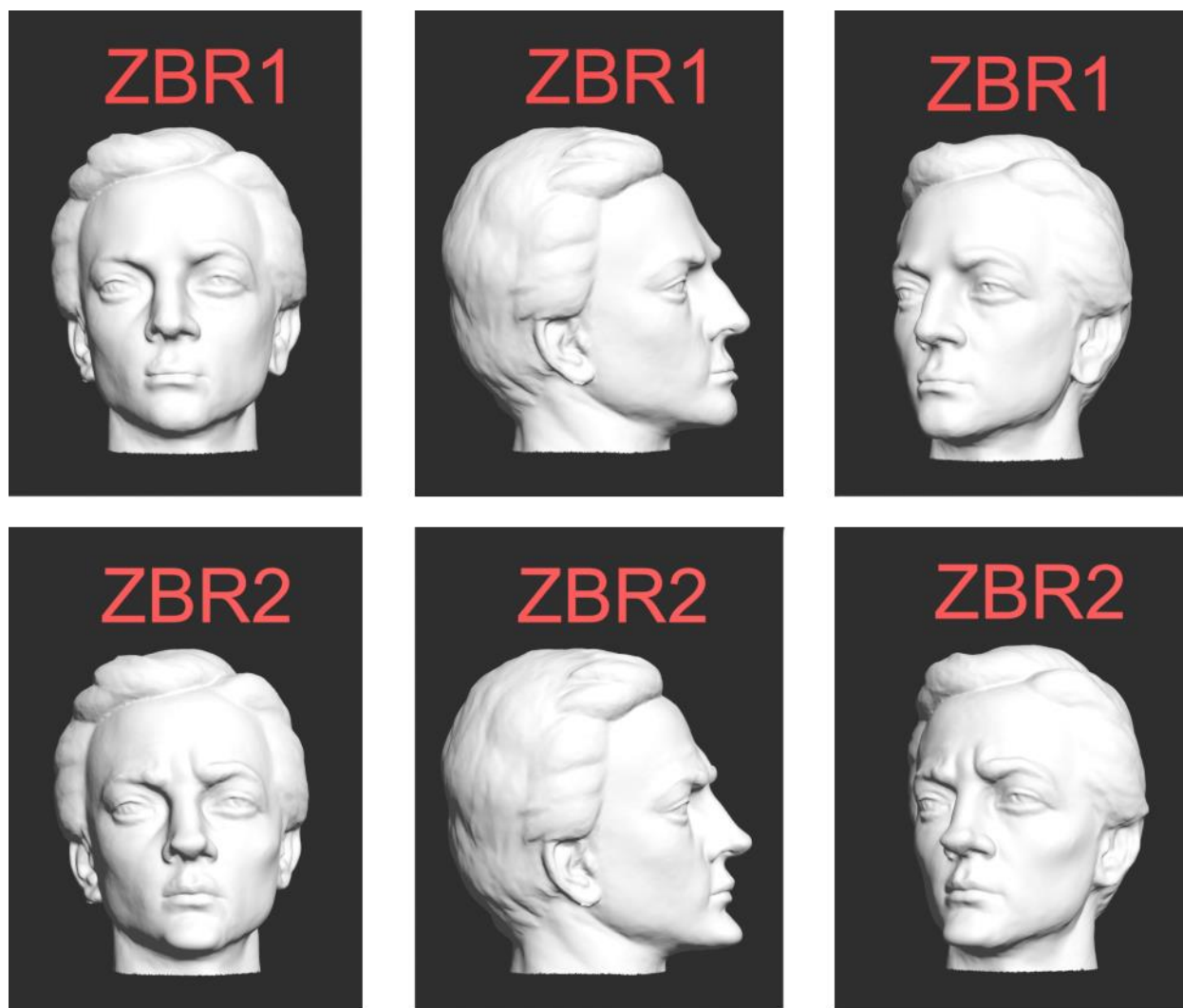
Slika 38. Parametri koji definišu izgled i uticajnost četkice u *Zbrush* softveru



Slika 38. 3D model skulpture importovan u *Zbrush* softver: **a)** 3D originalni model (ORIG); **b)** skulptura ZBR1 iz ankete; **c)** skulptura ZBR2 iz ankete

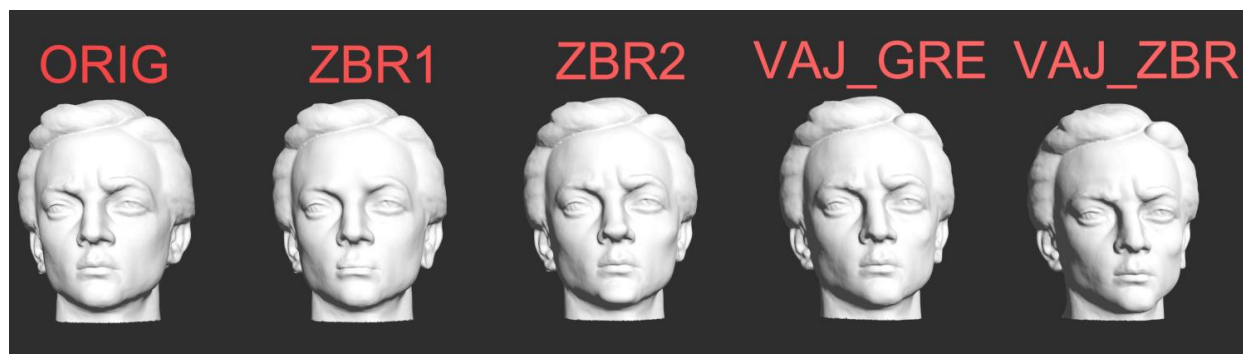
5.2. Anketa o geometrijskoj sličnosti skulptura

Inovativni pristup je verifikovan primenom ankete koja je sprovedena nad 166 studenata koji studiraju na Fakultetu tehničkih nauka, Univerziteta u Novom Sadu, a od toga oblast Računarsku grafiku 94 studenta (studenti svih pet godina – osnovne i master studije) i 72 studenta prve godine Mašinstva (M). Studenti su izabrani kao pogodna grupa za istraživanje zbog njihove orijentacije ka vizuelnoj i prostornoj prezentaciji i 3D modelovanju. Pored studenata, anketirano je još 29 građana (Ostali) koji nisu studenti i nisu studirali oblast Računarska grafika ili neku drugu srodnu oblast, tako da je ukupno anketirano 195 ispitanika. Za potrebe ovog testa kreirane su još tri varijante skulpture koja je korišćena u ovom radu, a u nove varijante modela ugrađene su geometrijske modifikacije u *Zbrush* softveru koji je specijalizovan za digitalno vajanje. Ove deformacije su dodate tako da budu vizuelno relativno lako uočljive na skulpturama označenim kao ZBR1 i ZBR2, slika 40.



Slika 40. Skulpture ZBR1 i ZBR2 u tri karakteristična pogleda (frontalni, profilni i poluprofilni) sa geometrijskim modifikacijama dodatim u *Zbrush* softveru

Kreirana je kompozicija koja se sastoji od pet skulptura koje se nalaze u jednom redu, slika 41. Originalna skulptura označena je sa ORIG, a skulptura sa ugrađenim zaštitnim elementom od gline označena je sa VAJ_GRE, dok su oznakama ZBR1 i ZBR2 označene skulpture koje su deformisane u *Zbrush*-u (sa slike 39) i to tako da se dodate modifikacije ne nalaze na istim delovima lica na koje je vajar dodao glinu. Poslednja skulptura u redu (slika 40) označena je sa VAJ_ZBR i to je skulptura na koju su dodate modifikacije u *Zbrush* softveru, ali prema instrukcijama vajara. To znači da su na iste delove lica skulpture dodate mase, ali digitalno uz pomoć miša. Ova varijanta skulpture kreirana je u cilju analize i provere da li i u kojoj meri digitalno vajarstvo u specijalizovanom softveru može da zameni tradicionalno u svrhe ugradnje zaštite na skulpturu, i to bez korišćenja dodatne opreme, kao što je heptička ruka.



Slika 41. Kompozicija različitih skulptura koja je korišćenja za anketiranje

Da bi se dobio prostorni prikaz ovih skulptura kreiran je takozvani *Turntable* video (360 stepeni) na kojem se sve skulpture rotiraju istovremeno i istom brzinom, svaka oko svoje vertikalne ose [122]. S druge strane položaj kamere je fiksni i ona snima svih pet skulptura istovremeno. Svaki ispitanik je mogao više puta da vidi video i da ga pauzira u proizvoljnom trenutku. Video traje 15 sekundi i za to vreme je svaka skulptura rotirana jednakom brzinom za 360 stepeni. Smatrali smo da je ovo prihvatljiva brzina rotacije koja svakom posmatraču omogućava da uoči detalje na skulpturama. Nakon što bi pogledali video, ispitanici su popunjavali anketu koja se sastoji od 8 pitanja i rezultati su obrađeni uz pomoć aplikacije *Google Forms*. Pitanja su:

1. Da li postoje dve iste skulpture? a. Da b. Ne
2. Ako postoje, označi adekvatne parove:
a. 1 i 2 b. 1 i 3 c. 1 i 4 d. 1 i 5 e. 2 i 3 f. 2 i 4 g. 2 i 5 h. 3 i 4 i. 3 i 5 j. 4 i 5
3. Ako ne postoje iste skulpture, koji par skulptura je najbliži:
a. 1 i 2 b. 1 i 3 c. 1 i 4 d. 1 i 5 e. 2 i 3 f. 2 i 4 g. 2 i 5 h. 3 i 4 i. 3 i 5 j. 4 i 5
4. Koja skulptura/e se najviše razlikuje od skulpture označene brojem 1?
a. 2 b. 3 c. 4 d. 5

5. Navedi delove lica, na skulpturi 2, ukoliko ste ovu skulpturu naveli u prethodnom odgovoru, po kojima se ova skulptura razlikuje od skulpture 1:

Brada	Usta/Usne	Nos
Leva jagodična kost	Desna jagodična kost	Levo oko
Desno oko	Kost donje vilice	Arkada/izbočenje čeone kosti sa leve strane
Arkada/izbočenje čeone kosti sa desne strane	Čelo	Kosa
Ušna resica na levom uhu	Ušna resica na desnom uhu	Levo uho
Desno uho		

6. Navedi delove lica, na skulpturi 3, ukoliko ste ovu skulpturu naveli u prethodnom odgovoru, po kojima se ova skulptura razlikuje od skulpture 1:

Ponuđeni odgovori su isti kao kod pitanja 5.

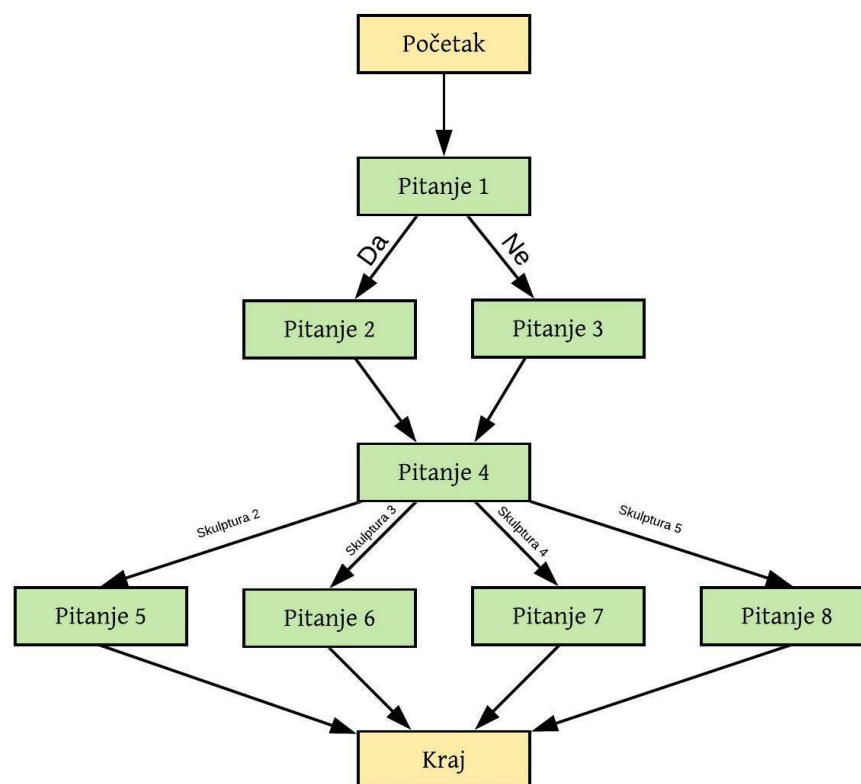
7. Navedi delove lica, na skulpturi 4, ukoliko ste ovu skulpturu naveli u prethodnom odgovoru, po kojima se ova skulptura razlikuje od skulpture 1:

Ponuđeni odgovori su isti kao kod pitanja 5.

8. Navedi delove lica, na skulpturi 5, ukoliko ste ovu skulpturu naveli u prethodnom odgovoru, po kojima se ova skulptura razlikuje od skulpture 1:

Ponuđeni odgovori su isti kao kod pitanja 5.

Svaki ispitanik odgovarao je ukupno na četiri od osam pitanja, gde kombinacija pitanja nije ista za sve ispitanike, a zavise od odgovora na prvo i četvrto pitanje. Na slici 42 prikazan je blok dijagram sa različitim kombinacijama pitanja.



Slika 42. Blok dijagram putanje kroz anketna pitanja

Ispitivanje je održano tokom aprila i septembra meseca 2021 godine. Na pitanja 2, 3, 4, 5, 6, 7 i 8 bilo je moguće dati više odgovora.

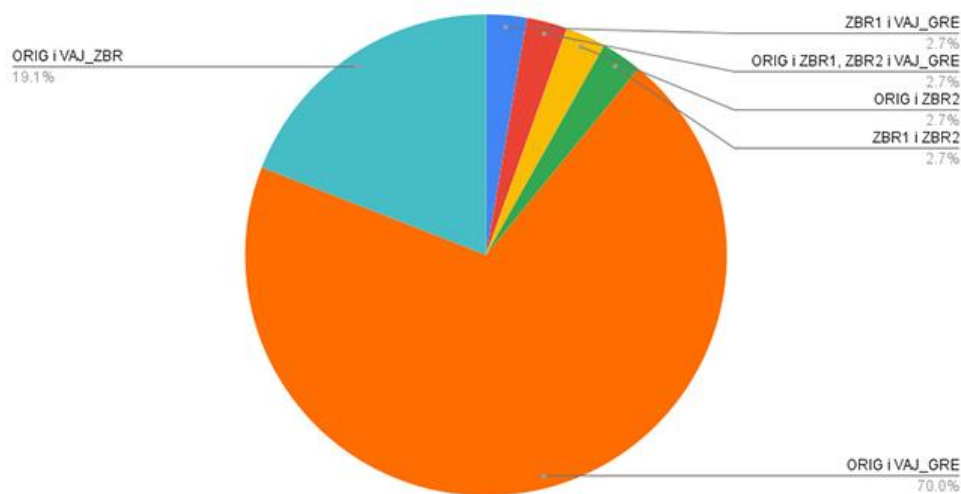
U prvoj koloni tabele 2 prikazane su grupe ispitanika, a studenti su grupisani prema godinama studija i profilu. Studenti su grupisani po godinama studija jer je smatrano da će studenti viših godina koji se duže bave vizualizacijom i 3D prezentacijama imati bolje zapažanje. S druge strane postoji i grupa ispitanika koja nema nikakve veze sa ovom oblašću jer je cilj bio da postoje odgovori prosečnih posmatrača. U drugoj koloni dati su brojevi ispitanika, u trećoj koloni su dati oni ispitanici koji su na prvo pitanje odgovorili sa Da, a na drugo da su skulpture ORIG i VAJ_GRE identične. Četvrta kolona daje ispitanike koji su na prvo pitanje odgovorili sa Ne, a na pitanje 3 su odgovorili da su skulpture ORIG i VAJ_GRE najbližije. U sledeće četiri kolone dati su brojevi ispitanika koji su odgovarali na pitanje 4, da je u odnosu na skulpturu ORIG najrazličitija skulptura ZBR1, ZBR2, VAJ_GRE odnosno VAJ_ZBR, respektivno.

Tabela 2. Analiza odgovora ispitanika na pitanja iz ankete

Grupa	Broj ispitanika	Pitanje 2 (Odgovor: Skulpture ORIG i VAJ_GRE E)	Pitanje 3 (Odgovor: Skulpture ORIG i VAJ_GRE E)	Pitanje 5 (Odgovor: Skulptura ZBR1)	Pitanje 6 (Odgovor: Skulptura ZBR2)	Pitanje 7 (Odgovor: Skulptura VAJ_GRE)	Pitanje 8 (Odgovor: Skulptura VAJ_ZBR)
I godina	16	0	9	1	15	0	0
II godina	22	3	11	6	19	0	0
III godina	18	2	11	3	17	1	2
IV godina	30	3	20	4	28	0	0
V godina (master)	8	1	7	2	7	0	0
I godina (M)	72	6	43	4	66	4	7
Ostali	29	4	19	3	24	4	7

Zatim su sumirani rezultati i može se primetiti sledeće: na prvo pitanje 81.5% ispitanika je odgovorilo da ne postoje dve iste skulpture, a 18.5% da postoje. Od ovih 18.5 je 70% odgovorilo da su iste skulpture ORIG i VAJ_GRE (slika 43).

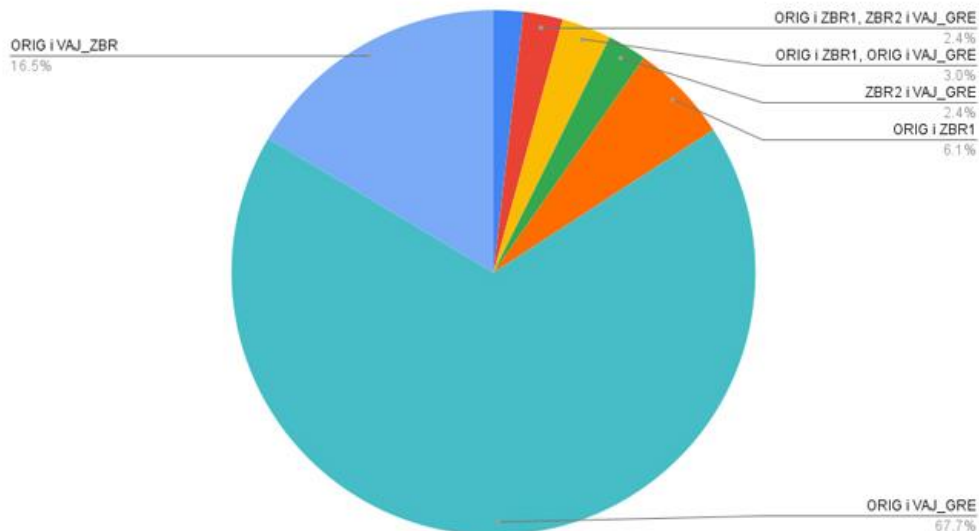
Pitanje 2. Ako postoje, navedi adekvatne parove (ukoliko ste odgovorili sa Da na pitanje 1):



Slika 43. Grafik odgovora na pitanje broj 2

Od 81.5% ispitanika koji su na prvo pitanje odgovorili sa Ne, njih 67.7% je odgovorilo na pitanje 3, da su najslićnije skulpture ORIG i VAJ_GRE (slika 44).

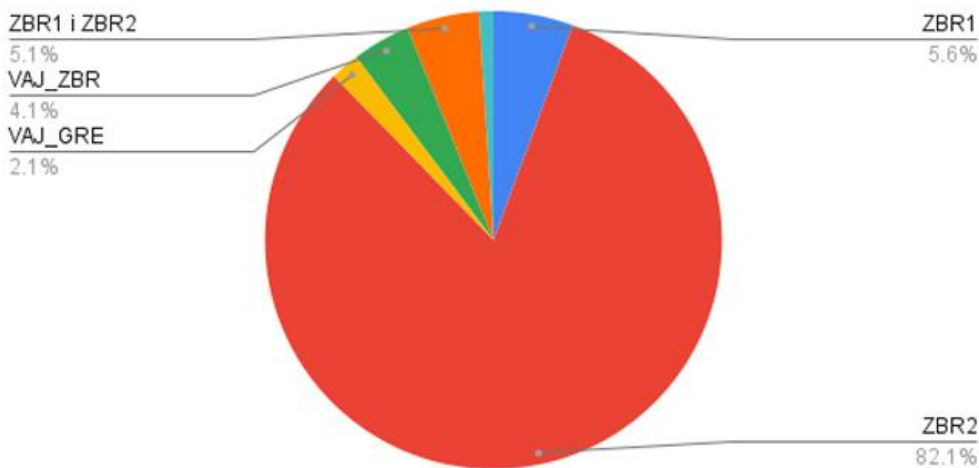
Pitanje 3. Ako ne postoje iste skulpture, koji par skulptura je najbliži:



Slika 44. Grafik odgovora na pitanje broj 3

Na pitanje 4 odgovarali su svi ispitanici, a pitanje je bilo Koja od četiri skulpture ZBR1, ZBR2, VAJ_GRE i VAJ_ZBR se najviše razlikuje od skulpture ORIG (slika 45)?

Pitanje 4. Koja skulptura(e) se najviše razlikuje od skulpture označene sa ORIG?



Slika 45. Grafik odgovora na pitanje broj 4

Na grafiku su prikazane oznake skulptura i procenti glasanja ispitanika, pri čemu su neki ispitanici rekli da se dve skulpture (između ZBR1, ZBR2 i VAJ_GRE) znatno razlikuju od skulpture ORIG, (kombinacije ZBR1 i ZBR2, odnosno ZBR2 i VAJ_GRE). Dominantno 82.1% anketiranih je primetilo da se skulptura ZBR2 najviše razlikuje od skulpture ORIG, što je tačan

odgovor. Podsećanja radi, skulpture ZBR1 i ZBR2 su dobijene od skulpture ORIG pomeranjem čvorova nasumično, a te deformacije su bile veće nego kod skulpture VAJ_GRE (koju je kreirana u saradnji sa vajarom). Može se primetiti i da su ispitanici ocenili da se skulptura VAJ_ZBR razlikuje od skulpture ORIG više od skulpture VAJ_GRE. To ukazuje da je modifikacija 3D modelu skulpture kreirana u saradnji sa vajarom, ali ugrađena digitalno vizuelno uočljivija od one kreirane od strane vajara uz pomoć gline.

Prva tri reda pokazuju da su studenti viših godina studija (IV i V) bolje uočili razlike između skulptura. Tako su studenti V godine u 100% slučajeva ($100\% \cdot (1+7)/8$) videli da su skulpture (ORIG) i (VAJ_GRE) iste ili najslabije. Kod studenata IV godine uspešnost je 76.7% ($100\% \cdot (3+20)/30$), studenti III godine uspešnost je 72.2%. Studenti II godine imali su uspešnost 63.6%, a studenti I godine imali su uspešnost 56.3%. Studenti prve godine mašinstva su imali uspešnost 68%. Dok su ostali građani imali 79.3%. Većina anketiranih iz grupe Ostali (86%) imaju univerzitetsko obrazovanje različitih orijentacija.

5.3. Poređenje geometrije modela dobijenih primenom skenera *EinScan Pro 2X* u *MeshLab* softveru

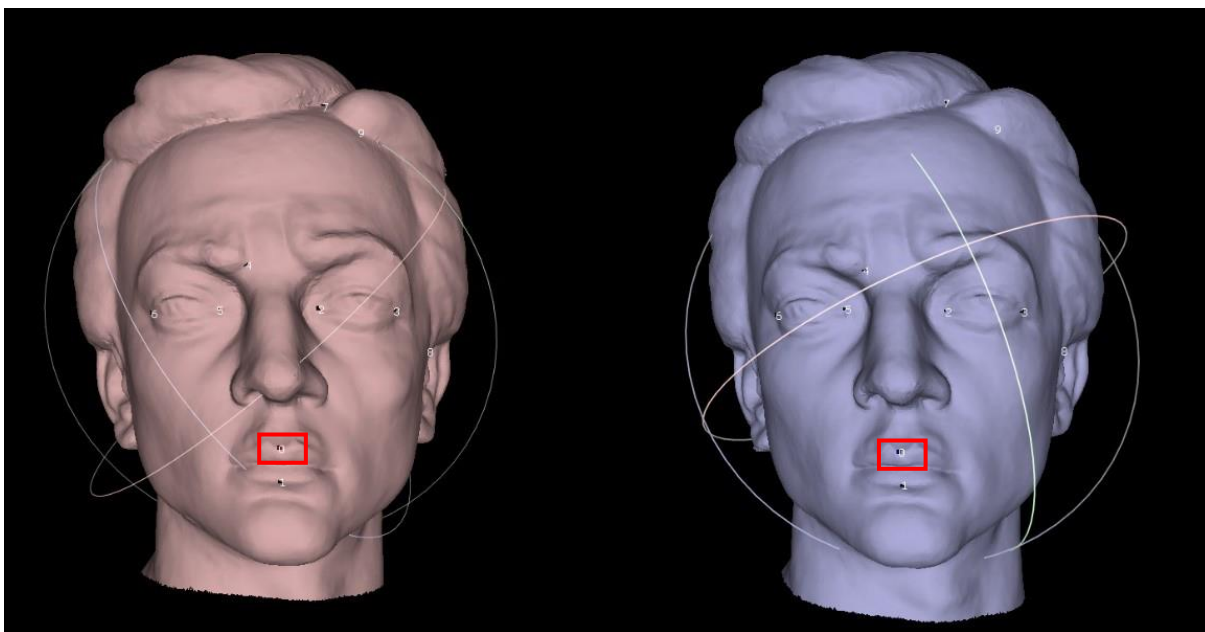
Softver *MeshLab* je korišćen za poređenje geometrijskih detalja dva dobijena 3D modela (primenom tehnike 3D skeniranja strukturiranom svetlošću) - originalnog modela (ORIG) i modela sa digitalnom zaštitom (VAJ_GRE). Referentni model bio je 3D model originalne skulpture. Oba 3D modela (originalni i model sa digitalnom zaštitom) su uvezeni i njihove pozicije su preklopljene u *MeshLab*-u radi analize geometrijskih odstupanja na 3D modelu sa digitalnom zaštitom u poređenju sa referentnim originalnim 3D modelom skulpture. Originalni i model sa digitalnom zaštitom upoređeni su u *MeshLab*-u izračunavanjem geometrijske udaljenosti čvorova na mreži 3D modela, korišćenjem filtera *Distance from Reference Mesh*.

Najpre su oba modela (originalni model i model sa digitalnom zaštitom) importovana u softver *Meshlab* (slika 46).



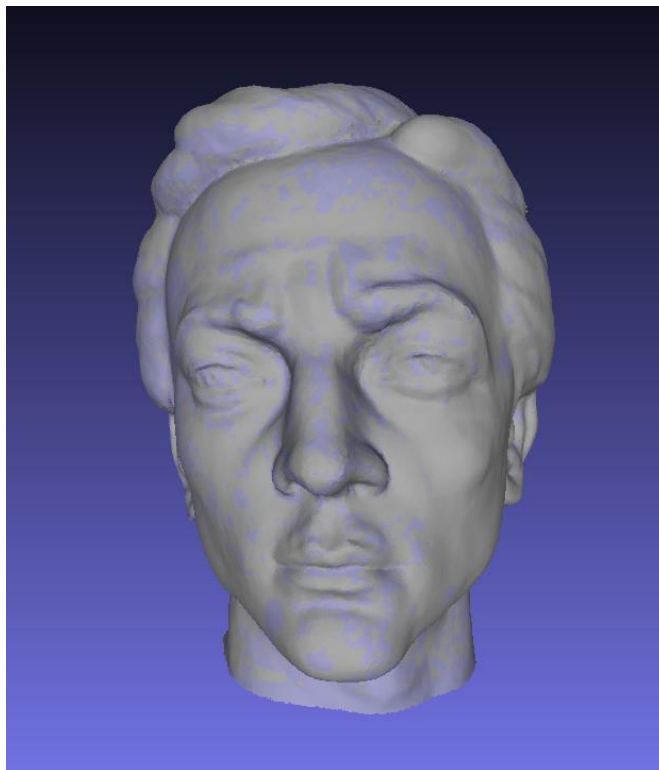
Slika 46. Skenirani modeli koji nisu poravnati uvezeni u *MeshLab* softver

Kada su modeli importovani, da bi njihova geometrija mogla biti upoređena, bilo je potrebno poravnati njihove pozicije i orijentacije. Ovaj korak je urađen uz korišćenje opcije *Align* u *MeshLab* softveru. Pre početka poravnanja pozicije i orijentacije modela, potrebno je definisati koji model je referentni model. To znači da se pozicija i orijentacija drugog modela poravnava sa pozicijom i orijentacijom referentnog modela. U ovom slučaju, referentni model je model koji je dobijen 3D digitalizacijom originalne skulpture. Kada je spomenuti model proglašen referentnim modelom, i izabrana opcija poravnanja modela na osnovu ključnih/referentnih tačaka, bilo je potrebno na oba modela postaviti ključne tačke (slika 47). Ključne tačke su postavljene na karakterističnim delovima lica. Referentne tačke ne smeju da pripadaju zonama „vajarske greške“. Treba naglasiti da tačke na osnovu kojih se vrši poravnanje modela proizvoljno postavlja/bira korisnik i da od preciznosti zadatih pozicija istih tačaka na oba modela zavisi i preciznost i tačnost finalnog rezultata. Softver prepoznaje ključne tačke i vrši njihovo uparivanje na modelima na osnovu indeksa, odnosno, rednog broja tačke prema kojem su zadate na modelu. Na primer, ukoliko se tačka sa indeksom 0 nalazi na sredini gornje usne na referentnom modelu, tačka sa istim indeksom mora da se nalazi na istoj poziciji i na modelu koji se poredi sa referentnim, to je prikazano na slici 47. Proces postavljanja ključnih tačaka vrši se manuelno.



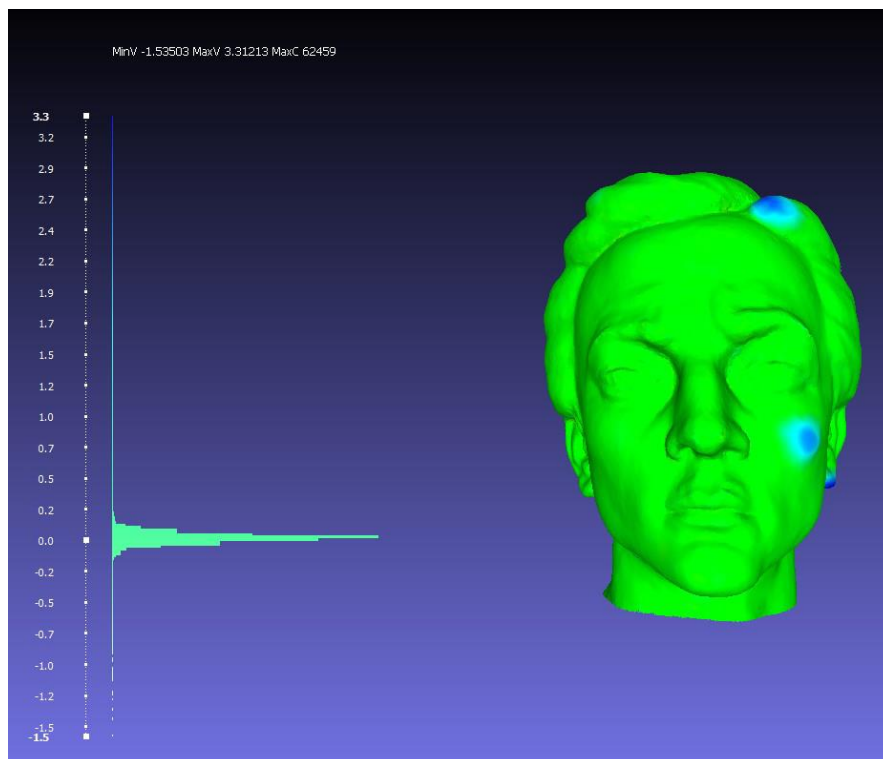
Slika 47. Postavljanje ključnih tačaka na modelima za postupak poravnanja modela

Nakon što su postavljene ključne tačke na oba modela, vrši se njihovo poravnanje pozivom opcije *Process*. Poravnati modeli prikazani su na slici 48.



Slika 48. Modeli čije pozicije su poravnate

Kada su modeli poravnati, vršeno je njihovo poređenje, odnosno udaljenosti čvorova na mreži 3D modela uz korišćenje *Distance from Reference Mesh* filtera. Ovaj filter je automatski i određuje udaljenost između čvorova i na konkavnim i na konveksnim delovima geometrije modela. Da bi razlika/greška koja je izmerena korišćenjem spomenutog filtera bila vizuelno reprezentovana korišćen je još jedan filter u softveru *MeshLab*, a to je *Colorize by Vertex Quality*, gde vrednost *vertex quality* predstavlja vrednost izmerene udaljenosti između čvorova i na osnovu te vrednosti (u zavisnosti da li je pozitivna ili negativna) boji model odgovarajućom bojom. Rezultati poređenja modela prikazani su na slici 49. Rezultati poređenja skulptura koje su dobijene skeniranjem strukturiranom svetlošću su realni i iznose nekoliko milimetara, što odgovara količini gline koju je vajar dodao. Na histogramu sa slike 49 se vidi da je najveći deo korespondentnih čvorova analizirana dva modela na rastojanju u intervalu $(-0.1, 0.2)$ mm i na samoj skulpturi te vrednosti su prikazane zelenom bojom. Plavom bojom su označene tri zone gde je vajar dodao glinu i tu su odstupanja između čvorova oko 3mm. Najviše ima tačaka sa odstupanjem koje je jednako nuli. Rezultati pokazuju da ova tehnika komparativne analize 3D modela realno pokazuje korekcije koje su urađene na modelu. Takođe, naša analiza prikazana u poglavlju 5.4. je pokazala da oba softvera za poređenja površina i tačaka, a to su *MeshLab* i *CloudCompare* daju slične rezultate.



Slika 49. Rezultati poređenja modela dobijenih procesom 3D skeniranja u *MeshLab* softveru

5.4. Poređenje geometrije modela dobijenih metodama fotogrametrije i strukturirane svetlosti u *CloudCompare* softveru

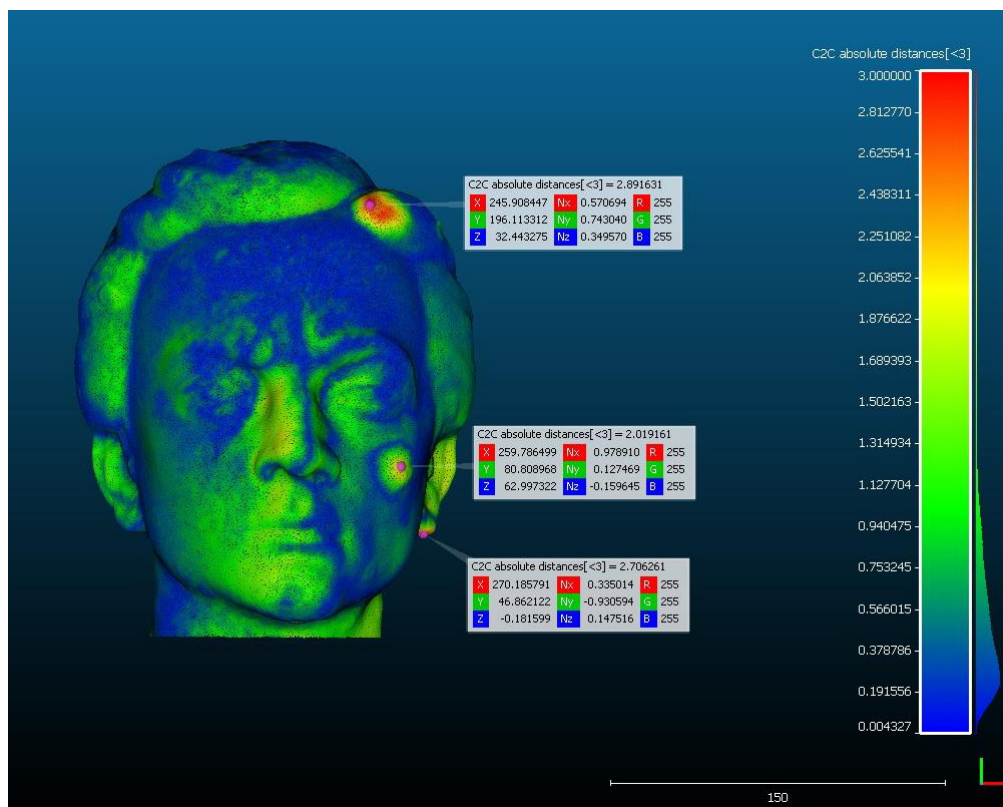
Za 3D digitalizaciju skulpture korišćene su dve tehnike: fotogrametrija i strukturirana svetlost. Poređenje dobijenih modela urađeno je u *CloudCompare* softveru i to na dva načina. Kod prvog načina poređenja se vrši poravnanje oblaka tačaka preko karakterističnih tačaka koje manuelno zadaje korisnik, dok se kod drugog načina poređenje vrši automatski korišćenjem *Iterative Closest Point* (ICP) algoritma. Ovaj algoritam ne zahteva zadavanje karakterističnih tačaka i ima visoku tačnost [123, 124]. Kod manuelnog zadavanja karakterističnih tačaka za poređenje od preciznosti definisanih tačaka zavisi i tačnost finalnih rezultata. Kada se oblaci tačaka poravnaju vrši se merenje udaljenosti karakteristične tačke modela koji se poredi u odnosu na korespondentnu tačku na referentnom modelu. U prvom slučaju poređene su originalna skulptura (ORIG) koja je dobijena fotogrametrijom sa skulpturom sa ugrađenom zaštitom (VAJ_GRE) koja je takođe 3D digitalizovana fotogrametrijom. U drugom slučaju poređene su originalna (ORIG) i skulptura sa ugrađenom zaštitom (VAJ_GRE), a oba 3D modela su dobijena skeniranjem strukturiranom svetlošću. U trećem slučaju poređena je originalna skulptura (ORIG) čiji je 3D model dobijen na dva načina, fotogrametrijom i skeniranjem, u četvrtom slučaju poređena je skulptura sa ugrađenom zaštitom (VAJ_GRE) čiji je 3D model dobijen pomoću fotogrametrije i skeniranja. Oba načina poređenja (manuelno zadavanje karakterističnih tačaka i poređenje korišćenjem ICP algoritma) primenjena su u sva četiri navedena slučaja.

5.4.1. Poređenje modela manuelnim zadavanjem karakterističnih tačaka

5.4.1.1. *Originalni (ORIG) i model s ugrađenim zaštitnim elementom (VAJ_GRE) dobijeni fotogrametrijom*

Na slici 50 prikazani su rezultati dobijeni fotogrametrijom (originalni model (ORIG) i 3D model sa digitalnom zaštitom (VAJ_GRE)). Referentni model je originalni 3D model, dok je model koji se poredi, model sa digitalnom zaštitom. Uporednom analizom ova dva modela ustanovljeno je da apsolutno odstupanje ima vrednost 3mm. Odnosno, to je najveća vrednost odstupanja, kako je i prikazano na histogramu (vrednosti označene crvenom bojom). Najmanje ima tačaka koje imaju najveću vrednost odstupanja (od 3mm), kao što se može zaključiti i sa slike. Tačke koje imaju najveće odstupanje od referentnih modela se nalaze u oblastima gde je glina dodata na skulpturu i u tim oblastima analizirane su vrednosti koordinata tri tačke (na uhu, jagodici i kosi) i distance u odnosu na tačke na referentnom modelu iznose 2.706mm, 2.019mm i 2.891mm, respektivno. Najviše je tačaka koje imaju odstupanje između 0.2mm i 0.3mm, to su vrednosti koje su na histogramu obojene plavom bojom.

Za svaku izabranu tačku prikazane su (X, Y, Z) koordinate, sa N_x , N_y i N_z su prikazane projekcije jediničnog vektora normale posmatrane tačke na ose koordinatnog sistema xyz. Svaka komponenta RGB modela je u intervalu 0-255. Boje oblasti na oblaku tačaka odgovaraju bojama na histogramu. Vrednost odstupanja na histogramu prikazana je na vertikalnoj osi, dok je na horizontalnoj osi sa desne strane histograma prikazan broj tačaka sa tim odstupanjem.

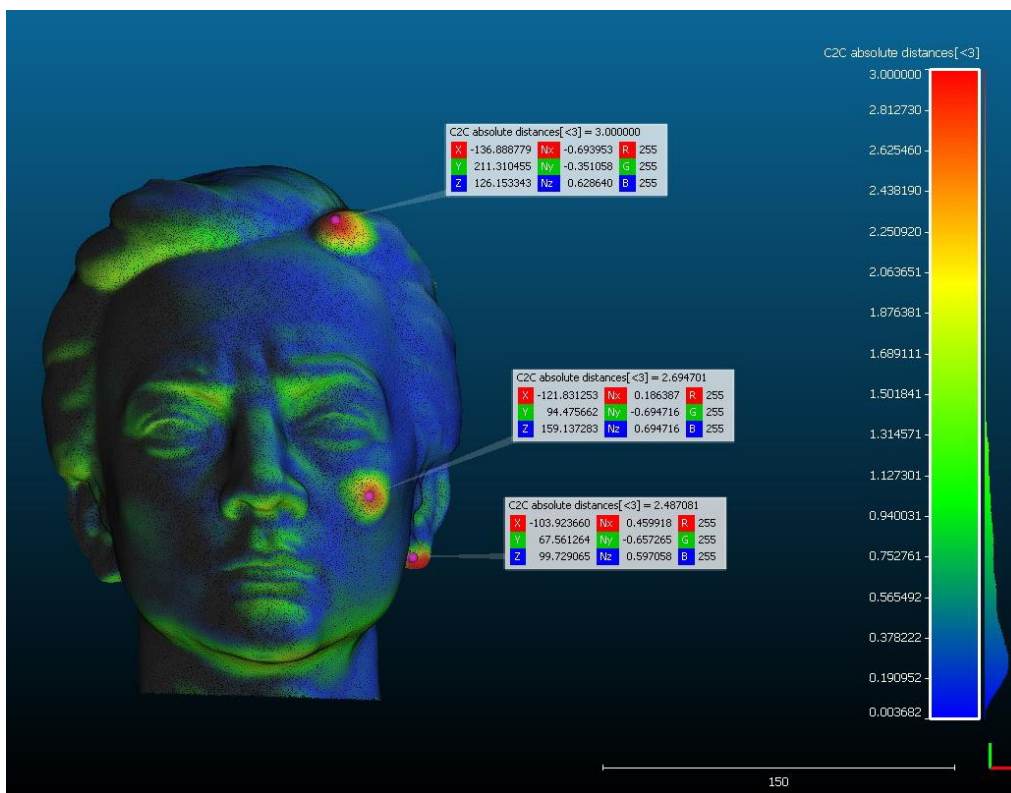


Slika 50. Rezultati poređenja modela dobijenih fotogrametrijom u *CloudCompare* softveru

Vrednost prosečnog odstupanja iznosi 0.219mm, dok standardna devijacija odstupanja modela sa digitalnom zaštitom iznosi 0.594mm.

5.4.1.2. Originalni (ORIG) i model s ugrađenim zaštitnim elementom (VAJ_GRE) dobijeni primenom skenera *EinScan Pro 2X*

Na slici 51 prikazani su rezultati dobijeni 3D skeniranjem sistemom *EinScan Pro 2X* (originalni model (ORIG) i 3D model sa digitalnom zaštitom (VAJ_GRE)). Referentni model je originalni 3D model. Uporednom analizom ova dva modela procenjeno je da apsolutno odstupanje ima vrednost 3mm (vrednosti označene crvenom bojom). Tačke koje imaju najveće odstupanje od referentnog modela se nalaze u oblastima gde je glina dodata na skulpturu i u tim oblastima očitane su vrednosti koordinata tri tačke (na uhu, jagodici i kosi) i distance u odnosu na tačke na referentnom modelu iznose 2.487mm, 2.694mm i 3mm, respektivno. Najviše je tačaka koje imaju odstupanje između 0.2mm i 0.3mm, to su vrednosti koje su na histogramu obojene plavom bojom.

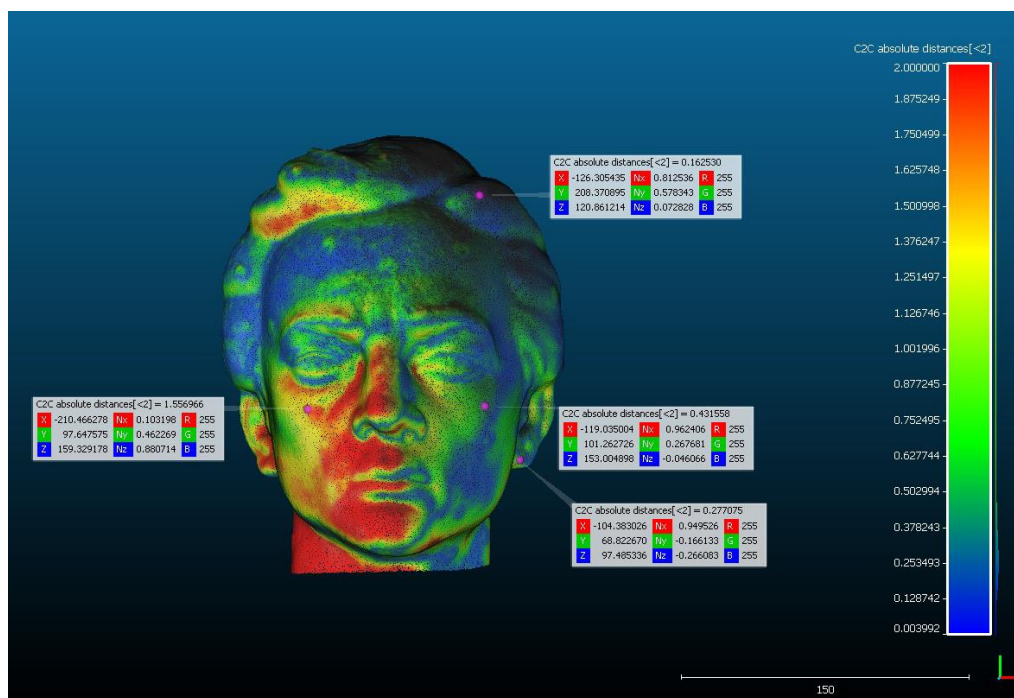


Slika 51. Rezultati poređenja modela dobijenih 3D skeniranjem sistemom *EinScan Pro 2X* u *CloudCompare* softveru

Vrednost prosečnog odstupanja iznosi 0.265mm, dok standardna devijacija odstupanja modela sa digitalnom zaštitom iznosi 0.641 mm.

5.4.1.3. Poređenje originalnih modela (ORIG) dobijenih 3D skenerom *EinScan Pro 2X* i fotogrametrijom

S obzirom da su modeli dobijeni različitim tehnikama 3D digitalizacije, fotogrametrijom i strukturiranom svetlošću, analizirani su dobijeni rezultati. U poređnom analizom originalnog modela dobijenog 3D skeniranjem sistemom *EinScan Pro 2X* i originalnog modela dobijenog fotogrametrijom određene su vrednosti odstupanja između ova dva modela. U ovom slučaju referentni model je originalni model dobijen primenom 3D skenera *EinScan Pro 2X*, dok je model koji se poredi, odnosno, čije odstupanje se meri, originalni model dobijen fotogrametrijom. Na slici 52 prikazani su dobijeni rezultati analize. Apsolutno odstupanje ima vrednost 2mm (vrednosti označene crvenom bojom na histogramu). Tačke sa najvećom vrednošću odstupanja (od 2mm) se nalaze na delovima lica, kao što su vrat, brada, nos, levo uho, levi obraz i deo kose sa leve strane. Izdvojena je jedna tačka (na desnom obrazu) iz oblasti sa najvećim odstupanjem i odstupanje za tu tačku iznosi 1.556mm. Tačke na delovima lica sa leve strane (uho, jagodica, kosa) imaju odstupanja 0.277mm, 0.431mm i 0.162mm, respektivno.



Slika 52. Rezultati poređenja originalnih modela (ORIG) dobijenih skenerom *EinScan Pro 2X* i fotogrametrijom u *CloudCompare* softveru

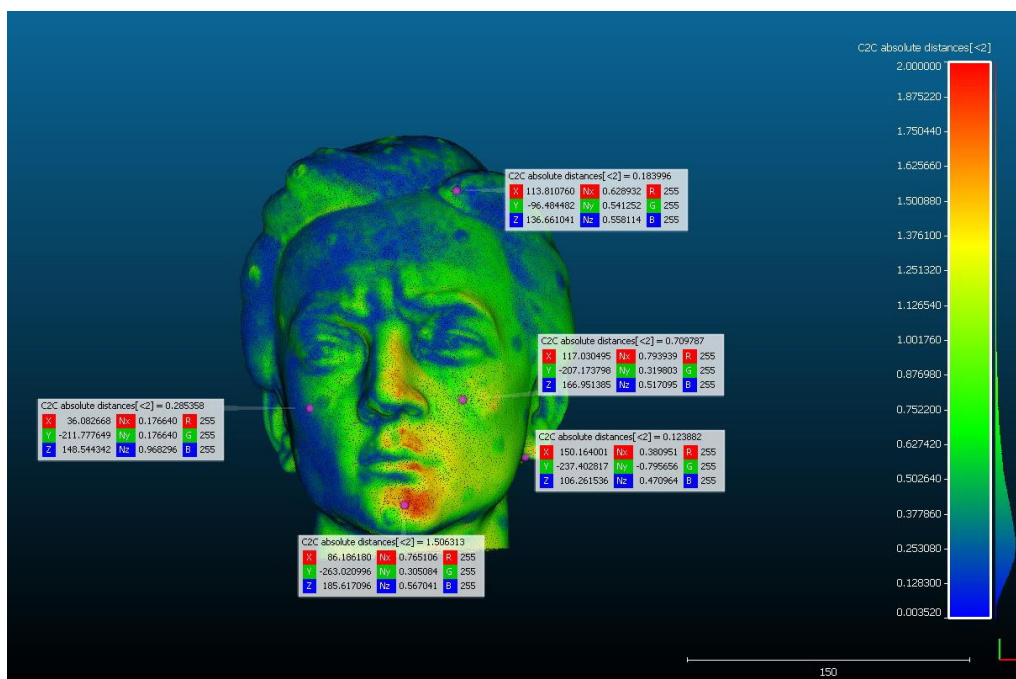
Najveći broj tačaka je u plavoj i zelenoj zoni gde su odstupanja između 0.1 - 0.4mm. Očigledno je da tehnike koje su korišćene, strukturirana svetlost i fotogrametrija ne dovode do apsolutno istih modela, što je i očekivano. Korišćene su obe tehnike sa željom da se dođe do zaključka koja tehnika je optimalnija za korišćenje u konkretnom slučaju 3D digitalizacije skulpture. Razlog za primenu skenera *EinScan Pro 2X* je potvrda tačnosti primenjene fotogrametrijske metode. *EinScan Pro 2X* je komercijalni sistem koji ima utvrđenu tačnost (tj. mernu nesigurnost) dok kod fotogrametrije to nemamo i zato nam dobro dođe poređenje sa bar jednim referentnim sistemom. Verovatno je uvek bolje koristiti sistem za koji znamo mernu nesigurnost u odnosu na neki koji ne znamo, ali sa druge strane fotogrametrija je mnogo jeftinija i pristupačnija i ovde se pokazalo da je ona primenjiva u okviru razvijenog inovativnog pristupa. Takođe, kao što je već napomenuto rezultati mogu da zavise i od preciznosti korisnika kod zadavanja karakterističnih tačaka.

Vrednost prosečnog odstupanja iznosi 0.366mm, dok standardna devijacija odstupanja modela sa digitalnom greškom iznosi 0.751mm.

5.4.1.4. Poređenje modela sa ugrađenim zaštitnim elementom (VAJ_GRE) dobijenih 3D skenerom *EinScan Pro 2X* i fotogrametrijom

Uporednom analizom modela sa digitalnom zaštitom dobijenog primenom skenera *EinScan Pro 2X* i modela sa digitalnom zaštitom dobijenog fotogrametrijom izmerene su vrednosti odstupanja

između ova dva modela. U ovom slučaju referentni model je model dobijen skeniranjem sistemom *EinScan Pro 2X*, dok je model koji se poredi, odnosno, čije odstupanje se meri, model dobijen fotogrametrijom. Na slici 53 prikazani su dobijeni rezultati analize. Analizom ova dva modela procenjeno je da apsolutno odstupanje ima vrednost 2mm (vrednosti označene crvenom bojom, slika 53). Izdvojena je jedna tačka (na bradi) iz oblasti sa najvećim odstupanjem i odstupanje za tu tačku iznosi 1.506mm. Tačke na delovima lica sa leve strane (uho, jagodica, kosa) imaju odstupanja 0.123mm, 0.709mm i 0.183mm, respektivno. Histogram pokazuje da najveći broj verteksa između dva analizirana modela ima odstupanje u intervalu 0.05-0.9mm.



Slika 53. Rezultati poređenja modela sa ugrađenim zaštitnim elementom (VAJ_GRE) dobijenih primenom 3D skenera *EinScan Pro 2X* i fotogrametrijom u *CloudCompare* softveru

Vrednost prosečnog odstupanja iznosi 0.150mm, dok standardna devijacija odstupanja modela sa digitalnom greškom iznosi 0.503mm.

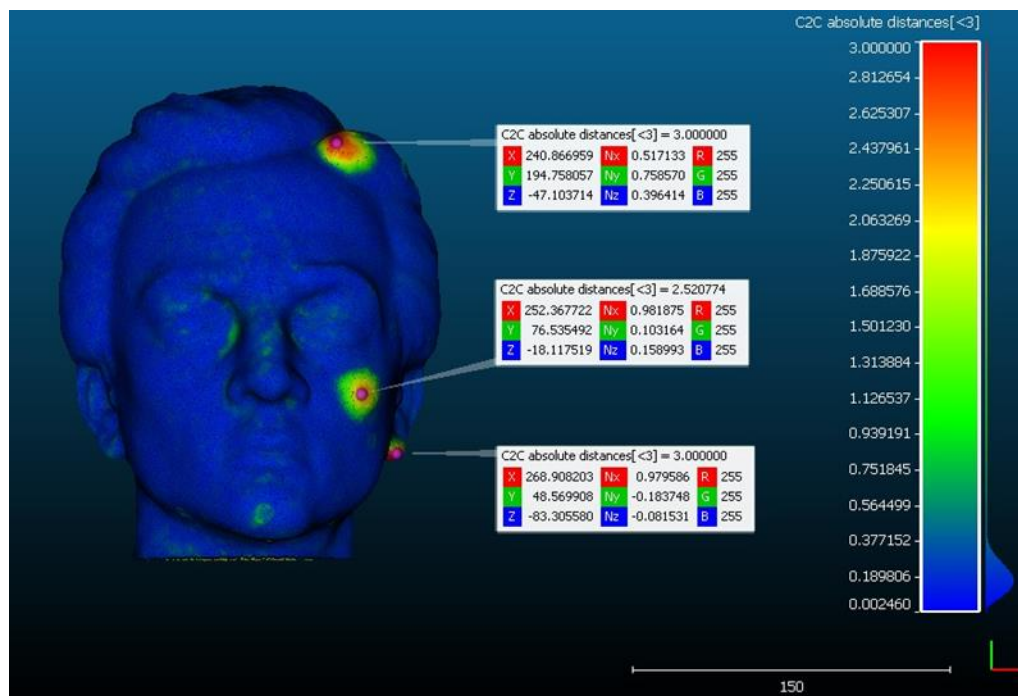
5.4.2. Poređenje modela zadavanjem tačaka uz korišćenje ICP algoritma

Drugi način poređenja 3D modela dobijenih fotogrametrijom i 3D skeniranjem sistemom *EinScan Pro 2X* podrazumeva korišćenje ICP algoritma koji je automatski i ima visoku tačnost. To znači da nema manuelnog zadavanja karakterističnih tačaka na 3D modelima od strane korisnika, a koje može da dovede do pojave grešaka i odstupanja kod finalnog rezultata. Kombinacije modela za poređenje su iste kao i kod poređenja modela gde su karakteristične tačke zadate manuelno, a to znači da su u prvom slučaju poređene originalna skulptura (ORIG) koja je dobijena fotogrametrijom sa skulpturom sa ugrađenim zaštitnim elementom (VAJ_GRE) koja je takođe digitalizovana fotogrametrijom, u drugom slučaju poređena je originalna (ORIG) i

skulptura sa ugrađenim zaštitnim elementom (VAJ_GRE), a oba 3D modela su dobijena 3D skeniranjem sistemom *EinScan Pro 2X*, u trećem slučaju poređena je originalna skulptura (ORIG) čiji je 3D model dobijen na dva načina, fotogrametrijom i 3D skenerom *EinScan Pro 2X*, u četvrtom slučaju poređena je skulptura sa ugrađenim zaštitnim elementom (VAJ_GRE) čiji je 3D model dobijen pomoću fotogrametrije i 3D skeniranjem sistemom *EinScan Pro 2X*.

5.4.2.1. Originalni (ORIG) i model s ugrađenim zaštitnim elementom (VAJ_GRE) dobijeni fotogrametrijom

U ovom slučaju upoređeni su originalni model (ORIG) i model sa digitalnom zaštitom (VAJ_GRE) dobijeni fotogrametrijom (isti slučaj kao onaj prikazan na slici 50). Na slici 54 može se primetiti da modelom dominira plava boja, a to znači da ima najviše tačaka sa odstupanjem 0.002 - 0.377mm.

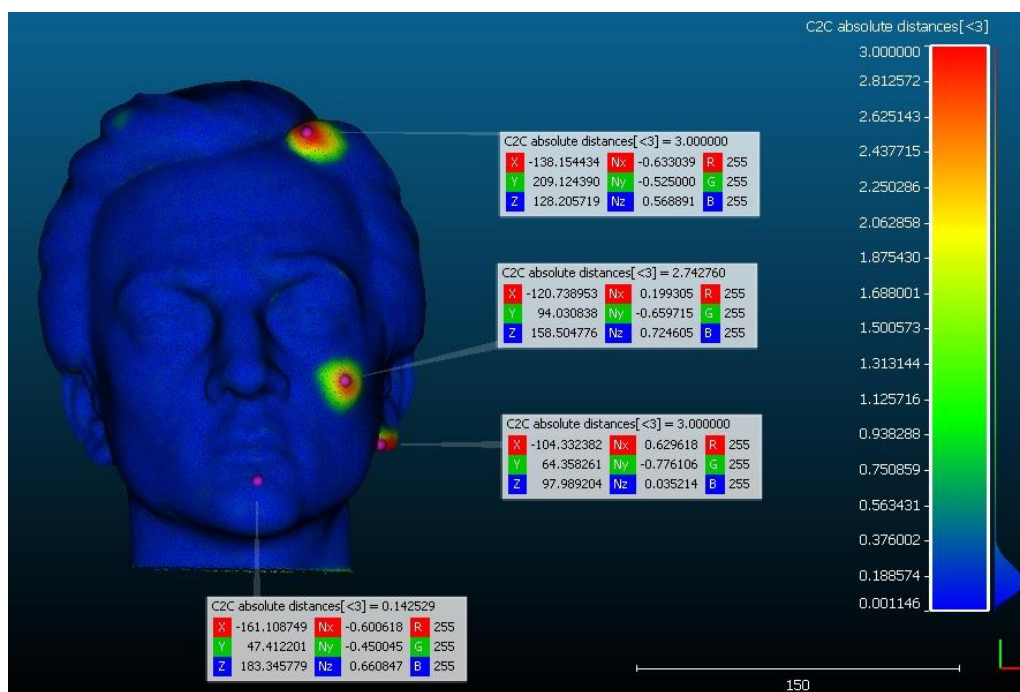


Slika 54. Rezultati poređenja modela dobijenih fotogrametrijom u *CloudCompare* softveru uz korišćenje ICP algoritma za poravnanje modela

Najveća odstupanja izmerena su u zonama gde je dodata glina na skulpturu. Vizuelna reprezentacija boja na histogramu, kao i na samom modelu ukazuje da su dobijeni precizniji rezultati u odnosu na one sa slike 50. To potvrđuju i izmerene vrednosti: prosečno odstupanje 0.029mm i standardna devijacija 0.235mm.

5.4.2.2. Originalni (ORIG) i model s ugrađenim zaštitnim elementom (VAJ_GRE) dobijeni 3D skenerom EinScan Pro 2X

Kao i u slučaju manuelnog zadavanja karakterističnih tačaka, u drugom slučaju upoređeni su modeli dobijeni 3D skeniranjem sistemom *EinScan Pro 2X*, originalni model (ORIG) i model sa digitalnom zaštitom (VAJ_GRE). I u ovom slučaju, uz korišćenje ICP algoritma dobijeni su povoljniji, odnosno, precizniji rezultati, nego u slučaju prikazanom na slici 51. Na slici 55 prikazani su rezultati spomenutih modela, ali uz korišćenje ICP algoritma. Takođe, vizuelna reprezentacija odstupanja i na modelu, ali i na histogramu pokazuje da su odstupanja modela najveća u zonama lica gde je dodata glina i da su te vrednosti oko 3mm, što odgovara realnoj situaciji. Odstupanja na ostalim delovima lica imaju vrednost 0.001 - 0.376mm. Izmerene su vrednosti prosečnog odstupanja i standardne devijacije, koje iznose 0.025mm i 0.226mm, respektivno. Može se primetiti da su vrednosti prosečnog odstupanja i standardne devijacije manje nego u slučaju prikazanom na slici 51.

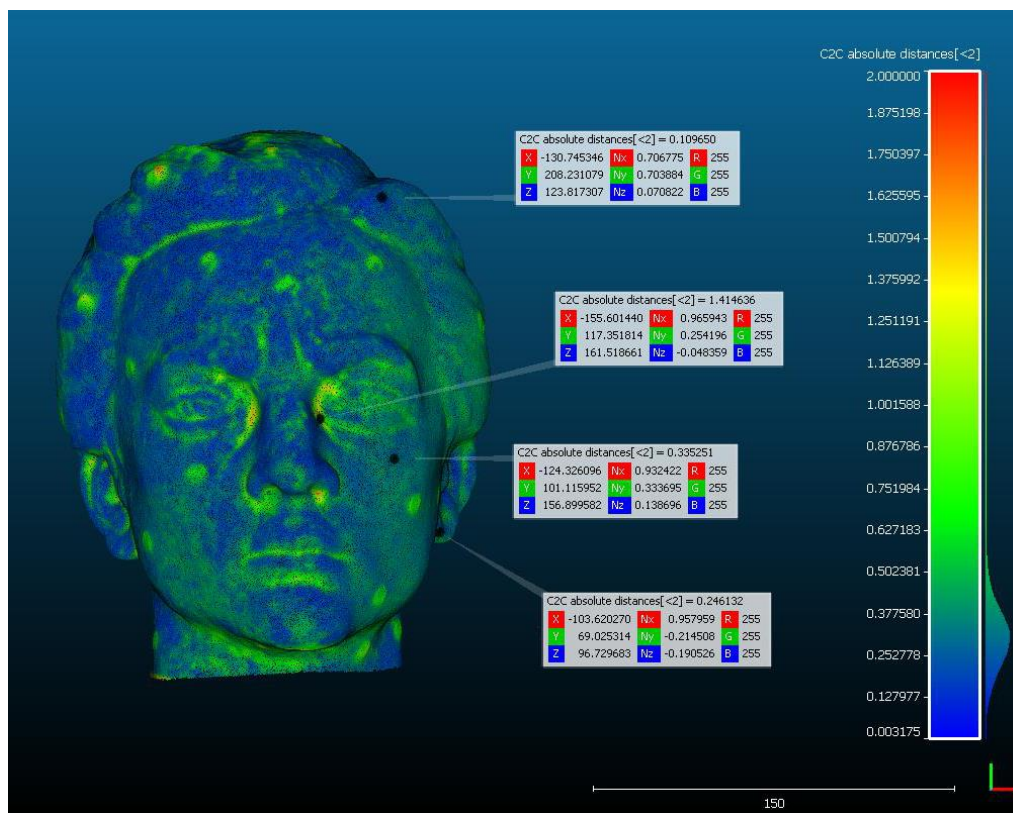


Slika 55. Rezultati poređenja modela dobijenih procesom 3D skeniranja sistemom *EinScan Pro 2X* u *CloudCompare* softveru uz korišćenje ICP algoritma za poravnanje modela

5.4.2.3. Poređenje originalnih modela (ORIG) dobijenih skeniranjem 3D skenerom EinScan Pro 2X i fotogrametrijom

U ovom slučaju vršena je uporedna analiza originalnih modela (ORIG) dobijenih različitim tehnikama digitalizacije, fotogrametrijom i 3D skeniranjem. Isti slučaj prikazan je na slici 52. Sa obe slike, 52 i 56, može se primetiti da postoje veća odstupanja između modela, nego u slučajevima prikazanim na slikama 50 i 54 i 51 i 55, što je i logično, jer su u ovom slučaju upoređivani modeli

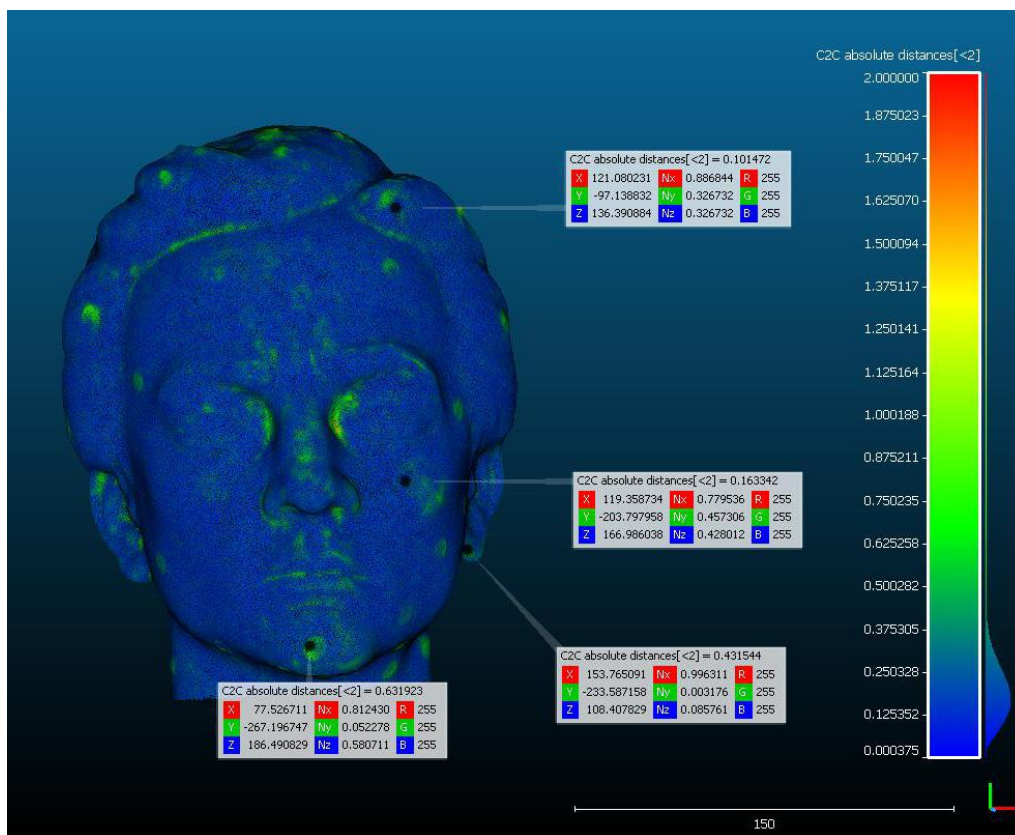
dobijeni različitim tehnikama, a u svim preostalim slučajevima (50 i 54 i 51 i 55) upoređeni su modeli dobijeni istom tehnikom 3D digitalizacije. Prema rezultatima prikazanim na slici 56 može se reći da su dobijeni rezultati povoljni, s obzirom na to da su najveće vrednosti odstupanja manje od 1mm (prikazane zelenom bojom sa vrednošću približno 0.5mm). Vrednosti prosečnog odstupanja (0.064mm) i standardne devijacije (0.335mm) pokazuju da su ipak merenja uz korišćenje ICP algoritma dala preciznije rezultate u odnosu na rezultate prikazane na slici 52.



Slika 56. Rezultati poređenja originalnih modela (ORIG) dobijenih 3D skenerom *EinScan Pro 2X* i fotogrametrijom u *CloudCompare* softveru uz korišćenje ICP algoritma za poravnanje modela

5.4.2.4. Poređenje modela sa ugrađenim zaštitnim elementom (VAJ_GRE) dobijenih 3D skenerom *EinScan Pro 2X* i fotogrametrijom

Kao i u slučaju prikazanom na slici 53, urađena je uporedna analiza modela sa digitalnom zaštitom (VAJ_GRE) dobijenih različitim tehnikama digitalizacije, ali uz korišćenje ICP algoritma. Na slici 57 prikazani su rezultati poređenja spomenutih modela. Odstupanja koja su izmerena imaju vrednosti 0.0003 - 0.375mm, vrednosti prikazane plavom bojom. Na osnovu vizuelne reprezentacije izmerenih odstupanja na samom modelu, ali i na histogramu možemo zaključiti da su i u ovom slučaju dobijeni povoljniji i precizniji rezultati u odnosu na one prikazane na slici 53, gde su karakteristične tačke zadate manuelno. Izmerene vrednosti prosečnog odstupanja (0.015mm) i standardne devijacije (0.180mm) to potvrđuju. Na slici 53 dominiraju nijanse zelene boje, koje reprezentuju odstupanja sa vrednostima 0.3 - 0.8mm.

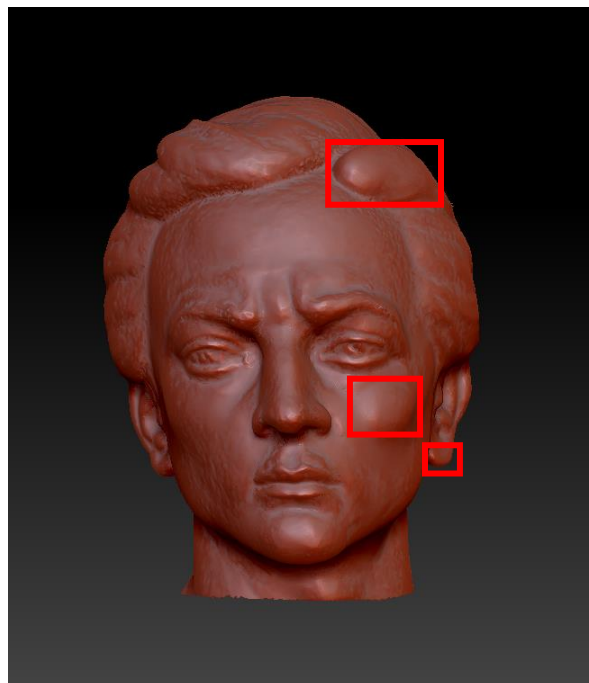


Slika 57. Rezultati poređenja modela sa ugrađenom zaštitom (VAJ_GRE) dobijenih 3D skenerom *EinScan Pro 2X* i fotogrametrijom u *CloudCompare* softveru uz korišćenje ICP algoritma za poravnanje modela

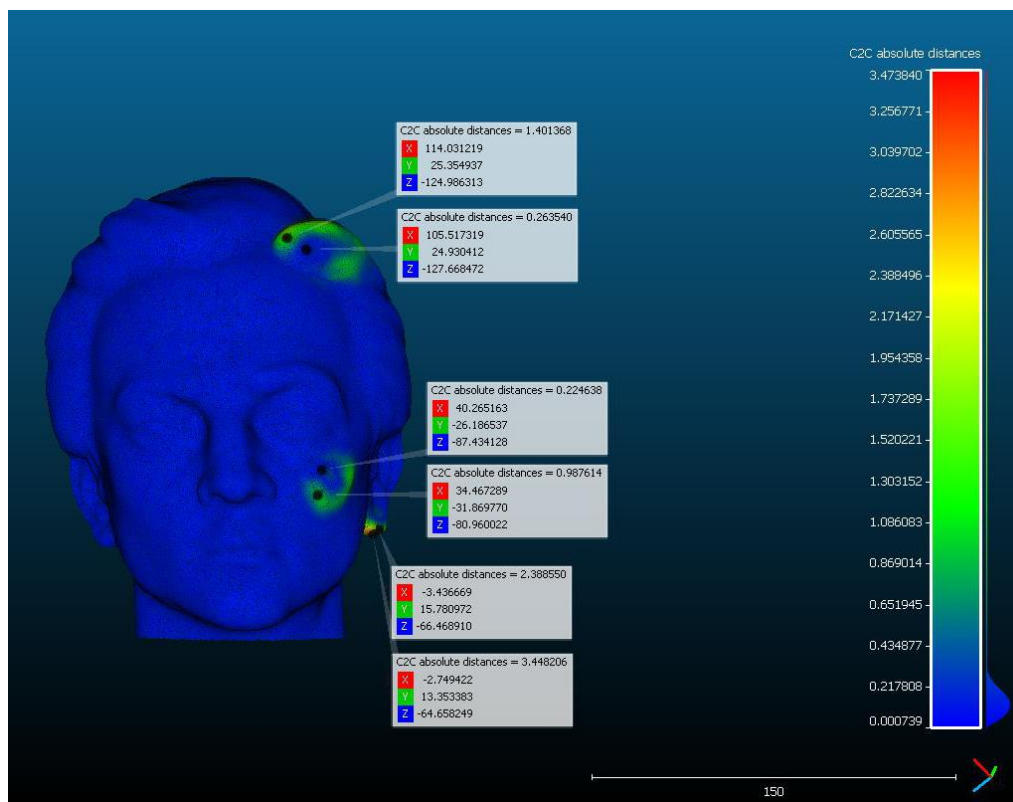
5.4.2.5. Poređenje modela dobijenih 3D skenerom *EinScan Pro 2X* sa ugrađenom zaštitom od strane vajara i sa ugrađenom zaštitom u *Zbrush* softveru

Radi preciznije analize u svrhu poređenja preciznosti i debljine sloja ugrađenog zaštitnog elementa, urađena je uporedna analiza modela sa ugrađenom zaštitom od strane vajara (VAJ_GRE) i ugrađenom zaštitom u *Zbrush* softveru (VAJ_ZBR). Model VAJ_ZBR je kreiran tako što je prema instrukcijama vajara ugrađena zaštita na 3D model originalne skulpture (ORIG) digitalno, u *Zbrush* softveru. To znači da su modifikacije 3D modela originalne skulpture urađene na istim delovima lica na koje je vajar dodao glinu na originalnu skulpturu, a to su pramen kose (na levoj strani), ušna resica (na levoj strani) i jagodica (na levoj strani). Model VAJ_ZBR prikazan je na slici 58. Za razliku od tradicionalnog vajanja gde je materijal (glina) dodavana na lice, kod dodavanja korišćenjem *Zbrush* softvera, odnosno odgovarajuće četkice, materijal se ne dodaje, nego se čvorovi na digitalnom modelu izvlače dalje konkavno prema spolja. Ovaj postupak nije intuitivan i kako se on radi pomoću miša vrlo je teško kontrolisati pomeranja čvorova u prostoru za neku zadatu meru translacije. Rezultat toga je da je VAJ_ZBR dobijen na ovaj način ipak takav da je količina dodatog materijala na tri zadata mesta bila veća od količine materijala koji je dodat nakon tradicionalnog vajanja. Ovo je provereno poređenjem 3D modela sa ugrađenim zaštitnim elementom od strane vajara i ugrađenim zaštitnim elementom na istim mestima u *Zbrush* softveru

(slika 58). Na pojedinim mestima ova razlika iznosi i do 3.47mm, što je značajna i vidljiva razlika (slika 59).



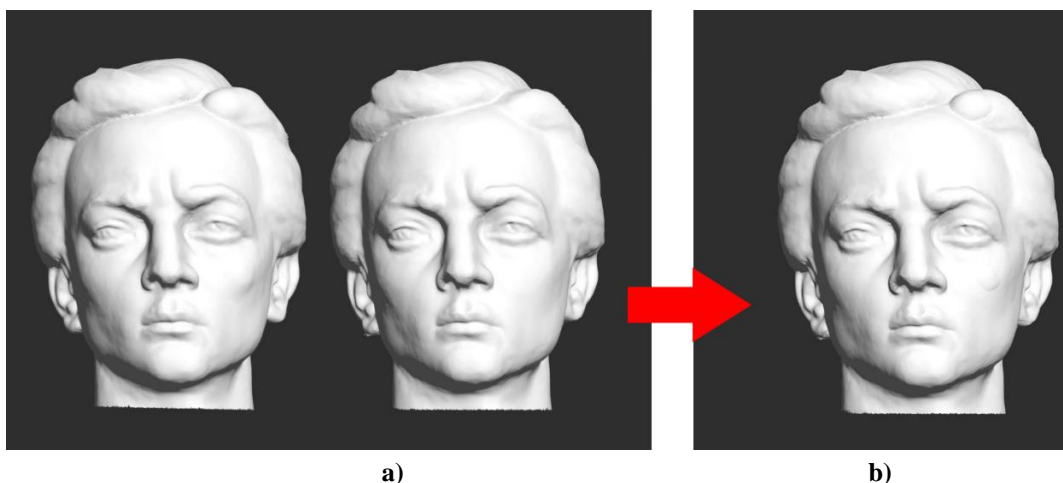
Slika 58. Model skulpture sa ugrađenom zaštitom (VAJ_ZBR) prema instrukcijama vajara u *Zbrush* softveru



Slika 59. Rezultati poređenja modela sa ugrađenom zaštitom od strane vajara (VAJ_GRE) i ugrađenom istom zaštitom (VAJ_ZBR) u *Zbrush* softveru

6. EKSTRAKCIJA UGRAĐENE DIGITALNE ZAŠTITE IZ 3D VIRTUELNOG MODELA

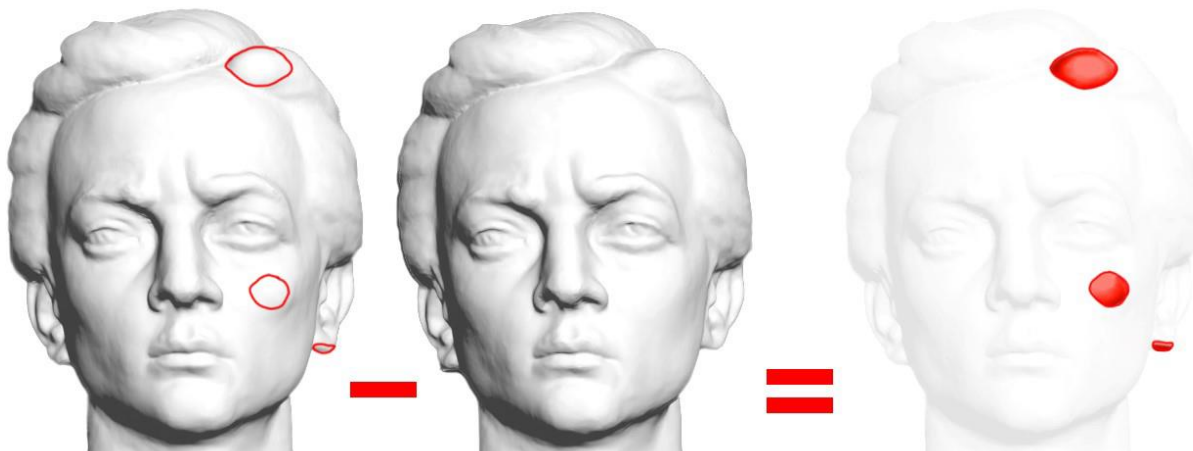
Na slikama 50-57 na kojim su prikazani rezultati poređenja originalnog modela i modela sa dodatim zaštitnim elementom može se videti da su detektovane razlike između spomenutih modela. Te razlike javljaju se na delovima skulpture na koje je dodata zaštita: pramen kose (na levoj strani), ušna resica (na levoj strani) i jagodica (na levoj strani). Dobijeni rezultati jasno ukazuju na to da je poređenjem originalnog modela i modela sa ugrađenom digitalnom zaštitom lako odrediti izgled i dimenzije digitalne zaštite koja je ugrađena na originalni model, takođe se lako može proveriti i dokazati originalnost 3D modela, odnosno, njegove kopije ukoliko dođe do zloupotrebe istog. Pomoću Bulove (eng. *Boolean*) operacije *Subtraction* lako se može izvući ugrađeni zaštitni element sa modela na koji je dodat i kao takav čuvati u arhivi. Operacija *Subtraction* podrazumeva oduzimanje geometrije 3D modela originalne skulpture (ORIG) od geometrije 3D modela skulpture sa digitalnom zaštitom (VAJ_GRE), gde se kao rezultat dobija dodati zaštitni element. Ova operacija dostupna je kao opcija u većini softvera za 3D modelovanje. Jedan od takvih softvera je i *3ds Max* [125], koji je u ovom radu korišćen za ekstrakciju digitalne zaštite iz 3D virtuelnog modela. Oba modela su uvezena u *3ds Max*, originalni model i model sa dodatim detaljima od strane vajara (slika 60a), a zatim su njihove pozicije i orijentacije poravnate. Na taj način oba modela su dovedena u istu poziciju, odnosno, njihove geometrije se preklapaju (slika 60b).



Slika 60. Originalni 3D model (ORIG) i 3D model digitalnom zaštitom (VAJ_GRE) importovani u *3ds Max*: **a)** Modeli čije pozicije nisu poravnate; **b)** Poravnate pozicije modela

Zatim je selektovan model sa dodatim detaljima od gline (VAJ_GRE) i na njega je dodata opcija *Boolean*, što znači da je automatski softver prepoznao da će se od geometrije selektovanog modela oduzeti (opcija *Boolean* → *Subtraction*) geometrija sledećeg odabranog/selektovanog modela, a to je u ovom slučaju originalni 3D model (ORIG). S obzirom na to da se geometrije ova dva modela razlikuju jedino na mestima gde je dodata glina kao što je i provereno u *MeshLab* i *CloudCompare*

softverima, kao rezultat *Boolean* operacije oduzimanja dobija se geometrija koja predstavlja delove gline koje je vajar dodao na originalnu skulpturu pre njene 3D digitalizacije, a to je zapravo ugrađena digitalna zaštita koja je prikazana na slici 61, označena crvenom bojom.



Slika 61. Ekstrakcija digitalne zaštite u softveru *3ds Max* kao razlike između 3D modela sa ugrađenom zaštitom (VAJ_GRE) i originalnog 3D modela (ORIG)

7. DISKUSIJA

7.1. Diskusija dobijenih rezultata

U okviru doktorske disertacije analizirana je mogućnost zaštite 3D digitalizovane skulpture pomoću novog pristupa. Glina je dodata na skulpturu na lokacijama koje je vajar odabrao. Zatim su originalna skulptura (ORIG) i skulptura sa dodatim detaljima od gline (VAJ_GRE) 3D digitalizovane na dva načina, korišćenjem fotogrametrije i 3D skenera na bazi strukturirane svetlosti *EinScan Pro 2X*.

Poređenjem rezultata dobijenih fotogrametrijskim snimanjem i 3D skeniranjem skulpture strukturiranom svetlošću, pri određivanju razlike, odnosno, odstupanja između originala i modela sa ugrađenom digitalnom zaštitom, može se zaključiti da je ovo odstupanje vizuelno podjednako uočljiva na 3D modelima dobijenim korišćenjem obe tehnike 3D digitalizacije. Ovo pokazuje da se fotogrametrija i 3D skeniranje strukturiranom svetlošću mogu koristiti u inovativnom pristupu koji je razvijen u ovoj disertaciji, iako je u slučaju objekata dimenzija kao što je ova skulptura i manjih, u prednosti 3D skeniranje strukturiranom svetlošću, jer se kao rezultat dobija model skulpture sa manje nepravilnosti na površini, kako su i drugi autori prethodno zaključili [126,127]. Kada se uporede 3D modeli originalne skulpture i sa dodatom zaštitom, bilo da su dobijeni fotogrametrijom ili 3D skeniranjem *EinScan Pro 2X* sistemom, dobijaju se realni rezultati, jer su kao razlike između 3D modela identifikovani delovi lica na kojima je dodata glina, a mere dodatog materijala u oba slučaja odgovaraju realnom stanju.

U okviru ovog istraživanja sprovedeno je anketiranje nad 195 ispitanika gde je analizirano pet skulptura, originalni 3D model (skulptura ORIG), model sa digitalnom zaštitom (skulptura VAJ_GRE), dva 3D modela (skulpture ZBR i ZBR2) dobijene nasumičnom deformacijom originalnog modela u *Zbrush* softvera i 3D model (označen sa VAJ_ZBR) dobijen ugradnjom zaštite uz instrukcije vajara u *Zbrush* softveru na istim delovima lica gde je dodata glina na model VAJ_GRE (slika 35). Međutim, za anketu su korišćeni 3D modeli dobijeni 3D skeniranjem *EinScan Pro 2X* sistemom jer je njihova površina glađa u odnosu na 3D modele dobijene fotogrametrijom. Za potrebe ankete kreiran je video u kojem se pet spomenutih skulptura rotiraju jednolikom brzinom i istovremeno, svaka oko svoje vertikalne ose, i na osnovu toga je sprovedeno istraživanje od osam pitanja. Od ukupnog broja ispitanika, 18,5% je reklo da postoje dve identične skulpture, a od tih 18,5%, 70% je reklo da su skulpture ORIG i VAJ_GRE iste. Štaviše, od ukupnog broja, 81,5% ispitanika reklo je da ne postoje dve identične skulpture, a od tog broja 67,7% je primetilo da su skulpture ORIG i VAJ_GRE najsličnije. U obe grupe (18,5% i 81,5%) je uočeno je da su skulpture ORIG i VAJ_GRE iste ili najsličnije. Ovaj rezultat nam pokazuje da je digitalna zaštita kreirana u saradnji sa vajarom nanosena sa merom i da ju je teško vizuelno primetiti. Mnogo je lakše uočiti modifikaciju koja se dobija pomeranjem temena u 3D softveru bez odgovarajuće strategije. Naime, iako se pomeranje temena u 3D softveru vrši i uz odgovarajuću strategiju i uz instrukcije vajara, ugrađena zaštita je vizuelno uočljivija. To su pokazali i rezultati ankete, gde su ispitanici primetili da se skulptura VAJ_ZBR više razlike od skulpture ORIG, dok je ocenjeno da

su skulpture ORIG i VAJ_GRE iste ili najsličnije. Takođe, u *CloudCompare* softveru je izmereno da je zaštita ugrađena u *Zbrush* softveru na originalni 3D model većih dimenzija u odnosu na onu ugrađenu od strane vajara, i to skoro duplo. Strategija u okviru ovog istraživanja je bila da vajar doda zaštitu koju bi bilo teško vizuelno primetiti.

Odgovori ispitanika ispunili su očekivanja istraživača jer su primetili da su najsličnije skulpture originalna skulptura (ORIG) i skulptura sa digitalnom greškom (VAJ_GRE), a to odgovara realnoj situaciji. Osnovna ideja ovog istraživanja je izrada 3D modela sa digitalnom zaštitom koja je dostupna javnosti, dok je originalni 3D model u potpunosti skriven od javnosti. Prosečni posmatrači neće biti lišeni svog umetničkog doživljaja skulpture jer nisu ni svesni da je minimalno izmenjena u odnosu na original, a vlasnici skulpture su na taj način zaštićeni od potencijalne zloupotrebe njihovog rada.

S druge strane namera istraživača bila je da se širokoj javnosti pruži na uvid 3D model skulpture koji je jako sličan originalu, ali koji nije original. Na taj način posmatrači ovog modela neće biti nimalo uskraćeni za umetnički doživljaj posmatranog umetničkog dela. Druga dobra strana pristupa i istraživanja doktorske disertacije jeste da ne postoji mogućnost od zloupotrebe originalnog umetničkog dela. Ukoliko neko uzme 3D model skulpture koja je data na uvid, i odštampa taj model na 3D štampaču, lako se može dokazati da je takva skulptura falsifikat. To se može postići 3D skeniranjem odštampane skulpture i poređenjem takvog 3D modela sa originalnim modelom. Rezultat bi bio razlika između ovih modela (3D modela odštampane skulpture i 3D modela originalne skulpture), a koja predstavlja ugrađenu digitalnu zaštitu koja je dodata u saradnji sa vajarom. Još jedan stepen zaštite je taj što originalni 3D model skulpture ne bi bio postavljen na server na kome se nalazi i skulptura sa digitalnom zaštitom, niti bi na bilo koji način originalni 3D model bio dat na uvid javnosti.

7.2. Mogućnost primene rezultata

Činjenica je da danas postoji više različitih tehnika za zaštitu 3D modela od kojih je dominantna tehnika kreiranja *watermark*-a. U okviru ovog istraživanja korišćen je pristup koji nije takav, već je poseban i drugačiji u smislu da se svaki objekat kulturnog nasleđa posmatra kao jedinstven objekat. Na primer, ako bismo želeli da zaštitimo kulturno dobro koje se odnosi na skulpturu, onda bismo koristili pomoć skulptora, a ako bismo želeli da zaštitimo kulturno dobro koje se odnosi na arhitektonsko nasleđe koristili bismo pomoć arhitekta. U tom smislu, u ovom slučaju na skulpturu su dodati segmenti od strane skulptora, tako da prosečnom posmatraču ne budu prepoznatljiviji i vidljiviji, a da mi kao kreatori 3D modela skulpture na koju su dodati segmenti od gline prepoznamo razliku između originalne skulpture i skulpture sa dodatim materijalom. Dakle, karakteristike su dodate tako da ih prosečan posmatrač ne primeti. Kreirana su dva 3D modela skulpture, jedan je 3D model originalne skulpture (ORIG), a drugi je 3D model skulpture sa ugrađenom zaštitom (VAJ_GRE). I originalna skulptura i skulptura sa dodatim segmentima od gline su 3D digitalizovane korišćenjem dve tehnike, fotogrametrijom i 3D skeniranjem na bazi strukturirane svetlosti. Poenta ovog pristupa je da originalna 3D skulptura, odnosno njena

digitalizovana verzija ne bi bila postavljena ni na server koji je moguće napasti, niti bi na bilo koji drugi način bila data na uvid javnosti. Jedina skulptura koja bi bila data na uvid javnosti jeste 3D model skulpture sa ugrađenom zaštitom gde prosečni posmatrač ne bi mogao da primeti razliku, možemo reći “nedostatak” u odnosu na 3D model originalne skulpture i ne bi mu smetalo jer ne bi bio uskraćen u svojoj spoznaji skulpture ni u kakvom smislu. U ovom istraživanju predloženo je dodavanje digitalnog zaštitnog elementa na portret karaktera ili osobe muškog pola stare između 25-30 godina. Osnovna ideja ovog rada je da na uvid javnosti bude postavljen 3D model sa digitalnom zaštitom, a da originalni 3D model bude sačuvan i sakriven od javnosti. Prosečan posmatrač neće biti uskraćen u svom umetničkom doživljaju skulpture, jer nije ni svestan da je ona minimalno izmenjena u odnosu na original, a vlasnici skulpture su na ovaj način zaštićeni od zloupotrebe svog dela.

Predloženi pristup je primenljiv i na druge vrste objekata kulturnog nasleđa, kao što su arhitektonsko nasleđe i grnčarija i predstavlja vrstu šifrovanja gde je moguće sve skulpture, odnosno, kulturno nasleđe uopšte, pojedinačno digitalizovati na ovaj način i digitalizovani 3D model sa ugrađenom zaštitom izložiti javnosti bez ikakvog straha od mogućnosti krađe, a pri tome se očuvava originalni vizuelni prikaz i umetnička impresija skulpture.

8. ZAKLJUČAK I PRAVCI DALJIH ISTRAŽIVANJA

8.1. Zaključak

Činjenice su da danas postoji više različitih tehnika za zaštitu 3D modela od kojih je dominantna tehnika kreiranja i ugradnje *watermark*-a u 3D model. U okviru doktorske disertacije kreiran je pristup koji nije takav, već je poseban/drugačiji u smislu da se svaki objekat kulturnog nasleđa posmatra kao jedinstven objekat. Kreirana su dva 3D modela skulpture: jedan je 3D model originalne skulpture, a drugi je 3D model skulpture sa ugrađenom zaštitom. Digitalizovana je i originalna skulptura i skulptura sa dodatim 3D segmentima, i to i fotogrametrijom i 3D skenerom čiji rad je zasnovan na strukturiranoj svetlosti.

Glavna ideja pristupa iz doktorske disertacije je da se omogući vidljivost i umetnički doživljaj skulptura i drugih umetničkih artefakata preko *online* pristupa njihovim 3D modelima sa ugrađenom zaštitom. Kako ova dela imaju veliku i umetničku i materijalnu vrednost ovaj pristup na nov način omogućava zaštitu originalnog 3D modela od krađe ili zloupotrebe. Naime, na originalni model skulpture uz pomoć skulptora dodat je na nekoliko (konkretno tri) mesta materijal i onda je takva skulptura „sa vajarskom greškom“ ponovo digitalizovana. Ovako dodate modifikacije su diskretne i neće umanjiti umetnički doživljaj skulpture, odnosno, prosečni posmatrač će biti uveren da posmatra 3D model originalne skulpture. Hipotezu da su 3D model originalne skulpture i 3D model skulpture s ugrađenom zaštitom vizuelno najsljedniji, je potvrdila anketa sa 195 ispitanika. Na uvid javnosti biće izložen samo 3D model skulpture s digitalnom zaštitom, a originalni 3D model će se arhivirati. Mada ovaj pristup zahteva pojedinačno posmatranje svakog umetničkog dela, on pruža i neke prednosti. Digitalizacijom i zaštitom modela, na ovaj način, mogu da se bave i zaposleni u ustanovama kulture i ovaj pristup, gde su i umetnici uključeni, je prihvatljiv za stručnjake iz oblasti umetnosti i kulture, koji nemaju adekvatna znanja iz programiranja i kreiranja algoritama, a takva znanja su potrebna pri kreiranju *watermark*-a. Ovakav pristup može da omogući masovnu digitalizaciju umetničkih dela, njihovu vidljivost preko 3D modela sa digitalnom zaštitom, a opet i zaštitu od krađe i zloupotrebe.

Za razliku od većine radova u kojima se u 3D model dodaje *watermark* korišćenjem različitih matematičkih metoda i algoritama, ovakav individualni pristup svakom umetničkom 3D delu može se smatrati dobrim rešenjem koje omogućava prezentaciju kulturnog nasleđa ali i čuva ga od zloupotrebe. Nedostatak pristupa je što svaki rad, odnosno 3D model, zahteva individualni pristup i saradnju umetnika i tehničkog osoblja. Drugi nedostatak može biti taj što je glinu koja je naneta neophodno ukloniti nakon snimanja. Neki materijali od kojih se prave skulpture, poput mermera, čelika ili bronz, mogu se lako očistiti od gline bez oštećenja. S druge strane, skulpture napravljene od gipsa podložne su nenamernim oštećenjima tokom uklanjanja gline.

8.2. Pravci budućeg istraživanja

Uočena su tri nedostatka pristupa kreiranog u okviru doktorske disertacije. Prvi je da je potrebno koristiti pomoć vajara u radu sa svakom pojedinačnom skulpturom. Još jedan nedostatak je da se prilikom nanošenja gline na skulpturu ostvaruje kontakt sa skulpturom, a nakon 3D digitalizacije izmenjene skulpture potrebno je ukloniti dodatne detalje. Tokom procesa uklanjanja materijala, skulptura se može oštetiti. Prema iskustvu vajara iz našeg tima, postoje gline koje se lako nanose ali i lako se uklanjaju, pa je moguće naneti takvu glinu i ukloniti je bez oštećenja objekta. Treći nedostatak je što predstavljeni pristup zahteva skeniranje svakog objekta dva puta, udvostručujući tako potrebno vreme i resurse. Ovaj problem se može rešiti pomoću heptičke ruke kojom će se dodati digitalna greška u softveru na 3D virtuelni model originalne skulpture.

Moguće teme za budući rad su:

Upotreba heptičke ruke za digitalno vajanje. Ovim uređajem vajar bi vajao na 3D modelu koji je digitalni i izbegao bi kontakt sa originalnim umetničkim delom. Na ovaj način, digitalna zaštita može se dodati bez kontakta sa originalnim fizičkim modelom. Ovo bi smanjilo vreme izvršenja, odnosno bilo bi potrebno digitalizovati samo originalno delo (umetničko delo), a ne delo sa ugrađenom fizičkom zaštitom.

Određivanje referentnih pozicija za dodavanje zaštitnog elementa na karaktere različitih godina/uzrasta i pola.

Ovo istraživanje je ograničeno na skulpturu sa željom da se analizira i potvrdi da predstavljena ideja i pristup vode do dobrih i smislenih rezultata. Svakako je moguće da se postupak primeni i na druge vrste artefakata, kao što su kovanice, grnčarija ili arhitektonsko nasleđe.

9. Pregled slika

Slika 1. Digitalizovana skulptura (originalna skulptura).....	4
Slika 3. Digitalizacija kulturnog nasleđa - primer [26]	9
Slika 4. Primer upotrebe 3D modela dobijenih fotogrametrijom za potrebe virtuelne izložbe Muzeja Vojvodine: a) početna strana; b) 3D model dobijen fotogrametrijom	10
Slika 5. Primena fotogrametrije za arhitektonsko merenje – mere dobijene fotogrametrijom poklapaju se sa realnim [28]	11
Slika 6. Ortofoto 3D modela ikonostasa sa istaknutim karakterističnim oblicima ikona koji se koriste u analizi oblika	11
Slika 7. Simulacija snimanja terena iz vazduha [31].....	12
Slika 8. 3D model dobijen korišćenjem fotogrametrije u kombinaciji sa proceduralnim modelovanjem [31]	12
Slika 9. 3D model ikonostasa dobijen fotogrametrijom korišćen za potrebe virtuelne prezentacije u proširenoj realnosti.....	13
Slika 10. 3D model ikonostasa dobijen fotogrametrijom korišćen za potrebe virtuelne prezentacije u virtuelnoj realnosti	13
Slika 11. Primena fotogrametrijskih 3D modela u oblasti veterinarske ortopedije [35]	14
Slika 12. Primer primene 3D modela dobijenih fotogrametrijom u psihologiji [36]	14
Slika 13. Primer avatara u video igri dobijenog fotogrametrijom [37]	15
Slika 14. Digitalni dvojnik glumca: a) 3D model dobijen fotogrametrijom; b) pokret digitalnog karaktera kreiran uz korišćenje MOCAP sistema [38]	15
Slika 15. Primer akvizicije i aplikacije podataka u MOCAP sistemu [40]	16
Slika 16. Odštampan ornament čiji je 3D model dobijen tehnikom 3D skeniranja strukturiranom svetlošću [60]	17
Slika 17. Primena 3D modela dobijenog 3D skeniranjem u ortopediji [64]	17
Slika 18. Protetičko uho: a) virtuelni 3D model; b) odštampan 3D model [65]	18
Slika 19. Eksperimentalna postavka za određivanje volumena regije stopala i skočnog zgloba: a) pozicioniranje pacijenta za potrebe skeniranja; b) pravilno pozicioniranje trake duž stopala i skočnog zgloba pomoću.....	18
metoda osmice [68].....	18
Slika 20. 3D model mesta zločina dobijen tehnikom 3D skeniranja [69]	19
Slika 21. Primena 3D modela dobijenih skeniranjem za kontrolu kvaliteta proizvoda na primeru karburatora [71]	19
Slika 22. Oblak tačaka dobijen 3D skeniranjem – pozicije igrača golfa u toku zamaha [74].....	20
Slika 23. Beleženje poza ljudskog tela tehnikom 3D skeniranja, zabeležena je poza i u odelu, ali i golog tela [76]	20
Slika 24. Nadgrobni spomenik od belog mermera– primer nepokretnog kulturnog nasleđa	28
Slika 25. Amfora – primer pokretnog kulturnog nasleđa	28
Slika 26. Digitalizovana ikona – primer 2D kulturnog nasleđa: a) cela ikona; b) detalj u visokoj rezoluciji (potpis Đure Jakšića – crkva Svetog Prokopija u Srpskoj Crnji)	29
Slika 27. Digitalizovan ikonostas – primer 3D kulturnog nasleđa (crkva Svetog Nikole u Sremskim Karlovcima)	30
Slika 28. Skulptura i obrtni sto sa nalepljenim markerima: a) originalna skulptura; b) skulptura sa nanetom glinom; c) obrtni sto.....	34
Slika 29. Skica plana snimanja skulpture	36

Slika 30. Postavka elemenata u laboratoriji za potrebe fotogrametrijskog snimanja.....	37
Slika 31. 3D modeli kreirani pomoću fotogrametrije: a) originalni model; b) model sa dodatim detaljima od gline (uokvireni crvenim pravougaonicima).....	37
Slika 32. <i>EinScan 2X Pro</i> skener.....	38
Slika 33. Proces kalibracije za <i>EinScan 2X Pro</i> skener: a), b), c), d) različite pozicije kalibracione table	39
Slika 34. Prikupljanje i obrada podataka u realnom vremenu pomoću <i>EinScan 2X Pro</i> skenera	39
Slika 34. Prikupljeni oblak tačaka 3D skeniranjem: a) u toku prikupljanja; b) finalni oblak tačaka skulpture	40
Slika 36. 3D modeli kreirani pomoću 3D skeniranja: a) originalni model; b) model sa dodatim detaljima od gline (uokvireni crvenim pravougaonicima).....	40
Slika 37. Biblioteka četkica u <i>Zbrush</i> softveru	41
Slika 38. Parametri koji definišu izgled i uticajnost četkice u <i>Zbrush</i> softveru	42
Slika 38. 3D model skulpture importovan u <i>Zbrush</i> softver: a) 3D originalni model (ORIG); b) skulptura ZBR1 iz ankete; c) skulptura ZBR2 iz ankete	42
Slika 40. Skulpture ZBR1 i ZBR2 u tri karakteristična pogleda (frontalni, profilni i poluprofilni) sa geometrijskim modifikacijama dodatim u <i>Zbrush</i> softveru	43
Slika 41. Kompozicija različitih skulptura koja je korišćenja za anketiranje.....	44
Slika 42. Blok dijagram putanje kroz anketna pitanja.....	46
Slika 43. Grafik odgovora na pitanje broj 2	47
Slika 44. Grafik odgovora na pitanje broj 3	48
Slika 45. Grafik odgovora na pitanje broj 4	48
Slika 46. Skenirani modeli koji nisu poravnati uvezeni u <i>MeshLab</i> softver	49
Slika 47. Postavljanje ključnih tačaka na modelima za postupak poravnanja modela.....	50
Slika 48. Modeli čije pozicije su poravnate.....	51
Slika 49. Rezultati poređenja modela dobijenih procesom 3D skeniranja u <i>MeshLab</i> softveru..	52
Slika 50. Rezultati poređenja modela dobijenih fotogrametrijom u <i>CloudCompare</i> softveru.....	54
Slika 51. Rezultati poređenja modela dobijenih 3D skeniranjem sistemom <i>EinScan Pro 2X</i> u <i>CloudCompare</i> softveru.....	55
Slika 52. Rezultati poređenja originalnih modela (ORIG) dobijenih skenerom <i>EinScan Pro 2X</i> i fotogrametrijom u <i>CloudCompare</i> softveru.....	56
Slika 53. Rezultati poređenja modela sa ugrađenim zaštitnim elementom (VAJ_GRE) dobijenih primenom 3D skenera <i>EinScan Pro 2X</i> i fotogrametrijom u <i>CloudCompare</i> softveru	57
Slika 54. Rezultati poređenja modela dobijenih fotogrametrijom u <i>CloudCompare</i> softveru uz korišćenje ICP algoritma za poravnanje modela	58
Slika 55. Rezultati poređenja modela dobijenih procesom 3D skeniranja sistemom <i>EinScan Pro 2X</i> u <i>CloudCompare</i> softveru uz korišćenje ICP algoritma za poravnanje modela	59
Slika 56. Rezultati poređenja originalnih modela (ORIG) dobijenih 3D skenerom <i>EinScan Pro 2X</i> i fotogrametrijom u <i>CloudCompare</i> softveru uz korišćenje ICP algoritma za poravnanje modela.....	60
Slika 57. Rezultati poređenja modela sa ugrađenom zaštitom (VAJ_GRE) dobijenih 3D skenerom <i>EinScan Pro 2X</i> i fotogrametrijom u <i>CloudCompare</i> softveru uz korišćenje ICP algoritma za poravnanje modela	61
Slika 58. Model skulpture sa ugrađenom zaštitom (VAJ_ZBR) prema instrukcijama vajara u <i>Zbrush</i> softveru	62

Slika 59. Rezultati poređenja modela sa ugrađenom zaštitom od strane vajara (VAJ_GRE) i ugrađenom istom zaštitom (VAJ_ZBR) u <i>Zbrush</i> softveru.....	62
Slika 60. Originalni 3D model (ORIG) i 3D model digitalnom zaštitom (VAJ_GRE) importovani u <i>3ds Max</i> : a) Modeli čije pozicije nisu poravnate; b) Poravnate pozicije modela.....	63
Slika 61. Ekstrakcija digitalne zaštite u softveru <i>3ds Max</i> kao razlike između 3D modela sa ugrađenom zaštitom (VAJ_GRE) i originalnog 3D modela (ORIG)	64

10. Pregled tabela

Tabela 1. Parametri primenjeni kod fotogrametrijskog snimanja.....	36
Tabela 2. Analiza odgovora ispitanika na pitanja iz ankete.....	47

11. Pregled korišćenih akronima

Akronim	Naziv na engleskom	Naziv na srpskom
1D	<i>One Dimension</i>	Jednodimenzionalni
2D	<i>Two Dimension</i>	Dvodimenzionalni
3D	<i>Three Dimension</i>	Trodimenzionalni
SfM	<i>Structure from Motion</i>	Struktura iz kretanja
MOCAP	<i>Motion Capture</i>	Akvizicija pokreta
CSI	<i>Crime Scene Investigation</i>	Istraživanje mesta zločina
KLT	<i>Karhunen – Loève transformation</i>	Karhunen – Loèvova transformacija
EU	<i>Embedding Unit</i>	Ugradna jedinica
DRM	<i>Digital Rights Management</i>	Alati za upravljanje digitalnim pravima
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i>	Identifikacija putem radio frekvencije
QIM	<i>Quantization Index Modulation</i>	Kvantizacija indeksa modulacije
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>	Modelovanje taloženjem
GSD	<i>Ground Sample Distance</i>	Veličina pokrivenosti površi jednim pikselom
FoV	<i>Field of View</i>	Žižna daljina
DoF	<i>Depth of Field</i>	Dubinska oštrina
fps	<i>frames per second</i>	Brzina smenjivanja slika u sekundi
HD	<i>High Definition</i>	Visoka rezolucija
RGB	<i>RedGreenBlue</i>	Crvena, zelena, plava
ICP	<i>Iterative Closest Point</i>	Iterativna najbliža tačka

12. LITERATURA

1. Djuric, I.; Stojakovic, V.; Misic, S.; Kekeljevic, I.; Vasiljevic, I.; Obradovic, M.; Obradovic, R. Church Heritage Multimedia Presentation-Case study of the iconostasis as the characteristic art and architectural element of the Christian Orthodox churches. *Architecture in the Age of the 4th Industrial Revolution - Proceedings of the 37th eCAADe and 23rd SIGraDi Conference*, University of Porto, Porto, Portugal, 2019; September, Volume 1, pp. 551-560. doi: [10.5151/proceedings-ecaadesigradi2019_421](https://doi.org/10.5151/proceedings-ecaadesigradi2019_421)
2. Koller D. Protected sharing of 3D models of cultural heritage and archaeological artifacts. In *Proceedings of the 36th CAA Conference*. Archaeolingua, Budapest, 2008; April, Volume 2, pp. 326-331
3. Obradović R.; Stojaković V.; Đurić I.; Vasiljević I.; Kekeljević I.; Obradović M. 3D digitalization and AR presentation of the iconostasis of the Church of St. Procopius the Great Martyr in Srpska Crnja. In: *The exhibition catalogue Đura Jakšić. Between Myth and Reality*. Gallery of Matica Srpska, Novi Sad. 2019; April, ISBN: 978-8-80706-27-6. Dostupno na adresi: <http://racunarska-grafika.com/mitrovica/> (posećeno: April 2021.)
4. Obradović R.; Stojaković V.; Đurić I.; Vasiljević I.; Kekeljević I.; Obradović M. 3D digitalization and AR presentation of the iconostasis of the Church of St. Procopius the Great Martyr in Srpska Crnja. In: *The exhibition catalogue Đura Jakšić. Between Myth and Reality*. National museum, Belgrade. 2019; June, ISBN: 978-8-80706-27-6. Dostupno na adresi: <http://racunarska-grafika.com/srpska-crnja/> (posećeno: April 2021.)
5. Obradović R.; Stojaković V.; Đurić I.; Vasiljević I.; Kekeljević I.; Obradović M. In: *The exhibition catalogue Kračun*. Gallery of Matica Srpska, Novi Sad. 2019; October, Dostupno na adresi: <http://racunarska-grafika.com/karlovc/> (posećeno: April 2021.)
6. Stojaković, V.; Obradović, R.; Đurić, I.; Vasiljević, I.; Obradović, M.; Kićanović, J. Strategy Development for Standardization of Creation of Photogrammetric 3D Digital Objects of Cultural Heritage - Phase I. In *Project Report, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad (eds) 2020, Projects for Digitization of Cultural Heritage of the Republic of Serbia*, Ministry of Culture and Information of the Republic of Serbia. 2020; Dostupno na adresi: <http://www.muzejvojvodine.org.rs/images/Rimsko%20nasledje%20u%203D/index.html> (posećeno: April 2021.)
7. Aiello, D.; Fai, S.; Santagati, C. VIRTUAL MUSEUMS AS A MEANS FOR PROMOTION AND ENHANCEMENT OF CULTURAL HERITAGE. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*. 2019; Volume XLII-2/W15, pp. 33-40. doi: [10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-33-2019](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-33-2019)
8. Kazanis, S.; Kontogianni, G.; Chliverou, R.; Georgopoulos, A. DEVELOPING A VIRTUAL MUSEUM FOR THE ANCIENT WINE TRADE IN EASTERN MEDITERRANEAN. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 42. 2017; Volume XLII-2/W5, pp. 399-405. doi: [10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-399-2017](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-399-2017)

9. Clini, P.; Ruggeri, L.; Angeloni, R.; Sasso, M. INTERACTIVE IMMERSIVE VIRTUAL MUSEUM: DIGITAL DOCUMENTATION FOR VIRTUAL INTERACTION. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*. 4-7 June, 2018; Volume 42(2). pp. 251-257. doi: [10.5194/isprs-archives-XLII-2-251-2018](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-251-2018)
10. Besoain, F.; Jago, L.; Gallardo, I. Developing a Virtual Museum: Experience from the Design and Creation Process. *Information*. 2021; Volume 12(6), 244. doi: [10.3390/info12060244](https://doi.org/10.3390/info12060244)
11. Bovcon, N. Virtual museums: interpreting and recreating digital cultural content. *Neohelicon* 48. 2021; Springer. pp. 23-38. doi: [10.1007/s11059-021-00582-1](https://doi.org/10.1007/s11059-021-00582-1)
12. Obradović, M.; Vasiljević, I.; Đurić, I.; Kićanović, J.; Stojaković, V.; Obradović, R. Virtual Reality Models Based on Photogrammetric Surveys—A Case Study of the Iconostasis of the Serbian Orthodox Cathedral Church of Saint Nicholas in Sremski Karlovci (Serbia). *Applied Sciences*. 2020; April, Volume 10(8), 2743. doi:[10.3390/app10082743](https://doi.org/10.3390/app10082743)
13. Choromański, K.; Łobodecki, J.; Puchała, K.; Ostrowski, W. Development of Virtual Reality application for Cultural Heritage visualization from multi-source 3D data. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*. 2019; Volume XLII-2/W9, pp. 261-267. doi: [10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-261-2019](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-261-2019)
14. Kersten, T. P.; Tschirschwitz, F.; Deggim, S.; Lindstaedt, M. Virtual reality for cultural heritage monuments—from 3d data recording to immersive visualisation. In *Euro-Mediterranean Conference*. Springer, Cham. October, 2018; pp. 74-83.
15. Zbrush. Dostupno na adresi: <https://pixologic.com/> . (posećeno: April 2021.)
16. Nocerino, E.; Lago, F.; Morabito, D.; Remondino, F.; Porzi, L.; Poiesi, F.; Eisert, P. A smartphone-based 3D pipeline for the creative industry—the replicate EU project. *3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures*. 2017; Volume 42, pp. 535-541. doi: [10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-535-2017](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-535-2017)
17. Remondino, F.; Del Pizzo, S.; Kersten, T. P.; Troisi, S. Low-cost and open-source solutions for automated image orientation—A critical overview. In *Euro-Mediterranean Conference*. Springer, Berlin, Heidelberg. October, 2012; pp. 40-54.
18. Schöning, J.; Heidemann, G. Evaluation of multi-view 3D reconstruction software. In *International conference on computer analysis of images and patterns*. Springer, Cham. 2015; pp. 450-461.
19. Stathopoulou, E. K.; Welponer, M.; Remondino, F. Open-Source Image-Based 3d Reconstruction Pipelines: Review, Comparison and Evaluation. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42. 6th International Workshop LowCost 3D – Sensors, Algorithms, Applications. 2–3 December 2019; Strasbourg, France, Volume XLII-2/W17, pp. 331-338. doi:[10.5194/isprs-archives-XLII-2-W17-331-2019](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W17-331-2019)
20. Rahaman, H.; Champion, E. To 3D or Not 3D: Choosing a Photogrammetry Workflow for Cultural Heritage Groups. *Heritage* 2(3). 2019; 1835-1851. doi:[10.3390/heritage2030112](https://doi.org/10.3390/heritage2030112)
21. González-Aguilera, D.; López-Fernández, L.; Rodríguez-Gonzalez, P.; Guerrero, D.; Hernandez-Lopez, D.; Remondino, F.; Menna, F.; Nocerino, E.; Toschi, I.; Ballabeni, A.; Gaiani, M. DEVELOPMENT OF AN ALL-PURPOSE FREE PHOTOGAMMETRIC TOOL. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information*

- Sciences, 41. 2016; July; Volume XLI-B6, pp. 31-38. doi: [10.5194/isprsarchives-XLI-B6-31-2016](https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B6-31-2016)
22. Remondino, F.; El-Hakim, S. Image-based 3D modelling: a review. *The Photogrammetric Record*. 2006; Volume 21(115), pp. 269-291. doi: [10.1111/j.1477-9730.2006.00383.x](https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2006.00383.x)
 23. Abed, F. M.; Mohammed, M. U.;Kadhim, S. J. Architectural and Cultural Heritage conservation using low-cost cameras. *Applied Research Journal*. December 2017; Volume 3. pp. 376-384. ISSN: 2423-4796
 24. Santoši, Ž.; Šokac, M.; Korolija-Crkvenjakov, D.; Kosec, B.; Soković, M.; Budak, I. Reconstruction of 3D models of cast sculptures using close-range photogrammetry. *Metalurgija*. 2015; Volume 54(4). pp. 695-698.
 25. WeiSS AG. Dostupno na adresi: <https://weiss-ag.com/top-10-industries-that-are-embracing-3d-photogrammetry-technology-in-2020-2021/> . (posećeno: Avgust 2021.)
 26. Yastikli, N. Documentation of cultural heritage using digital photogrammetry and laser scanning. *Journal of Cultural heritage*. 2007; Volume 8(4), pp. 423-427. doi: [10.1016/j.culher.2007.06.003](https://doi.org/10.1016/j.culher.2007.06.003)
 27. Qing, Z. Photogrammetry education for multidisciplinary geomatics in China. *Geo-spatial Information Science*. 2006; Volume 9(4), pp. 273-280.
 28. Shults, R. Development and implementation of innovative educational modules on architectural photogrammetry for bachelor's degree curricula in architecture. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2019; Volume 42, pp. 115-120. doi: [10.5194/isprs-archives-XLII-5-W3-115-2019](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-5-W3-115-2019)
 29. Đurić, I.; Obradović, R.; Vasiljević, I.; Ralević, N.; Stojaković, V. Two-Dimensional Shape Analysis of Complex Geometry Based on Photogrammetric Models of Iconostases. *Applied Sciences*. 2021; Volume 11(15), 7042. doi: [10.3390/app11157042](https://doi.org/10.3390/app11157042)
 30. Liu, D.; Hu, Q.; Li, Y. The application of simulation platform and innovation of aerial photogrammetry. In *MIPPR 2015: Remote Sensing Image Processing, Geographic Information Systems, and Other Applications*. International Society for Optics and Photonics. 2015; December. Volume 9815, pp. 98150V-98150V-5. doi: [10.1117/12.2205230](https://doi.org/10.1117/12.2205230)
 31. Müller Arisona, S.; Zhong, C.; Huang, X.; Qin, R. Increasing detail of 3D models through combined photogrammetric and procedural modelling. *Geo-spatial Information Science*2013; Volume 16(1), pp. 45-53. doi: [10.1080/10095020.2013.774102](https://doi.org/10.1080/10095020.2013.774102)
 32. Freiknecht, J.; Effelsberg, W. A survey on the procedural generation of virtual worlds. *Multimodal Technologies and Interaction*. 2017; Volume 1(4), 27. doi: [10.3390/mti1040027](https://doi.org/10.3390/mti1040027)
 33. Palestini, C.; Basso, A. The photogrammetric survey methodologies applied to low-cost 3D virtual exploration in multidisciplinary field. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*. 2017; Volume 42. Pp. 195-202. doi: [10.5194/isprs-archives-XLII-2-W8-195-2017](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W8-195-2017)
 34. Grayburn, J.; Lischer-Katz, Z.; Golubiewski-Davis, K.; Ikeshoji-Orlati, V. 3D/VR in the Academic Library: Emerging Practices and Trends. Council on Library and Information Resources. 1755 Massachusetts Avenue NW Suite 500, Washington, DC 20036. 2019.
 35. Lima, L. F. S. D.; Barros, A. J. B. P. D.; Martini, A. D. C.; Stocco, M. B.; Kuczmariski, A. H.; Souza, R. L. D. Photogrammetry and 3D prototyping: A low-cost resource for training in

- veterinary orthopedics. 2019; *Ciência Rural*, Volume 49. pp. 1-4. doi: [10.1590/0103-8478cr20180929](https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20180929)
36. Nebel, S.; Beege, M.; Schneider, S.; Rey, G. D. A Review of Photogrammetry and Photorealistic 3D Models in Education From a Psychological Perspective. In *Frontiers in Education*. Frontiers, 2020; August, Volume 5, pp. 144-158. doi: [10.3389/feduc.2020.00144](https://doi.org/10.3389/feduc.2020.00144)
 37. Berdic, N.; Dragan, D.; Mihic, S.; Anisic, Z. Creation and usage of 3D full body avatars. *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara*. 2017; Volume 15(1), pp. 29-34.
 38. Silva-Bolivar, G. J.; Muñoz, C. R.; Londoño-Marín, S.; Castro-Maldonado, J. J. Creation of digital risk doubles using motion capture and photogrammetry for computer-generated imagery content. In *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing. 2019; December, Volume 1418(1) pp. 1-6. doi: [10.1088/1742-6596/1418/1/012005](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1418/1/012005)
 39. Rahul, M. Review on motion capture technology. *Global Journal of Computer Science and Technology*. 2018.
 40. Pinterest. Dostupno na adresi: <https://za.pinterest.com/> . (posećeno: Avgust 2021.)
 41. Mara, H.; Portl J. Acquisition and documentation of vessels using high resolution 3D-scanners. In: *Corpus Vasorum Antuorum*. 2013; pp.25–40.
 42. Montusiewicz, J.; Barszcz, M.; Dziedzic K. Photorealistic 3D Digital Reconstruction of a Clay Pitcher. *Adv Sci Tech Res J*. 2019; Volume 13, pp. 255–263. doi: [10.12913/22998624/113276](https://doi.org/10.12913/22998624/113276)
 43. Spelitz, S.; Moitinho de Almeida, V.; Lang-Auinger C. Automatic geometry, metrology, and visualisation techniques for 3D scanned vessels. *Digi Apps Arch Cultural Heritage*. 2020; Volume 17, pp. 1–8. doi: [10.1016/j.daach.2019.e00105](https://doi.org/10.1016/j.daach.2019.e00105)
 44. Arbacea, L.; Sonninob, E.; Callieri, M.; Dellepianec, M.; Fabbrid, M.; Idelsone,A.I.; Scopignoc R. Innovative uses of 3D digital technologies to assist the restoration of a fragmented terracotta statue. *J Cult Herit*.2013; Volume 14, pp. 332–345. doi: [10.1016/j.culher.2012.06.008](https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.06.008)
 45. Barsanti, S.G.; Guidi G. 3D digitization of museum content within the 3dicons project. In: *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume II-5/W1, XXIV International CIPA Symposium. 2–6 September 2013; Strasbourg, France, pp. 151–156.
 46. Jo Y.H; Hong S; Jo S.Y; Kwon, Y. M. Noncontact restoration of missing parts of stone Buddha statue based on three-dimensional virtual modeling and assembly simulation. *Herit Sci*. 2020; Volume 8(1), pp. 1-12. doi: [10.1186/s40494-020-00450-8](https://doi.org/10.1186/s40494-020-00450-8)
 47. Giuffrida, D.; Nardo, V.M.; Adinolfi, O.; Mastelloni, M.A.; Ponterio, R.C. A theatrical double-faced mask preserved at the museum of lipari (messina): study and 3d reconstruction through portable equipment. *Virtual Archaeol Rev*. 2021; Volume 12(24), pp. 39-48.
 48. Dawson, P.C.; Levy, R.M.; Oetelaar, G; Arnold, C.; Lacroix, D.; Macka G. Documenting Mackenzie inuit architecture using 3D laser scanning. *Alaska J Anthropol*. 2009; Volume 7(2), pp. 29–44.
 49. Milosz, M.; Skulimowski, S.; Keşik, J.; Montusiewicz J. Virtual and interactive museum of archaeological artefacts from Afrasiyab—an ancientcity on the silk road. *Digi Apps Arch Cult Herit*. 2020; Volume 18, pp. 1–12.

50. Dell'Unto, N.; Leander, A.M.; Ferdani, D.; Dellepiane, M.; Callieri, M.; Lindgren S. Digital reconstruction and visualization in archaeology. Case-study drawn from the work of the Swedish Pompeii Project. IEEE, Digital Heritage International Congress. 28 Oct-1 Nov 2013; Marseille, France, pp. 621–628. doi: [10.1109/DigitalHeritage.2013.6743804](https://doi.org/10.1109/DigitalHeritage.2013.6743804)
51. Guidi, G.; Russo, M.; Angheluddu, D. 3D survey and virtual reconstruction of archeological sites. *Digi Apps Arch Cult Herit.* 2014; 1:55–69. doi: [10.1016/j.daach.2014.01.001](https://doi.org/10.1016/j.daach.2014.01.001)
52. Balletti, C.; Guerra, F.; Scocca, V.; Gottardi C. 3D integrated methodologies for the documentation and the virtual reconstruction of an archaeological site. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5/W4, 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures.* 25–27 February 2015; Avila, Spain, pp. 215–222. doi: [10.5194/isprsarchives-XL-5-W4-215-2015](https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W4-215-2015)
53. Parrinello, S.; Bursich, D. 3D documentation for the study of the UNESCO site of Masada: Methodologies and applied research for the Analysis of Roman fields. The 22nd International Conference on Cultural Heritage and New Technologies, CHNT 22. 8–10 November 2017; Vienna, Austria, pp. 1–15.
54. Morena, S.; Barba, S.; Álvaro-Tordesillas, A. SHINING 3D EINSKAN-PRO, APPLICATION AND VALIDATION IN THE FIELD OF CULTURAL HERITAGE, FROM THE CHILLIDA-LEKU MUSEUM TO THE ARCHAEOLOGICAL MUSEUM OF SARNO. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.* 2019; Volume 42, pp. 135-142. doi: [10.5194/isprs-archives-XLII-2-W18-135-2019](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W18-135-2019)
55. Merchán, P.; Salamanca, S.; Adán, A. Restitution of sculptural groups using 3D scanners. *Sensors.* 2011; Volume 11(9), pp. 8497-8518. doi: [10.3390/s110908497](https://doi.org/10.3390/s110908497)
56. Kersten, T. P.; Lindstaedt, M.; Starosta, D. COMPARATIVE GEOMETRICAL ACCURACY INVESTIGATIONS OF HAND-HELD 3D SCANNING SYSTEMS-AN UPDATE. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences.* 2018; Volume 42(2). Pp. 487-494. doi: [10.5194/isprs-archives-XLII-2-487-2018](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-487-2018)
57. Bašić, A.; Mladineo, M.; Peko, I.; Aljinović, A. 3D Scanning, CAD Optimization and 3D Print Application in Cultural Heritage: An Example on Statue from the Ancient Salona. In *Mechanical Technologies and Structural Materials MTSM2018.* January, 2018; ISSN 1847-7917
58. Ebrahim, M. A. B. 3D laser scanners' techniques overview. *Int J Sci Res.* 2015; Volume 4(10), pp. 323-331. ISSN (Online): 2319-7064
59. Zhang S.; Huang P. S.; High-resolution, realtime 3-D shape measurement, *Optical Engineering.* 2006; Volume 45(12): 123601. doi: [10.1117/1.2402128](https://doi.org/10.1117/1.2402128)
60. Xu, J.; Ding, L.; Love, P. E. Digital reproduction of historical building ornamental components: From 3D scanning to 3D printing. *Automation in Construction.* 2017; Volume 76, pp. 85-96. doi: [10.1016/j.autcon.2017.01.010](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.01.010)
61. Haleem, A.; Javaid, M. 3D scanning applications in medical field: a literature-based review. *Clinical Epidemiology and Global Health.* 2019; Volume 7(2), pp. 199-210. doi: [10.1016/j.cegh.2018.05.006](https://doi.org/10.1016/j.cegh.2018.05.006)

62. Javaid, M.; Haleem, A.; Kumar, L. Current status and applications of 3D scanning in dentistry. *Clinical Epidemiology and Global Health*. 2019; Volume 7(2), pp. 228-233. doi: [10.1016/j.cegh.2018.07.005](https://doi.org/10.1016/j.cegh.2018.07.005)
63. Javaid, M.; Haleem, A.; Singh, R. P.; Suman, R. Industrial perspectives of 3D scanning: Features, roles and its analytical applications. *Sensors International*. 2021; Volume 2, 100114. doi: [10.1016/j.sintl.2021.100114](https://doi.org/10.1016/j.sintl.2021.100114)
64. Dombroski, C. E.; Balsdon, M. E.; Froats, A. The use of a low-cost 3D scanning and printing tool in the manufacture of custom-made foot orthoses: a preliminary study. *BMC research notes*. 2014; Volume 7(1), pp. 1-4.
65. Ciobanu, O.; Xu, W.; Ciobanu, G. The use of 3D scanning and rapid prototyping in medical engineering. *Fiabil. Durab*, 1. 2013. pp. 241-247.
66. Song, E., Yoon, S. W., Son, H., & Yu, S. Foot Measurement Using 3D Scanning Model. *International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*. 2018; Volume 18(3), pp. 167-174. doi: [10.5391/IJFIS.2018.18.3.167](https://doi.org/10.5391/IJFIS.2018.18.3.167)
67. Irzmańska, E.; Okrasa, M. Evaluation of protective footwear fit for older workers (60+): A case study using 3D scanning technique. *International Journal of Industrial Ergonomics*. 2018; Volume 67, pp. 27-31. doi: [10.1016/j.ergon.2018.04.001](https://doi.org/10.1016/j.ergon.2018.04.001)
68. Hofmann, B.; Konopka, K.; Fischer, D. C.; Kundt, G.; Martin, H.; Mittlmeier, T. 3D optical scanning as an objective and reliable tool for volumetry of the foot and ankle region. *Foot and Ankle Surgery*. 2021. doi: [10.1016/j.fas.2021.03.009](https://doi.org/10.1016/j.fas.2021.03.009)
69. Tredinnick, R.; Smith, S.; Ponto, K. A cost-benefit analysis of 3D scanning technology for crime scene investigation. *Forensic Science International: Reports*. 2019; Volume 1, 100025.
70. Xu, J.; Zhang, S. Status, challenges, and future perspectives of fringe projection profilometry. *Optics and Lasers in Engineering*. 2020; Volume 135, 106193.
71. Haleem, A.; Gupta, P.; Bahl, S.; Javaid, M.; Kumar, L. 3D scanning of a carburetor body using COMET 3D scanner supported by COLIN 3D software: Issues and solutions. *Materials Today: Proceedings*. 2021; Volume 39, pp. 331-337. doi: [10.1016/j.matpr.2020.07.427](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.427)
72. Helle, R. H.; Lemu, H. G. A case study on use of 3D scanning for reverse engineering and quality control. *Materials Today: Proceedings*. 2021; pp. 5255-5262. doi: [10.1016/j.matpr.2021.01.828](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.828)
73. Burke, J.; Bothe, T.; Osten, W.; Hess, C. F. Reverse engineering by fringe projection. In *Interferometry XI: Applications*. International Society for Optics and Photonics. 2002; June, Volume 4778, pp. 312-324.
74. Friel, K.; Ajjimaporn, P.; Straub, J.; Kerlin, S. The use of 3D scanning for sporting applications. In *Three-dimensional imaging, visualization, and display 2015*. International Society for Optics and Photonics. 2015; May, Volume 9495, p. 949517
75. Dou, M.; Taylor, J.; Fuchs, H.; Fitzgibbon, A.; Izadi, S. 3D scanning deformable objects with a single RGBD sensor. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2015; pp. 493-501.
76. Zhang, C.; Pujades, S.; Black, M. J.; Pons-Moll, G. Detailed, accurate, human shape estimation from clothed 3D scan sequences. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2017; pp. 4191-4200.

77. Liu, Q.; Safavi-Naini, R.; Sheppard, N. P. Digital rights management for content distribution. In Proceedings of the Australasian information security workshop conference on ACSW frontiers 2003. 2003; January, Volume 21, pp. 49-58.
78. Evens, T.; Hauttekeete, L. Challenges of digital preservation for cultural heritage institutions. *Journal of Librarianship and Information Science*. 2011; Volume 43(3), pp. 157-165. doi: [10.1177/0961000611410585](https://doi.org/10.1177/0961000611410585)
79. Fruehauf, J. D.; Hartle, F. X.; Al-Khalifa, F. 3d printing: The future crime of the present. In Proceedings of the Conference on Information Systems Applied Research. 2016; ISSN 2167-1508.
80. Borissova, V. Cultural heritage digitization and related intellectual property issues. *Journal of Cultural Heritage*. Elsevier. 2018; Volume 34, pp. 145-150. doi: [10.1016/j.culher.2018.04.023](https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.04.023)
81. Trencheva, T.; Zdravkova, E. Intellectual Property Management In Digitization And Digital Preservation Of Cultural Heritage. *EDULEARN19 Proceedings*. 2019; July, Volume 10, pp. 6082-6087. ISBN: 978-84-09-12031-4
82. Manžuch, Z. Ethical issues in digitization of cultural heritage. *Journal of Contemporary Archival Studies*. 2017; Volume 4(2), pp.1-17.
83. Hou, J. U.; Kim, D. G.; Lee, H. K. Blind 3D mesh watermarking for 3D printed model by analyzing layering artifact. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*. 2017; Volume 12(11), pp. 2712-2725.
84. Kulkarni, P.; Dutta, D. An accurate slicing procedure for layered manufacturing. *Computer-Aided Design*. 1996; Volume 28(9), pp. 683-697.
85. Ahn, D.; Kim, H.; Lee, S; Fabrication direction optimization to minimize post-machining in layered manufacturing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2007; Volume 47(3-4), pp. 593-606.
86. Praun, E.; Hoppe H.; Finkelstein A. Robust mesh watermarking. Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. Los Angeles California USA, 1999; July, pp. 49-56., doi: [10.1145/311535.311540](https://doi.org/10.1145/311535.311540)
87. Wu, H. T.; Cheung, Y. M. A fragile watermarking scheme for 3D meshes. In Proceedings of the 7th workshop on Multimedia and security. 2005; August, pp. 117-124., doi: [10.1145/1073170.1073192](https://doi.org/10.1145/1073170.1073192)
88. Nakazawa, S.; Kasahara, S.; Takahashi, S. A visually enhanced approach to watermarking 3D models. In 2010 Sixth International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing. IEEE. 2010, October, pp. 110-113.
89. Lee, C. H.; Varshney, A.; Jacobs, D. W. Mesh saliency. In *ACM SIGGRAPH 2005 Papers*. 2005; pp. 659-666.
90. Cho, J. W.; Prost, R.; Jung, H. Y. An oblivious watermarking for 3-D polygonal meshes using distribution of vertex norms. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2006; Volume 55(1), pp. 142-155.
91. Botta, M.; Cavagnino, D.; Gribaudo, M.; Piazzolla, P. Fragile Watermarking of 3D Models in a Transformed Domain. *Applied Sciences*. 2020; May, Volume 10(9), pp. 3244-3259. doi: [10.3390/app10093244](https://doi.org/10.3390/app10093244)

92. Cox, I.; Miller, M.; Bloom, J.; Fridrich, J.; Kalker, T. Digital watermarking and steganography. Morgan Kaufmann: San Francisco, CA, USA. 2007;
93. Wang, K.; Lavoué, G.; Denis, F.; Baskurt, A. Robust and blind mesh watermarking based on volume moments. *Computers & Graphics*. 2011; February, Volume 35(1), pp. 1-19. doi: [10.1016/j.cag.2010.09.010](https://doi.org/10.1016/j.cag.2010.09.010)
94. Hou, J. U.; Kim, D.; Ahn, W. H.; Lee, H. K. Copyright protections of digital content in the age of 3d printer: Emerging issues and survey. *IEEE Access*. 2018; August; Volume 6, pp. 44082-44093. doi: [10.1109/ACCESS.2018.2864331](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2864331)
95. Ivanova, O.; Elliott, A.; Campbell, T.; Williams, C. B. Unclonable security features for additive manufacturing. *Additive Manufacturing*. 2014; October, Volume 1-4, pp. 24-31. doi: [10.1016/j.addma.2014.07.001](https://doi.org/10.1016/j.addma.2014.07.001)
96. Elliott, A. M. The Effects of Quantum Dot Nanoparticles on Polyjet Direct 3D Printing Process. 2014; February; PhD Thesis. Virginia Tech.
97. Hu, R.; Xie, L.; Yu, H.; Ding, B. Applying 3D polygonal mesh watermarking for transmission security protection through sensor networks. *Mathematical problems in engineering*, 2014; January, Volume 14, doi: [10.1155/2014/305960](https://doi.org/10.1155/2014/305960)
98. Nikolić, J.; Riedinger, C.; Jordan, M.; Tabia, H.; Vasić, B. Digital security: 3D geometry protection of the automatically restituted historical buildings. *Facta Universitatis, Series: Automatic Control and Robotics*. 2016; Volume 1(1), pp. 43-52.
99. Amar, Y. B.; Trabelsi, I.; Dey, N.; Bouhleb, M. S. Euclidean Distance Distortion Based Robust and Blind Mesh Watermarking. *International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence*. 2016; July, Volume 4(2), pp. 46-51. doi: [10.9781/ijimai.2016.428](https://doi.org/10.9781/ijimai.2016.428)
100. Pham, G. N.; Lee, S. H.; Kwon, O. H.; Kwon, K. R. A 3D printing model watermarking algorithm based on 3D slicing and feature points. *Electronics*, 2018; February; Volume 7(2), 23. doi: [10.3390/electronics7020023](https://doi.org/10.3390/electronics7020023)
101. Pham, G. N.; Lee, S. H.; Kwon, O. H.; Kwon, K. R. A watermarking method for 3D printing based on menger curvature and K-Mean clustering. *Symmetry*. 2018; April, Volume 10(4), 97. doi: [10.3390/sym10040097](https://doi.org/10.3390/sym10040097)
102. Beugnon, S.; Puech, W.; Pedeboy, J. P. From visual confidentiality to transparent format-compliant selective encryption of 3d objects. In *2018 IEEE International Conference on Multimedia & Expo Workshops (ICMEW)*. 2018; July, pp. 1-6. doi: [10.1109/ICMEW.2018.8551510](https://doi.org/10.1109/ICMEW.2018.8551510)
103. Hamidi, M.; Chetouani, A.; El Haziti, M.; El Hassouni, M.; Cherifi, H. Blind robust 3D mesh watermarking based on mesh saliency and wavelet transform for copyright protection. *Information*. 2019; February, Volume 10(2), 67. doi: [10.3390/info10020067](https://doi.org/10.3390/info10020067)
104. Tran T.V.; Pham, G. N.; Nguyen B. A.; Ta K. D.; Nguyen P. H.; 3D Printing Watermarking Algorithm Based on 2D Slice Mean Distance. *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*. 2020; February, Volume 9, pp. 57-64. doi: [10.30534/ijatcse/2020/10912020](https://doi.org/10.30534/ijatcse/2020/10912020)
105. George, E.; Liacouras, P.; Rybicki, F.J.; Mitsouras, D. Measuring and Establishing the Accuracy and Reproducibility of 3D Printed Medical Models. *Radiographics* 2017, 37, pp. 1424–1450.

106. Hanon, M.M.; Zsidai, L.; Ma, Q. Accuracy investigation of 3D printed PLA with various process parameters and different colors. *Mater. Today Proc.* 2021, 42, pp. 3089–3096.
107. Chikkangoudar, R.; Sachidananda, T.; Pattar, N. Influence of 3D printing parameters on the dimensional stability of polypropylene/clay printed parts using laser scanning technique. *Mater. Today Proc.* 2021, 44, pp. 4118–4123.
108. Lemu, H.G.; Kurtovic, S. 3D printing for rapid manufacturing: Study of dimensional and geometrical accuracy. In *IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2011; pp. 470–479.
109. Chin, S.Y.; Dikshit, V.; Priyadarshini, B.M.; Zhang, Y. Powder-Based 3D Printing for the Fabrication of Device with Micro and Mesoscale Features. *Micromachines* 2020, 11, 658.
110. Yuan, J.; Tian, J.; Chen, C.; Chen, G. Experimental Investigation of Color Reproduction Quality of Color 3D Printing Based on Colored Layer Features. *Molecules* 2020, 25, 2909.
111. Lowenthal, D. *The past is a foreign country-revisited*. Cambridge University Press; 2015.
112. Paragraf.rs. Dostupno na adresi: <https://www.paragraf.rs/dnevne-vesti/030621/030621-vest12.html> (posećeno: Avgust 2021.)
113. Rančić, D., Stamenković G. PRIMENA SAVREMENIH INFORMACIONIH TEHNOLOGIJA U CILJU PROMOCIJE TURIZMA I OČUVANJA KULTURNOG NASLEĐA. 2020.
114. Aleksandrović, V. ANALOGNI I DIGITALNI ZVUK.
115. MeshLab. Dostupno na adresi: <https://www.meshlab.net/> (posećeno: Maj 2021.)
116. CloudCompare. Dostupno na adresi: <https://www.danielgm.net/cc/> (posećeno: Maj 2021.)
117. AgiSoft Metashape. Dostupno na adresi: <https://www.agisoft.com/> (posećeno: Maj 2021.)
118. 3DSCANEXPERT. Dostupno na adresi: <https://3dscanexpert.com/shining-3d-einscan-pro-plus-3d-scanner-review-2/>. (posećeno: Decembar 2020.)
119. User Manual Of Einscan-Pro. Dostupno na adresi: <https://images-na.ssl-images-amazon.com/images/I/C1HP-UYfCGS.pdf> (posećeno: Decembar 2020.)
120. SHINING3D. Dostupno na adresi: <https://www.shining3d.com/> (posećeno: Decembar 2020.)
121. FlippedNormals. Learn to Sculpt Like a Pro in ZBrush. Dostupno na adresi: <https://www.youtube.com/watch?v=0PaYUUvgwYM> (posećeno: Septembar 2021)
122. Inženjerska animacija. Dostupno na adresi: <https://www.youtube.com/watch?v=QsZSqMV7Qu0> (posećeno: Septembar 2021.)
123. Li, Y.; Liu, P.; Li, H.; Huang, F. A Comparison Method for 3D Laser Point Clouds in Displacement Change Detection for Arch Dams. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2021, 10, 184.
124. Ahmad, F.N.; Yusoff, A.R.; Ismail, Z.; Majid, Z. Comparing the performance of point cloud registration methods for landslide monitoring using mobile laser scanning data. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 2018, XLII-4/W9, 11–21.
125. Autodesk 3ds Max. Dostupno na adresi: <https://www.autodesk.eu/products/3ds-max/overview> (posećeno: April 2021.)
126. Remondino, F.; Guarnieri, A.; Vettore, A. 3D modeling of close-range objects: photogrammetry or laser scanning?. In *Videometrics VIII. International Society for Optics and Photonics*. January, 2005; Volume 5665. doi: [10.1117/12.586294](https://doi.org/10.1117/12.586294)

127. Alshawabkeh, Y.; El-Khalili, M.; Almasri, E.; Bala'awi, F.; Al-Massarweh, A. Heritage documentation using laser scanner and photogrammetry. The case study of Qasr Al-Abidit, Jordan. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*. 2020; Volume 16, e00133. doi: [10.1016/j.daach.2019.e00133](https://doi.org/10.1016/j.daach.2019.e00133)

PRILOZI

Spisak objavljenih naučnih radova

Rad u međunarodnom časopisu istaknutih vrednosti (M22)

1. **Vasiljević, I.**, Obradović, R., Đurić, I., Popkonstantinović, B., Budak, I., Kulić, L., Milojević, Z. Copyright Protection of 3D Digitized Artistic Sculptures by Adding Unique Local Inconspicuous Errors by Sculptors. *Appl. Sci.* 2021, 11, 7481.
2. Đurić, I., Obradović, R., **Vasiljević, I.**, Ralević, N., Stojaković, V. Two-Dimensional Shape Analysis of Complex Geometry Based on Photogrammetric Models of Iconostases. *Appl. Sci.* 2021, 11, 7042.
3. Popkonstantinović, B., Obradović, R., Stojićević, M., Jeli, Z., Cvetković, I., **Vasiljević, I.**, Milojević, Z. The Design and Simulation of an Astronomical Clock. *Applied Sciences*, 2021, 11(9), 3989.
4. Obradović, M., **Vasiljević, I.**, Đurić, I., Kićanović, J., Stojaković, V., Obradović, R. Virtual Reality Models Based on Photogrammetric Surveys—A Case Study of the Iconostasis of the Serbian Orthodox Cathedral Church of Saint Nicholas in Sremski Karlovci (Serbia). *Appl. Sci.* 2020, 10, 2743.

Saopštenje sa međunarodnog skupa štampano u celini (M33)

1. Đurić, I., **Vasiljević, I.**, Obradović, M., Stojaković, V., Kićanović, J., & Obradović, R. Comparative Analysis of Open-Source and Commercial Photogrammetry Software for Cultural Heritage. 2021. eCAADe2021
2. **Vasiljević I.**, Obradović R., Đurić I., Santoši Ž., Obradović M., Budak I. ACQUISITION OF PHOTOGRAPHS FOR PHOTOGRAMMETRIC RECONSTRUCTION OF SCULPTURE IN DIFFERENT LIGHTING CONDITIONS – INDOOR AND OUTDOOR PHOTOGRAPHY. The 7th International Conference on Geometry and Graphics Mongeometrija 2020. September 2020. pp. 395-404. ISBN 978-86-6060-046-4
3. Đurić I., Stojaković V., Mišić S., Kekeljević I., **Vasiljević I.**, Obradović M., Obradović R., (2019). Church heritage multimedia presentation: Case study of the iconostasis as the characteristic art and architectural element of the Christian Orthodox churches. In: eCAADe / SIGraDi 2019 International Scientific Conference, Porto, Portugal.

4. Obradović R., Vujanović M., Kekeljević I., **Vasiljević I.**, Đurić I., Krstanović L., Banjac B.: Polyhedral Characters as a Basis for Teaching Computer Animation, Geometrias'19, Porto, 2019. pp. 51-54.
5. Obradović R., **Vasiljević I.**, Kovačević D., Marinković Z., Farkaš R.: Drone Aided Inspection during Bridge Construction, 2019 Zooming Innovation in Consumer Technologies Conference (ZINC).

Rad u časopisu nacionalnog značaja (M52)

1. **Vasiljević I.**, Dragan D., Obradović R., Petrović V.: ANALYSIS OF COMPRESSION TECHNIQUES FOR STEREOSCOPIC IMAGES, SPIIRAS Proceedings, 2018, Vol. 6, No 61, pp. 197-220, ISSN 2078-9181

Rad u naučnom časopisu (M53)

1. **Vasiljević I.**, Krstanović L.: Teorijske osnove i implementacija raytracer algoritma za renderovanje, Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka, Novi Sad 2019. pp. 978-981.

Saopštenje sa skupa nacionalnog značaja štampano u celini (M63)

1. **Vasiljević I.**, Dragan D., Obradović R.: Poređenje tehnika za kompresiju stereoskopskih slika, 11. DOGS, Digitalna obrada govora i slike, Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, 22-25 Novembar, 2017, pp. 73-76, ISBN 978-86-7892-993-9

Javno izvođenje umetničkog dela u reprezentativnom ili prikazivačkom prostoru od međunarodnog značaja (DU-21)

1. Obradović R., Knežević B., Vujanović M., Kekeljević I., Šunjka N., Banjac B., Stajić B., **Vasiljević I.**, Mijatov J., Kuzmanović N.: "Head is not Dead" CG animirani film u trajanju 8'8", prikazan u takmičarskom programu međunarodnog festivala animiranog filma FROG 2017, i revijalnom delu međunarodnog festivala animiranog filma BANJALUKA 2017., Novi Sad, 2017

Javno izvođenje umetničkog dela u reprezentativnom ili prikazivačkom prostoru od nacionalnog značaja (DU-52)

1. Obradović R., Stojaković V., Đurić I., **Vasiljević I.**, Kekeljević I., Obradović M.: 3D digitalizacija i AR (augmented reality) prezentacija ikonostasa crkve Svetog velikomučenika Prokopija u Srpskoj Crnji, izložba „Đura Jakšić. Između mita i stvarnosti“, Galerija Matice srpske u Novom Sadu i Narodni Muzej u Beogradu, Novi Sad, Galerija Matice srpske, 2019
2. Obradović R., Stojaković V., Đurić I., **Vasiljević I.**, Kekeljević I., Obradović M.: Multimedijalna prezentacija digitalizovanih ikonostasa crkve Svetog arhiđakona Stefana u Sremskoj Mitrovici i ikonostasa Saborne crkve Svetog Nikole u Sremskim Karlovcima, izložba „Kračun“, Galerija Matice srpske u Novom Sadu, Galerija Matice srpske, 2020

Biografija kandidata



Ivana Vasiljević rođena je u Vlasenici (RS/BiH). Osnovnu školu "Aleksa Jakšić" završila je u Milićima. Gimnaziju opšteg smera završila je u JU SŠC "Milutin Milanković" u Milićima. Studije Animacije u inženjerstvu na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu upisala je 2012. godine. Diplomirala je 23.09.2016. godine sa temom diplomskog rada: "*Interaktivna simulacija kretanja loptice u stonom tenisu uz primenu PHANToM Omni heptičkog uređaja*" i stekla zvanje diplomirani inženjer računarske grafike. Upisala je master akademske studije na Fakultetu tehničkih nauka u toku školske 2016/2017. godine, smer Animacija u inženjerstvu. Master rad sa temom "*Teorijske osnove i implementacija raytracer algoritma za renderovanje*" odbranila je 5. oktobra 2018. godine i stekla zvanje master inženjer računarske grafike. Doktorske akademske studije upisala je na istom fakultetu u toku školske 2018/2019. godine. U toku školske 2019/2020. godine položila je sve ispite predviđene planom i programom doktorskih akademskih studija smera Animacija u inženjerstvu, a u avgustu 2021. godine objavila je rad u časopisu koji se nalazi na SCIE listi kategorije M22, gde je prvi autor i time stekla uslov za prijavu i odbranu doktorske disertacije iz uže naučne oblasti računarska grafika. Na Fakultetu tehničkih nauka zaposlena je od 2016. godine gde je kao saradnik u nastavi i asistent učestvovala na realizaciji nastave na više od 15 predmeta.

Овај Образац чини саставни део докторске дисертације, односно докторског уметничког пројекта који се брани на Универзитету у Новом Саду. Попуњен Образац укоричити иза текста докторске дисертације, односно докторског уметничког пројекта.

План третмана података

Назив пројекта/истраживања
Примена бесконтактних метода за 3Д дигитализацију скулптуре и уградња заштите од злоупотребе у 3Д виртуелни модел
Назив институције/институција у оквиру којих се спроводи истраживање
а) Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду б) в)
Назив програма у оквиру ког се реализује истраживање
Анимација у инжењерству (Рачунарска графика) – докторска дисертација
1. Опис података
<p>1.1 Врста студије</p> <p><i>Укратко описати тип студије у оквиру које се подаци прикупљају</i></p> <p><u>Докторска дисертација</u></p> <p>1.2 Врсте података а) квантитативни б) квалитативни</p> <p>1.3. Начин прикупљања података а) анкете, упитници, тестови <u>Анкета</u> б) клиничке процене, медицински записи, електронски здравствени записи в) генотипови: навести врсту _____ г) административни подаци: навести врсту _____ д) узорци ткива: навести врсту _____ ђ) снимци, фотографије: <u>Дигитална фотографија</u> е) текст, навести врсту <u>Актуелна литература из области</u> ж) мапа, навести врсту _____ з) остало: описати <u>Експериментална испитивања</u></p>

1.3 Формат података, употребљене скале, количина података

1.3.1 Употребљени софтвер и формат датотеке:

- a) Excel фајл, датотека **.xlsx**
- b) SPSS фајл, датотека _____
- c) PDF фајл, датотека **.pdf**
- d) Текст фајл, датотека **.docx**
- e) JPG фајл, датотека **.jpg, .png, .raw**
- f) Остало, датотека **.obj, .stl, .mov, .max, .ZPR, .mlp, .bin**

1.3.2. Број записа (код квантитативних података)

- a) број варијабли **5**
- б) број мерења (испитаника, процена, снимака и сл.) **195 испитаника, 303 фотографије, 1 видео снимак**

1.3.3. Поновљена мерења

- a) **да**
- б) **не**

Уколико је одговор да, одговорити на следећа питања:

- a) временски размак између поновљених мера је **два месеца код 3Д дигитализације, један дан код процесирања података**
- б) варијабле које се више пута мере односе се на **геометрију добијених 3Д модела**
- в) нове верзије фајлова који садрже поновљена мерења су именоване као _____

Напомене: _____

Да ли формати и софтвер омогућавају дељење и дугорочну валидност података?

- a) **Да**
- б) **Не**

Ако је одговор не, образложити _____

2. Прикупљање података

2.1 Методологија за прикупљање/генерисање података

2.1.1. У оквиру ког истраживачког нацрта су подаци прикупљени?

- a) експеримент, навести тип **анкета, софтверска анализа**
- б) корелационо истраживање, навести тип _____
- ц) анализа текста, навести тип **прикупљање података анализом доступне литературе**

д) остало, навести шта _____

2.1.2 Навести врсте мерних инструмената или стандарде података специфичних за одређену научну дисциплину (ако постоје).

Фото-апарат: **NIKON D7000** (величина пиксела: 4.78 μ m, величина сензора: 23.6 \times 15.6mm, распон жишне даљине: 18-109mm, кроп фактор: 1.53)

3Д скенер: **EinScan Pro 2X**

2.2 Квалитет података и стандарди

2.2.1. Третман недостајућих података

а) Да ли матрица садржи недостајуће податке? Да **Не**

Ако је одговор да, одговорити на следећа питања:

- а) Колики је број недостајућих података? _____
- б) Да ли се кориснику матрице препоручује замена недостајућих података? Да **Не**
- в) Ако је одговор да, навести сугестије за третман замене недостајућих података

–

2.2.2. На који начин је контролисан квалитет података? Описати

Квалитет података контролисан је на 3Д дигитализованом моделу у односу на мере (димензије) реалне скулптуре.

–

2.2.3. На који начин је извршена контрола уноса података у матрицу?

Контрола уноса података у матрицу је изведена поређењем добијених података са литературним подацима.

–

3. Третман података и пратећа документација

3.1. Третман и чување података

3.1.1. Подаци ће бити депоновани у Репозиторијуму докторских дисертација на Универзитету у Новом Саду.

3.1.2. URL адреса <https://cris.uns.ac.rs/searchDissertations.jsf>

3.1.3. DOI

3.1.4. Да ли ће подаци бити у отвореном приступу?

а) **Да**

б) Да, али после ембарга који ће трајати до _____

в) **Не**

Ако је одговор не, навести разлог _____

3.1.5. Подаци неће бити депоновани у репозиторијум, али ће бити чувани.

Образложење

–

–

3.2 Метаподаци и документација података

3.2.1. Који стандард за метаподатке ће бити примењен?

3.2.1. Навести метаподатке на основу којих су подаци депоновани у репозиторијум.

–

–

Ако је потребно, навести методе које се користе за преузимање података, аналитичке и процедуралне информације, њихово кодирање, детаљне описе варијабли, записа итд.

–

–

–

–

3.3 Стратегија и стандарди за чување података

3.3.1. До ког периода ће подаци бити чувани у репозиторијуму?

3.3.2. Да ли ће подаци бити депоновани под шифром? **Да** **Не**

3.3.3. Да ли ће шифра бити доступна одређеном кругу истраживача? **Да** **Не**

3.3.4. Да ли се подаци морају уклонити из отвореног приступа после извесног времена?
Да **Не**

Образложити

–

–

4. Безбедност података и заштита поверљивих информација

Овај одељак МОРА бити попуњен ако ваши подаци укључују личне податке који се односе на учеснике у истраживању. За друга истраживања треба такође размотрити заштиту и сигурност података.

4.1 Формални стандарди за сигурност информација/података

Истраживачи који спроводе испитивања с људима морају да се придржавају Закона о заштити података о личности

(https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_zastiti_podataka_o_licnosti.html) и одговарајућег институционалног кодекса о академском интегритету.

4.1.2. Да ли је истраживање одобрено од стране етичке комисије? **Да** **Не**

Ако је одговор **Да**, навести датум и назив етичке комисије која је одобрила истраживање

–

4.1.2. Да ли подаци укључују личне податке учесника у истраживању? **Да** **Не**

Ако је одговор **да**, наведите на који начин сте осигурали поверљивост и сигурност информација везаних за испитанике:

- а) Подаци нису у отвореном приступу
- б) Подаци су анонимизирани
- ц) Остало, навести шта

–

–

5. Доступност података

5.1. Подаци ће бити

а) **јавно доступни**

б) **доступни само уском кругу истраживача у одређеној научној области**

ц) затворени

Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести под којим условима могу да их користе:

–

–

Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести на који начин могу приступити подацима:

–

–

5.4. Навести лиценцу под којом ће прикупљени подаци бити архивирани.

Ауторство – некомерцијално- без прераде

6. Улоге и одговорност

6.1. Навести име и презиме и мејл адресу власника (аутора) података

Ивана Васиљевић, email: ivanav@uns.ac.rs

6.2. Навести име и презиме и мејл адресу особе која одржава матрицу с подацима

Ивана Васиљевић, email: ivanav@uns.ac.rs

6.3. Навести име и презиме и мејл адресу особе која омогућује приступ подацима другим истраживачима

Ивана Васиљевић, email: ivanav@uns.ac.rs