

Fotogrametrijsko prostorno modeliranje predmeta od metala

Zajc, Maja

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geodesy / Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:256:119909>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-17**



Repository / Repozitorij:

repozitorij.geof.unizg.hr/en



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEODETSKI FAKULTET**

Maja Zajc

**FOTOGRAMETRIJSKO PROSTORNO
MODELIRANJE PREDMETA
OD METALA**

Diplomski rad

Maja Zajc ♦ DIPLOMSKI RAD ♦ 2024.

Zagreb, 2024.



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEODETSKI FAKULTET**

Maja Zajc

**FOTOGRAMETRIJSKO PROSTORNO
MODELIRANJE PREDMETA
OD METALA**

Diplomski rad

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEODETSKI FAKULTET



Na temelju članka 19. Etičkog kodeksa Sveučilišta u Zagrebu i Odluke br. 1_349_11 Fakultetskog vijeća Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, od 26.10.2017. godine (klasa: 643-03/16-07/03), uređena je obaveza davanja „Izjave o izvornosti“ diplomskog rada koji se vrednuju na diplomskom studiju geodezije i geoinformatike, a u svrhu potvrđivanja da je rad izvorni rezultat rada studenata te da taj rad ne sadržava druge izvore osim onih koji su u njima navedeni.

IZJAVLJUJEM

Ja, **Maja Zajc**, (JMBAG: 0083214781), rođena dana 08.03.1996. u Virovitici, izjavljujem da je moj diplomski rad izvorni rezultat mojeg rada te da se u izradi tog rada nisam koristila drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

U Zagrebu, dana _____

Potpis studenta / studentice

I. AUTOR	
Ime i prezime:	Maja Zajc
Datum i mjesto rođenja:	08. ožujka 1996., Virovitica, Republika Hrvatska
II. DIPLOMSKI RAD	
Naslov:	Fotogrametrijsko prostorno modeliranje predmeta od metala
Broj stranica:	90
Broj tablica:	6
Broj slika:	104
Broj bibliografskih podataka:	3+ 14 URL-a
Ustanova i mjesto gdje je rad izrađen:	Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu
Mentor:	izv. prof. dr. sc. Dubravko Gajski
Komentor:	
Voditelj:	Dubravka Mauerer, mag. ing. geod. et geoinf.
III. OCJENA I OBRANA	
Datum zadavanja teme:	22.01.2024.
Datum obrane rada:	05.07.2024.
Sastav povjerenstva pred kojim je branjen diplomski rad:	izv. prof. dr. sc. Dubravko Gajski
	izv. prof. dr. sc. Andrija Krtalić
	prof. dr. sc. Robert Župan

Fotogrametrijsko prostorno modeliranje predmeta od metala

Sažetak: Rad je obuhvatio analizu procesa rekonstrukcije 3D modela kroz primjere različitih vrsta i tekstura metalnih objekata kao što su kip kupačice, majzekovog trokuta, te ukrasa - svijećnjaka, jabuke, srca i vaze. Ključne faze uključivale su postavljanje markera za postavljanje mjerila i fotogrametrijsku orijenciju fotografija, korištenje maski za preciznost, tehnike generiranja oplošja modela i dodavanje teksture radi rekonstrukcije vjernih objekata visoke kvalitete. Važnost kontrasta između objekta i pozadine, kao i vrsta osvjjetljenja istaknuti su kao ključni faktori u procesu rekonstrukcije. Analiza rezultata istaknula je izazove s reflektirajućim dijelovima te potrebu za prilagodbom tehnika ovisno o specifičnostima objekta. Rezultati su pokazali kako različiti pristupi, poput korištenja maski, manipuliranjem sjenama i kontrastom, mogu značajno utjecati na kvalitetu i točnost konačnog modela. Također, analiza pokazuje važnost iterativnog procesa popravaka i optimizacije kako bi se postigli najbolji mogući rezultati.

Ključne riječi: *3d model, refleksija, metal, tekstura, fotogrametrija, kontrast*

Photogrammetric Spatial Modeling of Metal Objects

Abstract: This paper encompasses the analysis of 3D model reconstruction process through examples of various types and textures of metal objects such as a statue of a bather, a Majzek's triangle, and ornaments - a candlestick, an apple, a heart, and a vase. Key stages included placing markers for scale setting and photo alignment, using masks for precision, mesh generation techniques, and adding texture to reconstruct accurate high-quality objects. The importance of contrast between the object and the background, as well as the type of lighting, were highlighted as critical factors in the reconstruction process. The analysis of the results emphasized challenges with reflective parts and the need to adapt techniques depending on the specifics of the object. The results demonstrated how different approaches, such as using masks, manipulating shadows, and contrast, can significantly impact the quality and accuracy of the final model. Additionally, the analysis emphasizes the importance of an iterative process of repairs and optimization to achieve the best possible results.

KEYWORDS: *3d model, reflection, metal, texture, photogrammetry, contrast*

Sadržaj

1. UVOD.....	1
2. OSNOVE FOTOGRAMETRIJSKOG PROSTORNOG MODELIRANJA.....	2
2.1 Osnove i principi 3D modeliranja.....	2
2.2 Izazovi u fotogrametrijskom modeliranju metalnih predmeta.....	4
3. PREDPRIPREMA ZA FOTOGRAMETRIJSKO SNIMANJE.....	5
3.1 Uređaji	5
3.2 Oprema.....	6
4. KARAKTERISTIKE OBJEKATA I UVJETA SNIMANJA	10
4.1 Augustinčičeva kupačica	10
4.2 Majzekov trokut.....	13
4.3 Jabuka	16
4.4 Svijećnjak.....	18
4.5 Vaza	20
4.6 Srce	23
5. PROCESIRANJE I OBRADA PODATAKA	26
5.1 Općenito o korištenim softverima.....	26
5.2 Obrada podataka	26
6. ANALIZA REZULTATA	34
6.1 Augustinčičeva kupačica	34
6.2 Majzekov trokut.....	44
6.3 Jabuka	56
6.4 Svijećnjak.....	62
6.5 Vaza	68
6.6 Srce	77
ZAKLJUČAK	84
LITERATURA.....	85
POPIS SLIKA	86
POPIS TABLICA.....	89
PRILOZI.....	89
ŽIVOTOPIS	90

1. UVOD

Izrada prostornih modela metalnih predmeta fotogrametrijskom metodom predstavlja poseban izazov u području fotogrametrije. Metalni objekti koji zbog svojih reflektivnih i uglačanih površina stvaraju značajne odsjaje koji otežavaju precizno snimanje detalja. Ovi odsjaji dovode do netočnih ili nepotpunih modela, što otežava postizanje vjerodostojnosti u 3D modeliranju. S obzirom na sve veću primjenu 3D modeliranja u raznim industrijama, od restauracije kulturne baštine do inženjeringa, ključno je istražiti metode koje omogućuju preciznu i vjerodostojnu digitalizaciju metalnih predmeta.

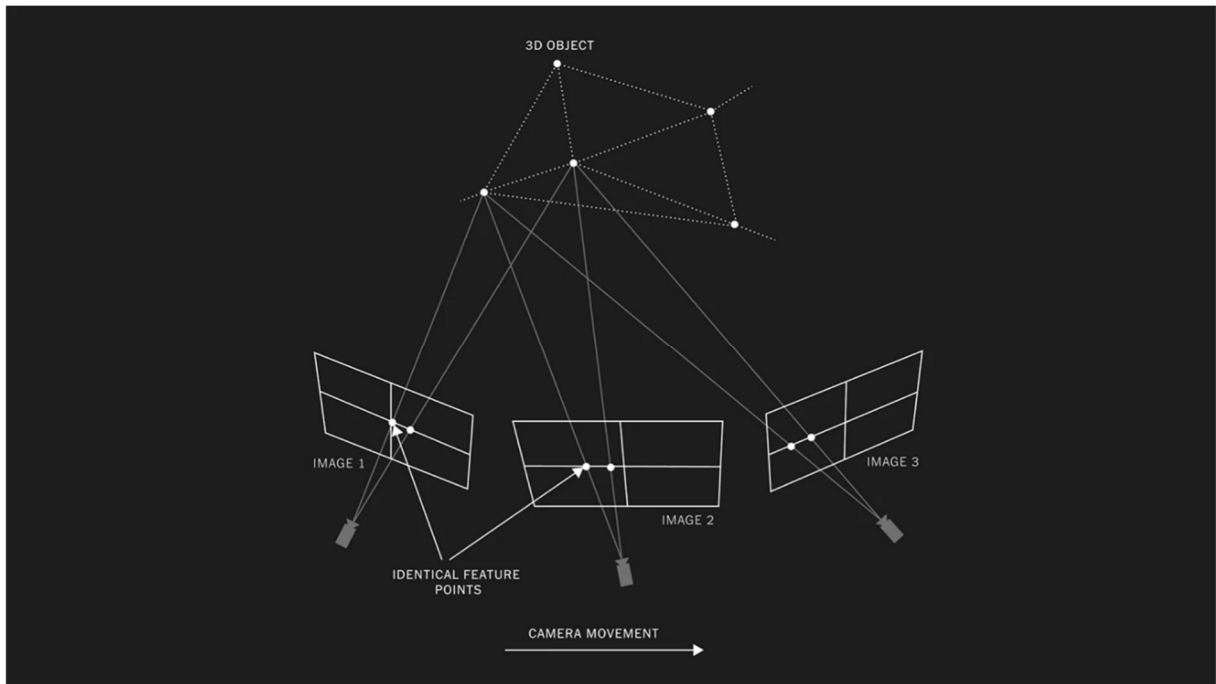
Cilj ovog diplomskog rada jest ispitati mogućnosti izrade 3D modela nekoliko odabranih metalnih predmeta primjenom fotogrametrijske metode izrade prostornih modela. Prilikom istraživanja i izrade diplomskoga rada koristili su se različiti pristupi za smanjenje problema uzrokovanih refleksijama i odsjajima, kao što su korištenje traka, pudera i različitih osvjetljenja. Istraživanje se provodilo na nekoliko metalnih predmeta različitih oblika i površinskih karakteristika, kako bi se dobio širok uvid u učinkovitost primijenjenih metoda.

2. OSNOVE FOTOGRAMETRIJSKOG PROSTORNOG MODELIRANJA

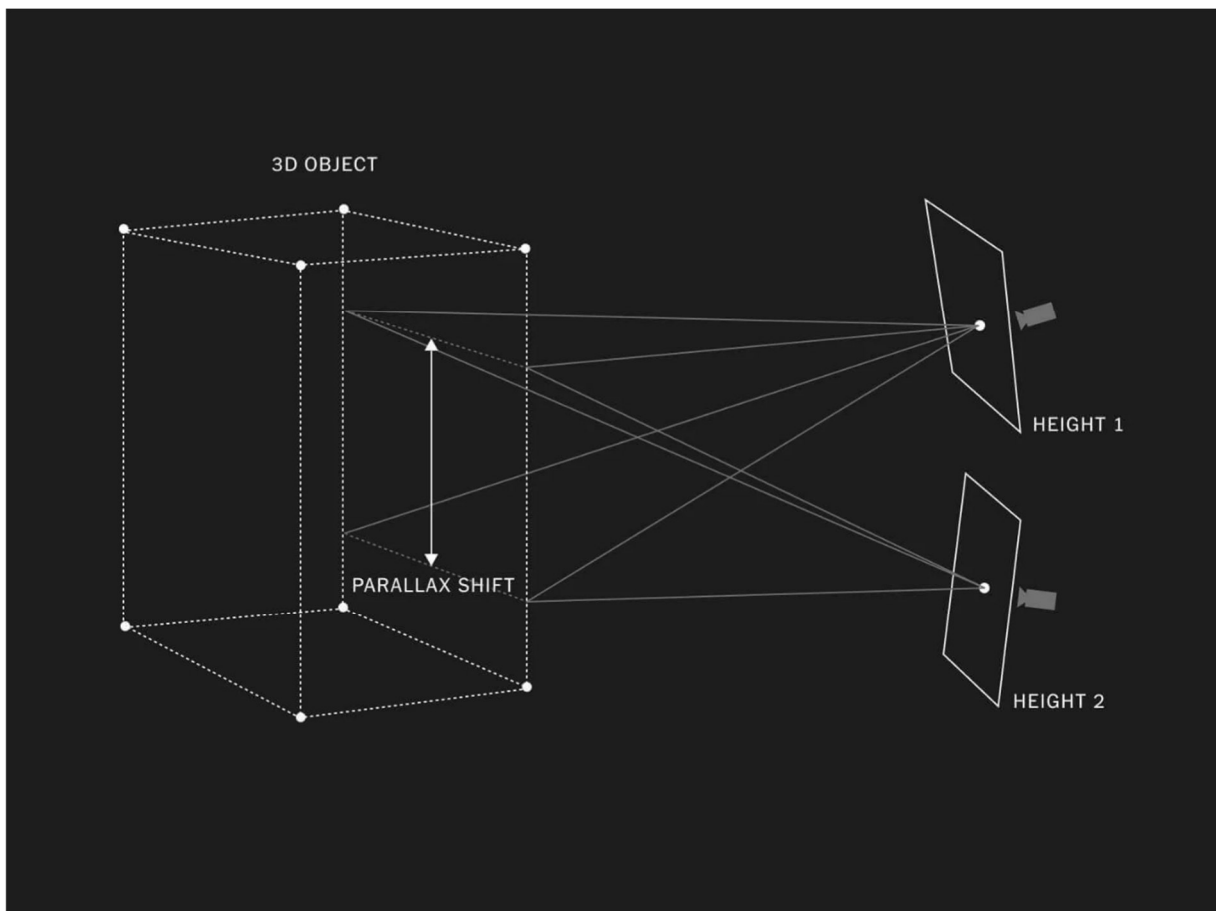
2.1 Osnove i principi 3D modeliranja

Fotogrametrija (Luhmann, 2023) omogućava prikupljanje kvantitativnih podataka o objektima te se može definirati kao "znanost o mjerenju putem fotografija". Ako se želi odrediti udaljenost, površina ili bilo koja druga geometrijska informacija, ključni je zadatak dobiti koordinate objekta iz bilo koje točke na fotografiji, s kojih se mogu izračunati geometrijski podatci. S fotografije dvodimenzionalne ravnine mogu se dobiti samo dvodimenzionalne koordinate. Stoga, ako su potrebne trodimenzionalne koordinate, potrebno je pronaći način za dobivanje treće dimenzije. Princip koji je poznat kao prostorni presjek naprijed homolognih zraka svjetlosti koristi se za dobivanje trodimenzionalnih informacija u fotogrametriji (Luhmann, 2023).

Postupak fotografiranja objekta za izradu 3D modela fotogrametrijskom metodom zahtijeva pažljivu pripremu i provođenje niza koraka radi postizanja preciznih rezultata (URL 1). Prvi korak u ovom procesu je priprema samog objekta. Čišćenje od prašine i prljavštine ključno je kako bi se osigurala kvalitetna podloga za snimanje. Dodatno, objekt treba biti stabilan i dobro postavljen kako bi se izbjeglo bilo kakvo pomicanje tijekom snimanja. Nakon pripreme, planiranje snimanja postaje ključno. Raznoliko snimanje iz različitih kutova omogućuje fotogrametrijskom softveru preciznije rekonstruiranje objekata u 3D prostoru. Stoga, odabir različitih perspektiva treba biti temeljit i pažljivo isplaniran. Fotografije treba snimati iz različitih kutova kao što je prikazano na slikama 1 i 2. Ova razlika u prividnom položaju, poznata kao stereoskopska paralaksa, omogućuje fotogrametrijskom softveru izračunavanje dubine i time renderiranje 3D modela. Fotografije snimljene s različitih visina stvaraju vertikalni paralaksni pomak, koji je neophodan softveru za triangulaciju i izradu 3D modela.



Slika 1. Horizontalno snimanje objekata (URL 1)



Slika 2. Vertikalno snimanje objekata (URL 1)

Sljedeći korak je sam proces snimanja, koji se može izvesti pomoću fotoaparata ili pametnog telefona. Važno je održavati stalne uvjete osvjetljenja tijekom snimanja kako bi se izbjegle moguće greške u modelu. Objekt mora zauzimati značajan dio prostora na slici te ga se nikada ne bi smjelo pomicati tijekom snimanja (URL 3). Nakon snimanja, fotografije se mogu urediti kako bi se poboljšala njihova kvaliteta, uključujući ispravke ekspozicije, oštrenje slike te uklanjanje neželjenih elemenata (URL 1). Dodatni savjeti uključuju korištenje stativa za fotoaparat radi očuvanja čvrste perspektive te upotrebu daljinskog upravljača kako bi se izbjegle vibracije tijekom snimanja (URL 1). Snimanje u RAW formatu preporučuje se zbog veće kontrole kod uređivanja fotografija (URL 1). Nakon završetka fotografiranja, slijedi uređivanje fotografija pomoću fotogrametrijskog softvera.

2.2 Izazovi u fotogrametrijskom modeliranju metalnih predmeta

Jedan od ključnih parametara u fotogrametriji je refleksija (Surmen, 2023). Svjetlost može negativno utjecati na fotogrametrijski proces, naročito kada se radi o metalnim i glatkim površinama. Većina softverskih paketa za fotogrametriju automatski stvara 3D plohu sa strukturom mreže, na temelju skupa različitih fotografija predmeta koji se modelira (URL 3). Ipak, neki softveri izdvajaju fazu podudaranja fotografija, što je poseban korak koji korisnik mora potvrditi. To omogućuje korisnicima da izmijene fotoset prije pokretanja složenijih računalnih procesa. U ovoj fazi računalo određuje koje su fotografije korisne za daljnju obradu i pronalazi područja preklapanja na više fotografija. Potom pohranjuje informacije o spajanju fotografija, što je slično sastavljanju 3D slagalice.

Visoko reflektirajuće površine odbijaju svjetlo iz okoline i kamere, stvarajući tako neželjene svjetline i izobličenja na fotografijama. Softver često pogrešno interpretira refleksije kao stvarne površinske detalje objekta, što rezultira netočnostima u konačnom 3D modelu (Hartley, 2003). Fotogrametrija se oslanja na podudaranje značajki na više fotografija kako bi stvorila 3D oblak točaka. Reflektirajuće površine često nemaju jasne teksture ili uzorke koje softver može pouzdano koristiti za fotogrametrijsku orijentaciju. To može dovesti do loše rekonstruiranih modela s nedosljednostima ili dijelovima koji nedostaju. Čak i manje promjene u osvjetljenju mogu značajno promijeniti način na koji se svjetlost odbija od sjajnog objekta. To stvara nedosljednosti u snimljenim podacima, otežavajući softveru izgradnju koherentne i točne 3D reprezentacije (Hartley, 2003).

3. PREDPRIPREMA ZA FOTOGRAMETRIJSKO SNIMANJE

3.1 Uređaji

Pri izradi ovog rada korišten je mobilni uređaj Samsung Galaxy S23+ koji ima tehničke mogućnosti za postizanje visokokvalitetnih fotografija. Mobilni uređaj Samsung Galaxy S23+ je moćan alat za fotografiranje koji zahvaljujući svom naprednom sustavu trostrukih kamera omogućuje korisnicima snimanje visokokvalitetnih fotografija i videozapisa u različitim uvjetima. Glavna kamera (URL 5) je opremljena 50-megapikselnim senzorom veličine 1/1,56 inča s pojedinačnim pikselima od 1,0 μm . Ovaj veliki senzor omogućuje prikupljanje većeg broja svjetlosnih informacija, što značajno poboljšava performanse kod slabog osvjetljenja. Objektiv s otvorom blende f/1,8 pomaže propuštanjem dovoljne količine svjetla, omogućujući snimanje oštarih i detaljnih fotografija, čak i u zahtjevnim svjetlosnim situacijama. Optička stabilizacija fotografija (OIS) osigurava da one ostanu jasne i bez zamućenja, čineći ovu kameru idealnom za snimanje kvalitetnih videozapisa i fotografija. Ultraširoka kamera (URL 5) je opremljena senzorom od 12 MP, veličine 1/2,55 inča, s pojedinačnim pikselima od 1,4 μm . Objektiv s otvorom blende f/2.2 omogućuje snimanje šireg vidnog polja, što je posebno korisno za pejzaže, grupne fotografije ili kadrove koji zahtijevaju širok obuhvat. Treća komponenta je telefoto kamera (URL 5), koja dolazi s 10 MP senzorom veličine 1/3,94 inča i pojedinačnim pikselima od 1,0 μm . Objektiv s otvorom blende f/2.4 omogućuje optičko zumiranje, što pruža mogućnost snimanja udaljenih objekata bez gubitka kvalitete slike. OIS također igra ključnu ulogu u telefoto kameri, osiguravajući stabilnost i jasnoću snimaka prilikom zumiranja, čime se smanjuje zamućenje i poboljšava kvaliteta fotografija i videozapisa uvećanih objekata (URL 5). Tri kamere rade zajedno kako bi pružile svestrano fotografsko iskustvo. Glavna kamera je odabir za svakodnevne fotografije i nudi najbolju ukupnu kvalitetu istih. Ultraširoka kamera idealna je za snimanje rastegnutih scena, a telefoto kamera omogućuje zumiranje detalja. Samsungov softver za kameru koristi tehnike za obradu fotografija i senzore za kombinaciju informacija s više kamera za poboljšanje konačne fotografije, posebno u uvjetima slabog osvjetljenja ili za značajke poput portretnog načina rada (URL 6).



Slika 3. Samsung Galaxy S23+ (URL 7)

3.2 Oprema

Od opreme je korišten rotirajući stol na kojem su bili postavljeni markeri kako bi se osigurala precizna rotacija objekta i omogućilo dosljedno snimanje iz svih kutova te crna pozadina kao što je prikazano na slici 4.

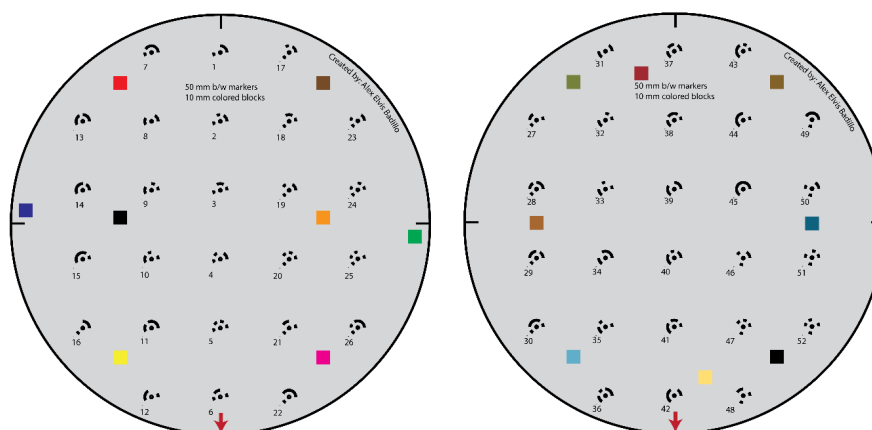


Slika 4. Rotirajući stol sa obilježenim markerima

Rotirajući stol je omogućio ravnomjerno snimanje bez potrebe za pomicanjem objekta, čime se smanjuje mogućnost pogrešaka (URL 8). Rotirajući je stol vrlo koristan alat u fotogrametriji za izradu 3D modela objekata jer nudi nekoliko prednosti. Povećava pokrivenost snimanja omogućujući cjelovit pogled na objekt. Rotiranjem objekta na okretnoj platformi mogu se snimiti fotografije iz svih kutova, osiguravajući da je cijela površina objekta dokumentirana. Ovaj sveobuhvatan skup fotografija pruža softveru više podataka za generiranje potpunijeg i točnijeg 3D modela. Snimanjem fotografija iz različitih perspektiva omogućuje se softveru prepoznavanje elemenata poput kutova, rubova i tekstura. Ove funkcije pomažu poboljšati točnost i robusnost procesa 3D rekonstrukcije. Okretni stol pojednostavljuje radni proces i osigurava dosljednost kontroliranim rotiranjem objekta, olakšavajući snimanje fotografija u preciznim intervalima. To eliminira potrebu za ručnim prilagodbama i osigurava dosljedno osvjetljenje kroz cijeli set fotografija, što pojednostavljuje fotogrametrijski radni proces (URL 8). Smanjuje zaklanjanja, otkrivanjem područja koja bi mogla biti skrivena iz jednog kuta, smanjujući mogućnost da dijelovi objekta budu zaklonjeni u konačnom 3D modelu. Rotirajući stolovi imaju dodatne prednosti poput mogućnosti automatizacije snimanja fotografija u specifičnim intervalima tijekom rotacije, što smanjuje ručni rad i osigurava dosljedne razmake između istih (URL 8). Zadržavanjem objekta nepomičnim i rotiranjem stola, moguće je postići bolji fokus i jasnoću na fotografijama, osobito kada se koristi fotoaparat s daljinskim okidačem (URL 9). Iako okretni stol nije uvijek neophodan, kao primjerice kod jednostavnih objekata s lako vidljivim elementima iz jednog kuta ili ravnih objekata koji ne zahtijevaju punu rotaciju za točnu rekonstrukciju, on je i dalje vrijedan alat u fotogrametriji. Omogućuje sveobuhvatno snimanje fotografija, poboljšano raspoznavanje elemenata i pojednostavljeni radni proces, što značajno doprinosi stvaranju visokokvalitetnih i preciznih 3D modela.

Markeri imaju dvije ključne funkcije: poboljšanje fotogrametrijskih orijentacija i preciznosti te postavljanje mjerila modela. Kao referentne točke, markeri omogućuju softveru precizniju fotogrametrijsku orijentaciju fotografija tijekom procesa 3D rekonstrukcije. Agisoft Metashape Pro je softver za fotogrametrijsku obradu slika i generiranje 3D modela koji može automatski prepoznati unaprijed definirane obrasce markera unutar fotografija, obično crno-bijele krugove ili kvadrate raspoređene u specifičnim konfiguracijama, a markeri prikazani na slici 5. sadrže obje vrste markera. Identificiranjem i usklađivanjem markera na više fotografija, Metashape preciznije utvrđuje prostorni odnos između fotografija, što rezultira detaljnijim i točnijim 3D

modelom (URL 3). Uz to, markeri se koriste za definiranje mjerila rekonstruiranog 3D modela, što je posebno korisno kada stvarne dimenzije objekta nisu poznate. Korisnici definiraju stvarnu veličinu korištenog markera. Primjerice udaljenost između suprotnih kutova kvadrata markera, a Metashape na temelju te veličine i njezine mjere unutar poravnanih fotografija izračunava razmjere cijelog 3D modela. Marker u Metashape-u funkcioniraju kao referentne točke koje poboljšavaju preciznost fotogrametrijske orijentacije fotografija i omogućuju skaliranje rekonstruiranog 3D modela.



Slika 5. Paleta markera (URL4)

Za pozadinu je korišten crni hamer papir kako bi se dobio bolji kontrast između pozadine i objekta, što je olakšalo softveru za fotogrametriju prepoznavanje rubova objekta i poboljšalo ukupnu kvalitetu 3D modela (URL 10). Postoji nekoliko razloga zašto se crna pozadina preferira za fotografiranje objekata u fotogrametriji za 3D rekonstrukciju. Ona poboljšava detekciju i uparivanje značajki. Smanjena neurednost omogućuje softveru da se usredotoči na sam objekt, eliminirajući neželjene detalje iz okoline (URL 10). Time se značajke poput kutova, rubova i tekstura preciznije identificiraju, što je ključno za rekonstrukciju 3D oblika objekta. Visok kontrast između crne pozadine i objekta olakšava softveru razlikovanje granica objekta i njegovih značajki od potencijalne pozadinske šumove, što je nužno za točnu rekonstrukciju. Također, crna pozadina smanjuje pogreške objekata. Eliminira problem prelijevanja boja s pozadine na objekt, što može zbuniti softver i dovesti do pogrešaka u rekonstrukciji stvarne boje i površinskih svojstava objekta (URL 10). Također, korištenje teksturiranih pozadina može

uzrokovati pogrešno uparivanje elemenata s pozadine sa elementima na objektu, što vodi do netočnosti u konačnom 3D modelu. Crna pozadina smanjuje mogućnost takvih pogrešnih uparivanja. Nadalje, crna pozadina olakšava naknadnu obradu. Tijekom naknadne obrade, često je potrebno izolirati objekt od pozadine radi daljnje obrade ili analize. Crna pozadina pojednostavljuje ovaj postupak jer softver može lako razlikovati objekt zbog jasnog kontrasta. Dodatno, iako je crna pozadina omiljena, jednobojna, odnosno neutralna pozadina također može biti učinkovita, posebno ako je teško postići potpuno crnu pozadinu. Za visoko reflektirajuće objekte, čak i crna pozadina neće potpuno eliminirati potrebu za dodatnim svjetlom tijekom fotografiranja (URL 10).

4. KARAKTERISTIKE OBJEKATA I UVJETA SNIMANJA

Za potrebe ovog istraživanja odabrano je šest objekata različitih metalnih tekstura i veličina. Objekti su fotografirani u različitim uvjetima kako bi se istražio utjecaj refleksije na izradu 3D modela. Snimani su mobilnim uređajem u profesionalnom/manualnom modu. Rezolucija svih fotografija bila je 50MP, što znači da je svaka fotografija snimljena glavnom kamerom. Postavke koje su se mijenjale tijekom snimanja uključivale su osjetljivost i ekspoziciju.

Za istraživanje su odabrani objekti s različitim stupnjevima refleksivnosti, uključujući visokoreflektivne površine poput poliranih metala te manje reflektivne, teksturirane metale. Fotografiranje je obuhvaćalo raznolike scenarije osvjetljenja, uključujući snimanje u zatvorenom prostoru s umjetnim osvjetljenjem, na otvorenom pri različitim vremenskim uvjetima te uz korištenje sjena kako bi se smanjile neželjene refleksije. Postavljanje svih objekata, osim skulpture, na rotirajući stol s markerima omogućilo je snimanje iz više kutova i olakšalo kasniju fotogrametrijsku obradu.

Posebna pozornost posvećena je promjenama postavki kamere poput ISO vrijednosti, koje su se kretale od 64 do 1600, te ekspozicije, koja se prilagođavala od 1/25 sekundi do 1/1000 sekundi, kako bi se postigla optimalna kvaliteta fotografija u različitim uvjetima osvjetljenja.

4.1 Augustinčićeva kupačica

Brončanu skulpturu „Kupačica“ izradio je Antun Augustinčić 1927. godine. Izrađena je u stilu koji su mnogi hrvatski umjetnici usvojili između dva svjetska rata, a inspirirana je art décoom. Ovaj utjecaj jasno se očituje u karakterističnom izrazu lica, položaju očiju, obliku usta te kovrčavoj kosi (URL 11). Građani ju od milja zovu „Gola Maja“ ili „Tužna Mara“.

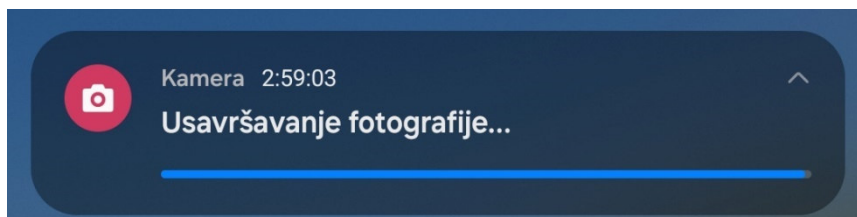


Slika 6. Augustinčićeva kupačica

Brončane skulpture, proslavljene po svojoj ljepoti i povijesnoj značajnosti, predstavljaju jedinstven izazov za 3D modeliranje koristeći fotogrametriju. Njihova sama karakteristika - sjajna metalna površina - može otežati proces stvaranja preciznih i detaljnih modela.

Snimljeno je ukupno 469 fotografija tijekom perioda od tri dana pod različitim vremenskim uvjetima, obuhvaćajući sunčane dane, oblačne uvjete te sumrak. Iako je skulptura cijeli dan u dubokom hladu, okoliš je utjecao na reflektivnost površine. Prvog dana, kada je bilo sunčano, snimljeno je 210 fotografija gdje se osjetljivost kretala u rasponu od 100ASA do 320ASA, a vrijeme ekspozicije bilo 1/500s. Drugog dana, snimljeno je 159 fotografija gdje se osjetljivost kretala od 100ASA do 1600ASA, dok je vrijeme ekspozicije bilo 1/1000. Trećeg dana, korišten je automatski mod sa rezolucijom od 50MP, te je snimljeno 110 fotografija. Nakon svakog snimanja automatskim modom, svaka fotografija je obrađena pomoću umjetne inteligencije, što je bilo vidljivo odmah nakon snimanja dok je uređaj obrađivao fotografije što je vidljivo na slici 7. Pregledavajući fotografije, moglo se primijetiti kako uređaj aktivno obrađuje iste, primjenjujući razne korekcije pomoću umjetne inteligencije. Korekcije koje je napravio nisu

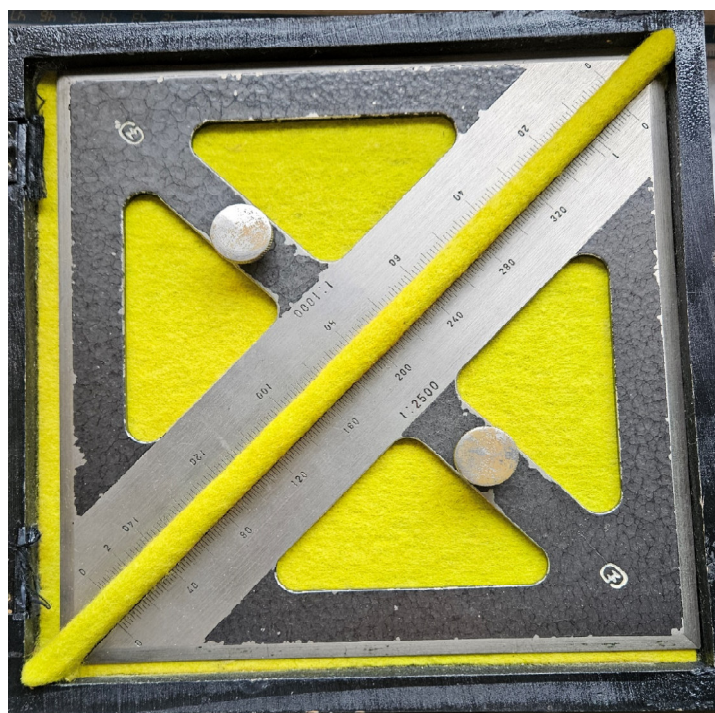
poznate. Osjetljivost se kretala u rasponu od 64ASA do 1200ASA, pri čemu je svaka fotografija imala različite postavke. Cilj snimanja u različitim uvjetima bio je fotografirati tamnije dijelove skulpture i izbjeći preveliki odsjaj na dijelovima koji su bili više osvijetljeni. Skulptura je bila fotografirana iz različitih kutova te se nastojalo izbjeći bijeli odsjaj pravilnim pozicioniranjem kamere. Ponekad čak i uz pomoć ruke kako bi se eliminirao direktni odsjaj stvarajući sjenu.



Slika 7. Usavršavanje fotografija

4.2 Majzekov trokut

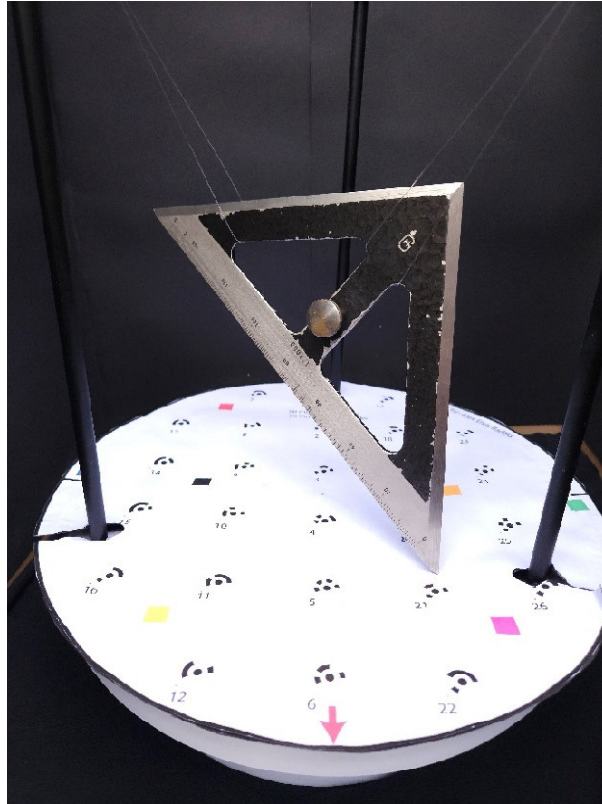
Par jednakokračnih metalnih trokuta s ugraviranom podjelom i noniusom pomoću kojih se na planu mogu kartirati pojedine točke ili s plana očitati njihove koordinate (URL 12). Indeks za očitavanje je ništična crtica pomoćne ljestvice. Majzekovi su trokuti nekada bili nezaobilazan alat u svijetu ručnog crtanja, a danas su zaboravljeni i napušteni u digitalno doba dizajna i inženjeringa. Ovi su trokuti poznati po svojoj preciznosti i jednostavnosti te su bili neophodan instrument za inženjere, arhitekte i umjetnike u periodu kada su crteži nastajali na papiru ili platnu. Međutim, s razvojem tehnologije i uvođenjem digitalnih alata, majzekovi su trokuti izgubili svoje mjesto u radu. Majzekovi trokuti, nekada simbol preciznosti i vještine, danas su često promatrani kao muzejski primjerci.



Slika 8. Set Majzekovih trokuta

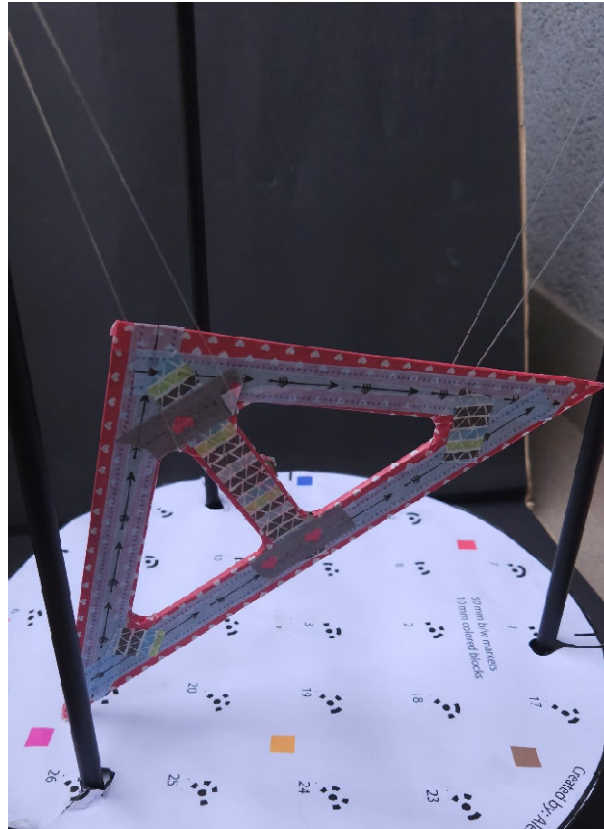
Set Majzekovih trokuta sastoji se od dva trokuta, svaki s drugačijim mjerilom. Mjerila su 1:2500 i 1:1000 te su izrađeni od metala. Nemaju glatku površinu zbog starosti i korištenja, a boja im se na nekim mjestima oljuštila, dok je držač zahrđao. Poleđina trokuta nije previše reflektivna jer je metal s brušen, ali ipak reflektira određenu svjetlost. Odabir ovog predmeta proizašao je iz njegovog oblika - tanak je i refleksija igra značajnu ulogu u izradi modela.

Trokut s mjerilom 1:1000 je snimljen na dva načina. Prvi način snimanja obavljen je na otvorenom prostoru za oblačnog vremena gdje je trokut bio obješen na stalak pomoću najlonskog konca, a stalak je bio postavljen na rotirajući stol koji je sadržavao markere. Snimljeno je 157 fotografija s fiksnom osjetljivošću od 200ASA i ekspozicijom od 1/1000s.



Slika 9. Prvi način snimanja Majzekovog trokuta

Drugo snimanje je obavljeno kao i prvo, ali u ovom slučaju trokut je bio oblijepljen šarenom trakom kako bi se dobio kontrast između pozadine i objekta. Snimljeno je 244 fotografija s fiksnom osjetljivošću od 250ASA i ekspozicijom od 1/500s.



Slika 10. Drugi način snimanja Majzekovog trokuta

4.3 Jabuka

Ukrasna jabuka ima prošaranu metalnu teksturu jednolike boje i potpuno reflektivne detalje, što je čini izazovnim predmetom za fotogrametrijsku rekonstrukciju zbog različitih reflektivnih svojstava. Postavljena je na rotirajući stol s markerima kako bi se osigurala preciznost u fotografiranju i spriječilo pomicanje. Vrh ukrasa, odnosno list i peteljka su izuzetno reflektivni, gotovo poput ogledala. Ovaj je predmet odabran s ciljem da se istraži hoće li se reflektivni dio uspjeti točno rekonstruirati, ako ostatak objekta nije toliko reflektivan.



Slika 11. Jabuka

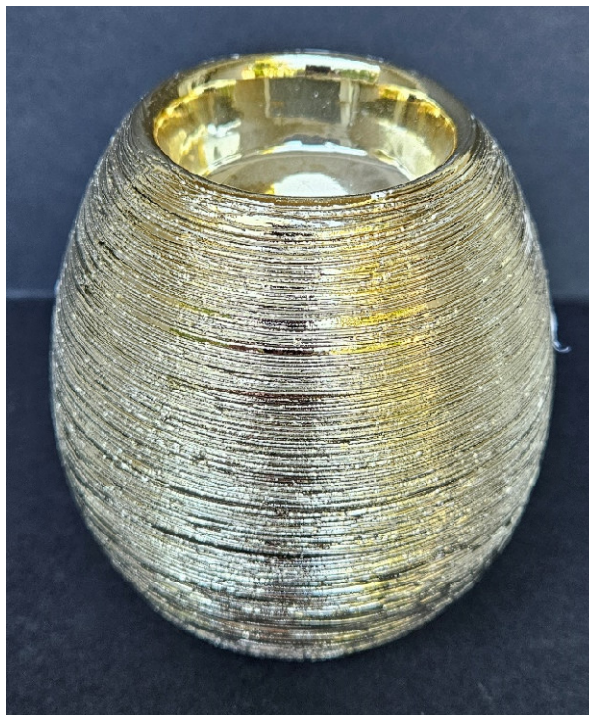
Snimljeno je 109 slika na otvorenom prostoru, s postavkama osjetljivosti od 100ASA i ekspozicijom od 1/1000 sekunde. Posebna pažnja posvećena je reflektivnom listu na vrhu jabuke. Tijekom snimanja korištena je ruka za stvaranje sjene kako bi se uklonio direktan odsjaj s reflektivnog dijela jabuke. Time se nastojalo minimizirati smetnje koje bi mogle otežati rekonstrukciju te se obratila pozornost na pažljivo namještanje položaja kamere.



Slika 12. Prikaz načina snimanja jabuke

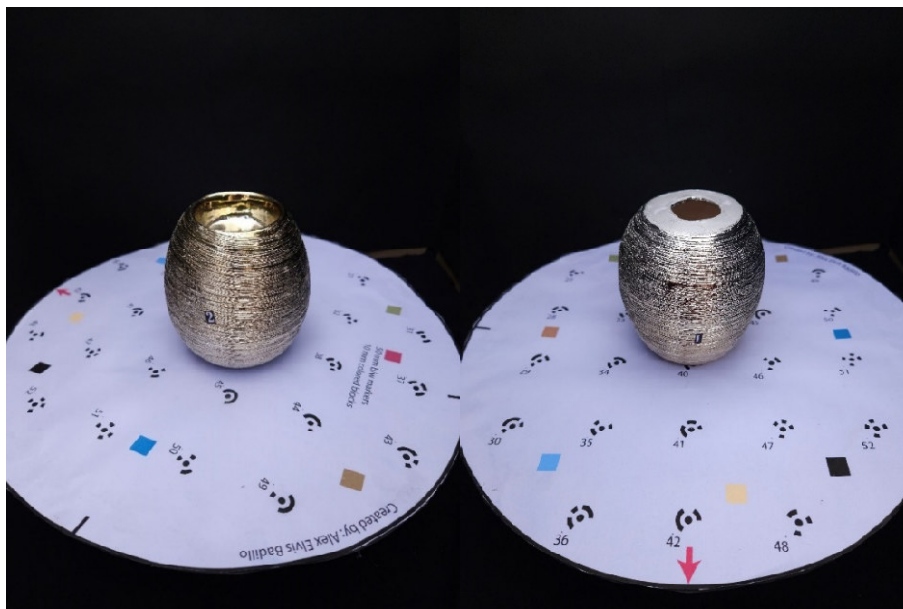
4.4 Svijećnjak

Svijećnjak je odabran zbog svoje jedinstvene teksture i boje. Izrađen je od prošaranog metala i originalno je srebrne boje, ali je odozgora šprican zlatnom bojom, što mu daje zanimljiv vizualni efekt. Odozgora je zlatne, a odozdo srebrne boje. Ovaj kontrast u boji i teksturi čini ga idealnim za istraživanje. Fotografiran je na način da su obje strane, gornja i donja, snimane zasebno kako bi se zabilježila potpuna slika objekta. Kako bi se olakšalo spajanje dviju polovica svijećnjaka dodane su četiri naljepnice s brojevima. Naljepnice služe kao referentne točke jer svijećnjak nema jasno vidljivih obilježja koja bi omogućila jednostavnu fotogrametrijsku orijentaciju, te osiguravaju točno i precizno spajanje gornje i donje polovice svijećnjaka u jednu cjelinu tijekom procesa 3D modeliranja.



Slika 13. Svijećnjak

Snimanje se odvijalo vani po oblačnom vremenu. Snimanje je obavljeno pod prirodnim svjetlom s postavkama osjetljivosti od 100ASA i ekspozicijom 1/1000 sekundi. Ukupno je snimljeno 106 fotografija donjeg dijela i 90 fotografija gornjeg dijela svijećnjaka.



Slika 14. Prikaz načina snimanja svijećnjaka

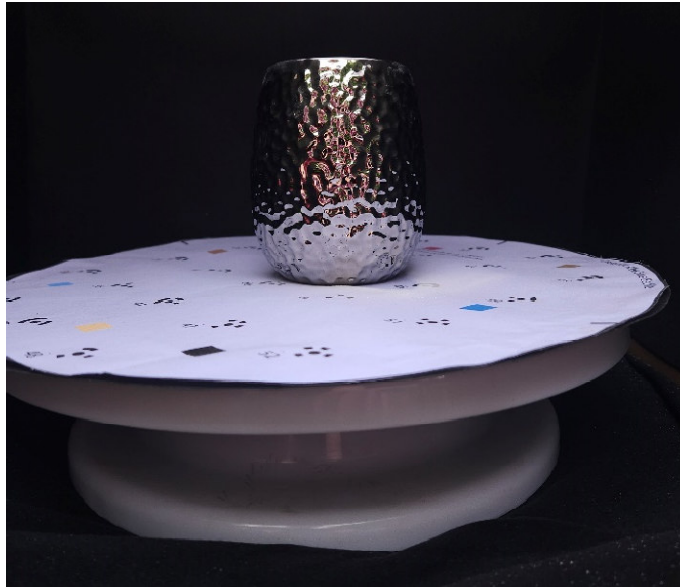
4.5 Vaza

Metalna vaza je odabrana zbog teksture. Iako ima uglačanu površinu, dovoljno je teksture da se jasno vidi njen oblik. Vaza je fotografirana na četiri različita načina.



Slika 15. Vaza

Prvi i referentni način snimanja se odvijao na otvorenom sa difuziranim svjetlom. Iznad vaze je postavljena bijela tkanina koja je ublažila direktnu svjetlost, omogućujući ravnomjerno osvjetljenje površine vaze. Snimljeno je 63 slike s postavkama: osjetljivost 100ASA, ekspozicija 1/500s. Drugi način je također bio vjerodostojan, ali sa više osvjetljenja i s postavkom osjetljivosti od 250ASA te je fotografirano 60 slika.

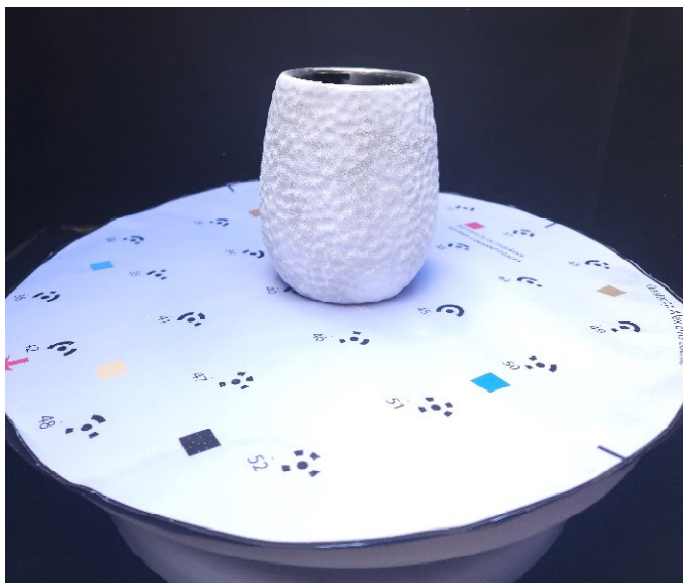


Slika 16. Prvi način snimanja vaze



Slika 17. Drugi način snimanja

Treći način snimanja proveden je vani po oblačnom vremenu gdje je vaza bila pošpricana bijelim puderom kako bi se smanjila reflektivnost površine i poboljšala detekcija teksture. Ukupno je snimljeno 60 fotografija. Puder je omogućio bolju vidljivost detalja na površini vaze, što je ključno za precizno 3D modeliranje.



Slika 18. Prikaz snimanja vaze sa puderom

Četvrti način snimanja bio je sličan trećem, ali je dio pudera obrisan, ostavljajući puder samo u udubinama vaze. Takav pristup omogućio je da se istaknu fine teksturalne razlike na površini vaze.



Slika 19. Prikaz snimanja vaze četvrtim načinom

4.6 Srce

Metalno je srce odabrano zbog svoje izuzetno glatke površine koja djeluje poput ogledala, pružajući idealan izazov za fotogrametrijsku rekonstrukciju. Postavljeno na rotirajući stol s markerima, crna pozadina igrala je ključnu ulogu u minimiziranju refleksija okoline na objekt. Cilj je bio ispitati kako softver reagira na vrlo reflektivne površine i otkriti najbolji način za izradu 3D modela takvih objekata.



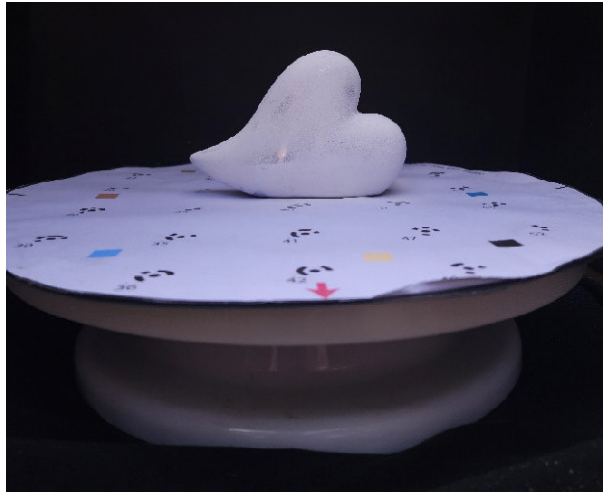
Slika 20. Metalno srce

Srce je snimano u različitim uvjetima kako bi se dobila što preciznija rekonstrukcija. Prvi način bio je referentni način, gdje je srce slikano bez ikakvih dodataka da bi se prikazalo kako softver stvara 3D model vrlo reflektivnog objekta u svom prirodnom stanju. Snimljeno je 79 fotografija pri osjetljivosti od 64ASA i ekspoziciji od 1/1000 sekunde. Ovaj referentni način omogućio je usporedbu s drugim metodama kako bi se utvrdila učinkovitost različitih pristupa u smanjenju refleksija i poboljšanju kvalitete 3D modela.



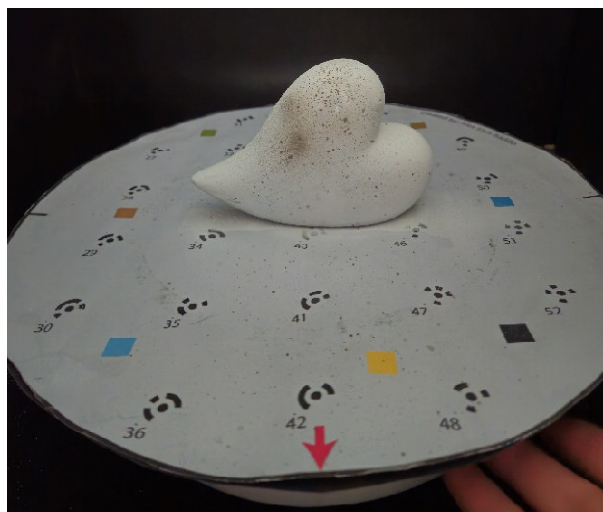
Slika 21. Referentni način snimanja

Drugi način snimanja bio je vani pod oblačnim vremenom i difuziranim svjetlom, gdje je predmet bio prekriven bijelim puderom. Puder je smanjio refleksije, omogućujući jasnije snimanje površinskih detalja. Ovaj set uključivao je 63 snimke s postavkama fiksnom osjetljivošću od 100ASA i ekspozicijom od 1/1000 sekunde.



Slika 22. Snimanje objekta sa puderom

Treći način snimanja odvijao se u zatvorenom prostoru tijekom oblačnog vremena. Srce je bilo prekriveno bijelim puderom, a smeđi puder korišten je za prskanje malih točkica, stvarajući više teksture i šarenila za lakšu fotogrametrijsku orijentaciju unutar softvera. Ukupno je snimljeno 126 fotografija u automatskom modu, s promjenjivim postavkama osjetljivosti i ekspozicije za svaku sliku. Mobilni uređaj je svaku sliku obradio koristeći umjetnu inteligenciju, što je bilo vidljivo neposredno nakon snimanja, kao kod kupačice.



Slika 23. Snimanje sa prošaranim puderom

5. PROCESIRANJE I OBRADA PODATAKA

5.1 Općenito o korištenim softwerima

Agisoft Metashape Pro (URL 13) je profesionalni softver dizajniran za obradu digitalnih fotografija korištenjem fotogrametrijskih tehnika. Ističe se 3D rekonstrukcijom, odnosno snimanjem niza digitalnih fotografija objekata ili scena i generiranjem 3D modela prikladnog za vizualizaciju, mjerenje, analizu i 3D ispis. Ključne funkcionalnosti uključuju fotogrametrijsku obradu za izdvajanje 3D informacija iz 2D fotografija, generiranje gustih točaka koji predstavljaju milijune 3D točaka na površini i stvaranje digitalnih modela visine (DEM) i digitalnih modela površine (DSM). Softver podržava georeferenciranje, odnosno pohranjivanje podataka o lokaciji 3D modela u stvarnom svijetu, a koristi zemaljske kontrolne točke (GCP) ili zapis leta drona (URL 13).

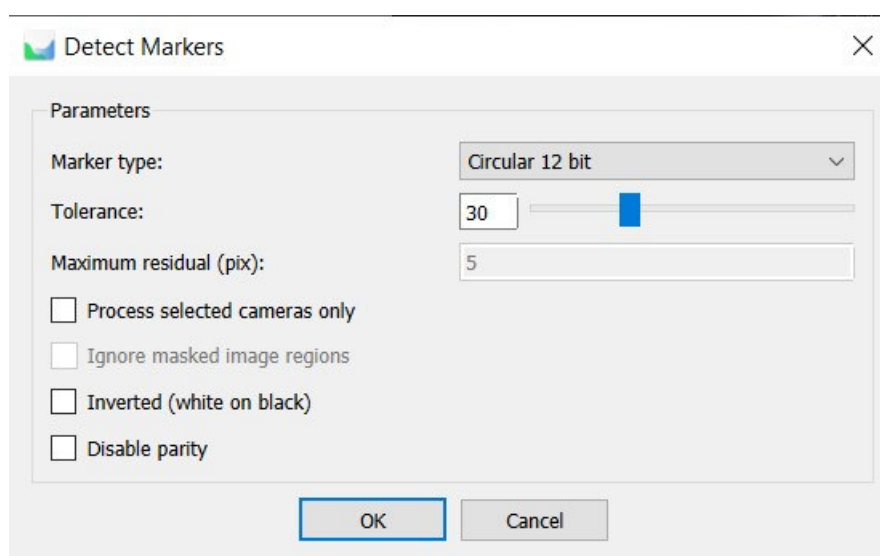
Metashape Pro (URL 13) nudi dodatne značajke kao što je podrška za LiDAR podatke za poboljšanu 3D rekonstrukciju, automatsko pohranjivanje infrastrukturne dokumentacije i napredne alate za mjerenja i analizu. Također podržava skupnu obradu i Python skriptiranje za automatizaciju, što ga čini idealnim za rukovanje više skupova podataka istovremeno. Softver naširoko koriste profesionalci u kartiranju dronovima, dokumentaciji kulturne baštine, vizualnim efektima i geografskim informacijskim sustavima (GIS). Iako je moćan i svestran, podržava različite formate ulaznih podataka i nudi napredne analize i značajke automatizacije, može biti skup u usporedbi sa softverom za hobiste i ima strmiju krivulju učenja za početnike zbog svojih profesionalnih funkcionalnosti (URL 13).

5.2 Obrada podataka

Svi objekti su obrađivani na isti način u Agisoft Metashape-u, koristeći različite postavke. Postupak obrade uključivao je učitavanje fotografija, pregledavanje i uklanjanje nepotrebnih fotografija, maskiranje, fotogrametrijska orijentacija fotografija, izgradnju oblaka točaka, izgradnju oplošja, kalibraciju boje te generiranje teksture.

Prije početka bilo koje operacije potrebno je odrediti koje će se fotografije koristiti kao izvor za fotogrametrijsku obradu. Korištenjem naredbe *Add Photos*, poveznice na slikovne datoteke dodaju se u sadržaj projekta kako bi se označilo koje će slike biti korištene za daljnju obradu. Točke oblaka i tekstura također će imati dubinu boje koja odgovara originalnim fotografijama,

pod uvjetom da su izvezene u formatima koji podržavaju 8-bitne boje (URL 14.). Idući je korak bilo otkrivanje markera naredbom *Detect Markers* na fotografijama koje ih sadrže. Na slici 24 je prikazano koji parametri su odabrani za uspješno detektiranje markera. One markere koje program nije automatski prepoznao, na svakoj su fotografiji dodani ručno. Da bi objekti bili u pravoj veličini, na njima se moraju vršiti mjerenja, odnosno potrebno je dodati mjerilo. Udaljenost između dva kružna markera je 5 cm pa je za definiranje skale bilo potrebno postaviti udaljenost od 5 cm između bilo koja dva susjedna markera, čime se objektu dodaje mjerilo. Budući da kupačica nije imala markere, izmjerena joj je baza te je pomoću ručno dodanih točaka određeno mjerilo.



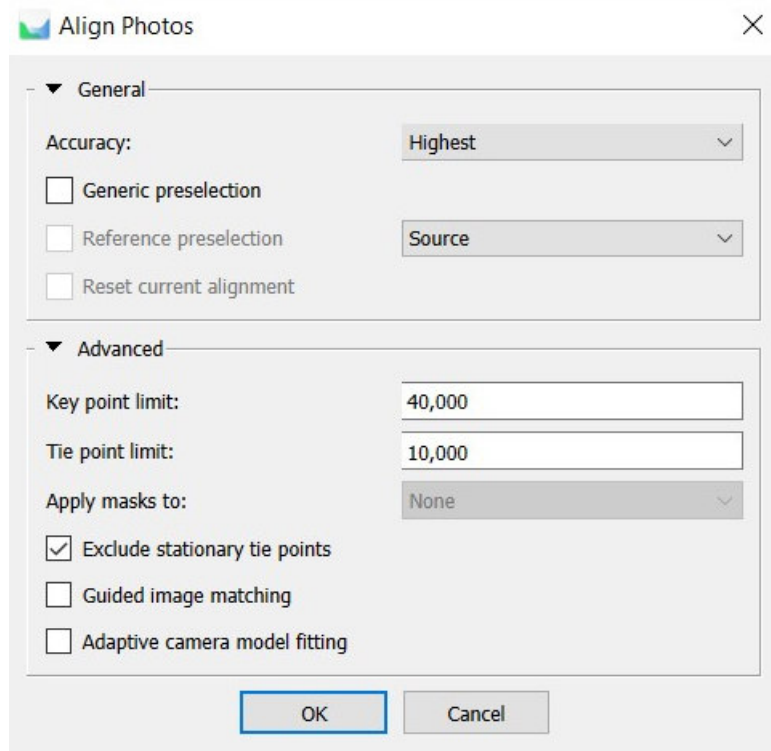
Slika 24. Parametri za pronalazak markera

Nad nekim objektima je provedeno maskiranje. Maskirana područja mogu se isključiti tijekom fotogrametrijska orijentacija fotografija, te se maskirani dijelovima fotografija ne uzimaju u obzir prilikom procjene pozicija kamere (URL 14.). Maskiranje je provedeno na način da su isključena sva okolna područja koja nisu objekt snimanja ili markeri kao što je prikazano na fotografiji.

Prvi korak u obradi je fotogrametrijska orijentacija fotografija, odnosno naredba *Align Photos*. Softver analizira svaku fotografiju kako bi pronašao preklapajuća područja između njih pomoću algoritama za otkrivanje ključnih značajki unutar tih preklapajućih dijelova. Na taj način pokušava povezati jednake elemente na različitim fotografijama (URL 14.). Detekcija markera

igra važnu ulogu u poboljšanju točnosti i učinkovitosti fotogrametrijske orijentacije fotografija jer markeri pružaju jasne referentne točke unutar fotografija, što olakšava identifikaciju i podudaranje između njih. Za razliku od prirodnih značajki, markere karakterizira visok kontrast i jedinstveni kodovi, čime se minimizira mogućnost zbunjenosti i neusklađenosti. Zato su markeri korisni za objekte s glatkim ili nedostatnim teksturama, jer pružaju ključne referentne točke koje softver može koristiti za uspješnu fotogrametrijsku orijentaciju. Na slici 25 su prikazani korišteni parametri za fotogrametrijsku orijentaciju fotografija. Postavke točnosti omogućuju dobivanje preciznijih podataka o položaju kamere. Dok softver pri visokoj točnosti radi s fotografijama u originalnoj veličini, najviša postavka točnosti povećava fotografiju za faktor 4 (URL 14).

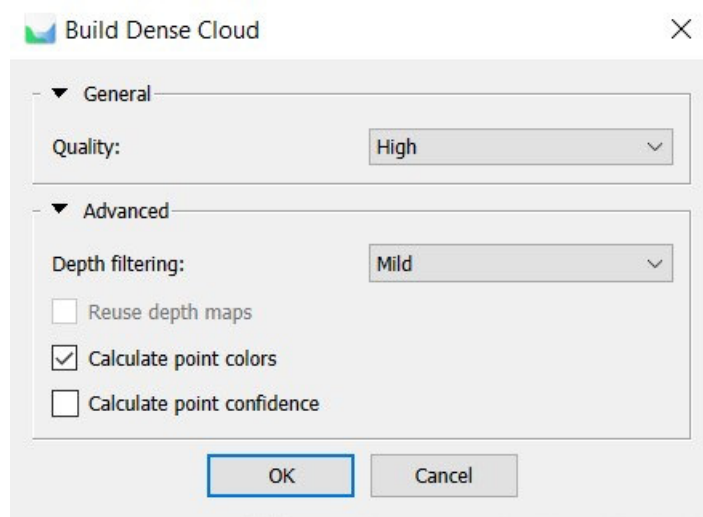
Key point limit označava gornju granicu broja značajki na svakoj slici koje će biti uzete u obzir tijekom trenutne faze obrade i taj broj je postavljen na 40 000. Postavljanje što manje vrijednosti omogućuje programu da pronađe što više ključnih točaka, ali to može rezultirati velikim brojem manje pouzdanih točaka (URL 14). *Tie point limit* označava gornju granicu broja podudarnih točaka za svaku fotografiju. Postavljanje vrijednosti na nulu znači da se neće primijeniti nikakvo filtriranje veznih točaka (URL 14). *Exclude stationary tie points* isključuje statične vezne točke na više različitih fotografija. Ova opcija omogućuje poravnanje bez skupova podataka sa statičnom pozadinom kao što je u slučaju rotirajućeg stola s fiksnom kamerom i jednoličnom pozadinom. Omogućavanje ove opcije također pomaže eliminirati lažne vezne točke povezane sa senzorom kamere (URL 14). Nakon uspješne fotogrametrijske orijentacije fotografija izlazni podatci su vezne točke.



Slika 25. Parametri za fotogrametrijsku orijentaciju fotografija

Idući korak je zgušnjavanje veznih točaka pomoću naredbe *Build Dense Cloud* koji se temelji na dubinskim kartama izračunatim pomoću gustog stereo podudaranja (URL 14.). Dubinske se karte izračunavaju za parove fotografija koje se preklapaju, uzimajući u obzir njihove relativne vanjske i unutarnje parametre orijentacije procijenjene pomoću izjednačenja fotogrametrijskog snopa (URL 14). Višestruke dubinske karte generirane za svaku kameru spajaju se u kombiniranu dubinsku kartu, koristeći višak informacija u preklapajućim regijama za filtriranje pogrešnih dubinskih mjerenja. Kombinirane dubinske karte generirane za svaku kameru pretvaraju se u parcijalne oblake točaka, koji se zatim spajaju u konačni oblak točaka s dodatnim korakom filtriranja šuma primijenjenim u preklapajućim regijama. Normale u parcijalnim oblacima točaka izračunavaju se pomoću prilagodbe ravnine susjedstvu piksela u kombiniranim dubinskim kartama, a boje se uzimaju iz fotografija (URL 14). Na slici 26 se nalaze odabrani parametri. *Quality* određuje željenu kvalitetu generiranja dubinskih karata, a za potrebe ovog istraživanja korišteni su i visoke i niske kvalitete (URL 14). Više postavke kvalitete se koriste za dobivanje detaljnije i preciznije geometrije. Zbog određenih faktora, poput šumovitih ili loše fokusiranih fotografija, mogu postojati odstupanja među točkama. Kod objekata koji imaju

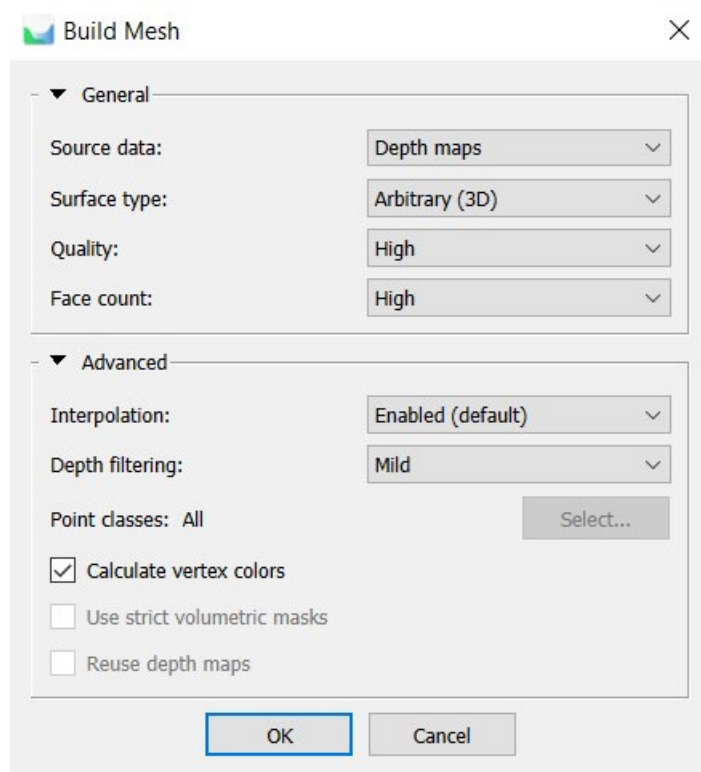
važne male detalje koji su prostorno istaknuti, postavlja se blagi način filtriranja dubine kako bi se izbjeglo da važni detalji budu označeni kao odstupanja, a kod objekata koji nemaju značajne detalje koristi se agresivni mod. Kod objekata koji imaju mješavinu koristio se *Moderate* mod koji pruža rezultate između blagog i agresivnog (URL 14). Izlazni podatci ove naredbe su oblak točaka te dubinske karte, koje se dalje mogu uređivati i koristiti za daljnji rad.



Slika 26. Parametri za izradu gustog oblaka točaka

Nakon izrađenog oblaka točaka sljedeći korak je izrada oplošja pomoću naredbe *Build Mesh* čiji parametri su prikazani na slici 27. Vezne točke moguće je koristiti za brzo generiranje 3D modela temeljenog isključivo na oblaku poveznica, dok postavke dubinskih karata omogućuju učinkovitije korištenje svih informacija iz ulaznih fotografija. Manje je opterećenje na resursima u usporedbi s rekonstrukcijom temeljenog na oblaku točaka. *Arbitrary surface type* koristi se za zatvorene objekte, poput kipova ili zgrada, obzirom da su svi objekti zatvorenog tipa, ova postavka je korištena za sve objekte (URL 14). *Quality* određuje željenu kvalitetu rekonstrukcije dubinskih karata, a *Depth filter* kontrolira filtriranje šuma u sirovim dubinskim kartama (URL 14). Izrađuje se pomoću filtera povezanih komponenti koji djeluje na segmentirane dubinske karte na temelju dubinskih vrijednosti piksela. Postavke filtriranja kontroliraju maksimalnu veličinu povezanih komponenti koje filter odbacuje. *Quality* i *Depth filter* može se koristiti pod uvjetom da su dubinske karte odabrane kao izvorna opcija, s tim ako se prethodni korak nije preskočio dubinske karte se nisu ponovno generirale, već su se samo

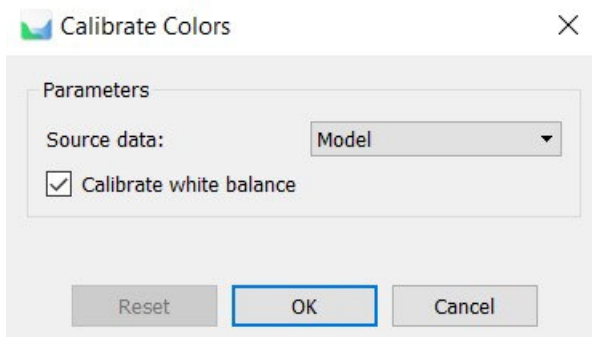
iskoristile postojeće. *Facecount* određuje maksimalan broj poligona u konačnom modelu (URL 14). Predložene vrijednosti (visoka, srednja, niska) predstavljaju optimalan broj poligona za model odgovarajuće razine detalja. Za svaki model korištena je visoka opcija vrijednosti. S omogućenom interpolacijom, interpoliraju se neka područja unutar kruga određenog radijusa oko svake točke tzv. oblaka točaka (URL 14). Kao rezultat, neke rupe mogu biti automatski pokrivena, ali još uvijek mogu postojati rupe na modelu koje treba popuniti u fazi naknadne obrade.



Slika 27. Korišteni parametri za izradu oplošja

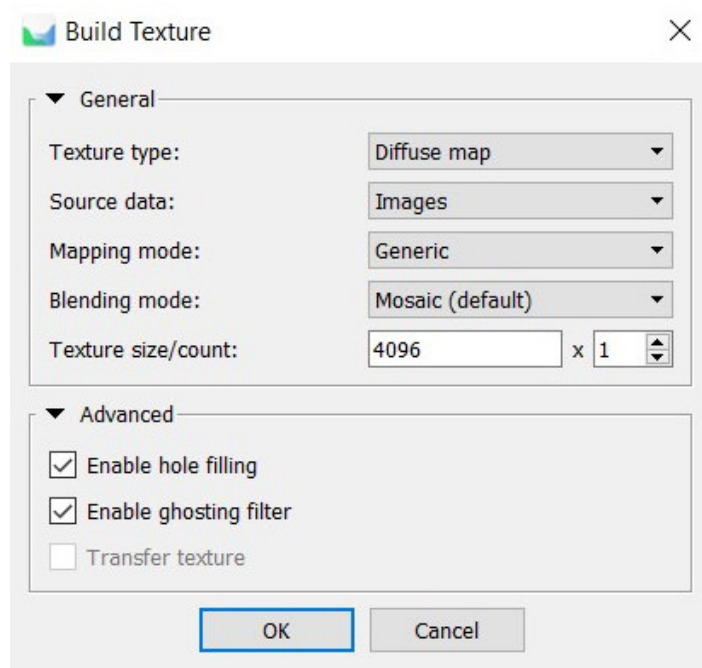
Nakon dobivenog 3D modela moguće je dodati i teksturu. Ako su se uvjeti osvjetljenja značajno mijenjali tijekom snimanja kao što je u slučaju kupačice, koja je snimana u tri različita svjetlosna uvjeta, koristi se opcija kalibracije boja prije postupka izrade teksture koja pomaže u izjednačavanju svjetline i balansa bijele boje. Moguće je odabrati jednu od dvije opcije kao ulazne podatke, a to su vezne točke i model. Za objekte je odabrana opcija *Model*, koja za izvorne podatke koristi oplošje, prikazana na slici 28 jer osigurava preciznije rezultate. Da bi

se koristila ova opcija, modeli su morali biti dovoljno detaljni. S obzirom na to da su svi modeli izrađeni u visokoj kvaliteti, ova opcija je bila prikladan izbor.



Slika 28. Parametri kalibracije boja

Za generiranje teksture koristila se opcija *Build Texture* čiji su odabrani parametri vidljivi na slici 29. Kao tip teksture odabrana je opcija *Diffuse map* te je ona osnovna tekstura koja pohranjuje boje površine modela (URL 14). Izvor podataka mogu biti fotografije za izradu karte boja ili drugi model za izradu normalnih i mapa zasjenjenja. Način mapiranja određuje kako će tekstura objekta biti uklopljena u teksturni atlas (URL 14). Odabrana je opcija za generički način koji omogućava parametizaciju za bilo koju geometriju (URL 14). *Blending mode* određuje kombiniranje boja piksela iz različitih kamera, s opcijama poput mozaika, prosjeka, maksimalnog ili minimalnog intenziteta te onemogućenog načina (URL 14). Veličina teksture određuje širinu i visinu teksturnog atlasa u pikselima, a broj stranica određuje broj datoteka za izvoz teksture, omogućujući veću rezoluciju završne teksture modela (URL 14). Dodatne opcije uključuju ispunjavanje rupa, dok je *ghosting filter* koristan za tanke strukture kao što je majzekov trokut.

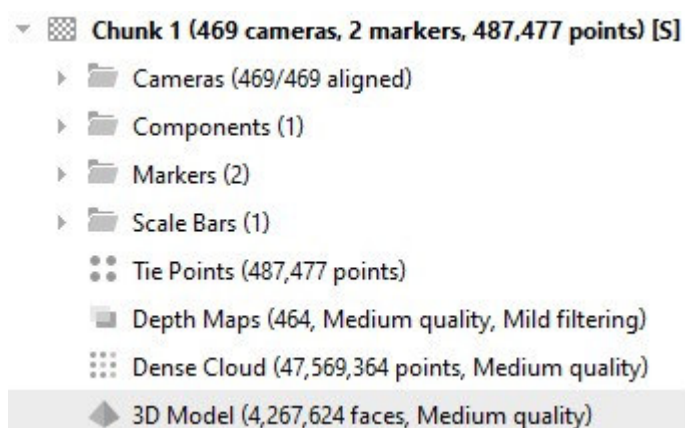


Slika 29. Parametri za izradu teksture

6. ANALIZA REZULTATA

6.1 Augustinčičeva kupačica

Svih 469 fotografija kupačice uneseno je u program. U podnožju je izmjereno 0.52 m te je pomoću tih točaka postavljeno mjerilo kako bi se obavilo precizno mjerenje modela. Početni model izrađen je u srednjoj kvaliteti, a na temelju tog modela stvorene su maske. One su potom dodatno popravljene na mjestima gdje model nije ispio najbolje, kako bi se osigurala veća točnost prilikom izrade konačnog modela u visokoj kvaliteti. Na slici 30 je prikazano koliko se točaka generiralo pri svakom koraku.

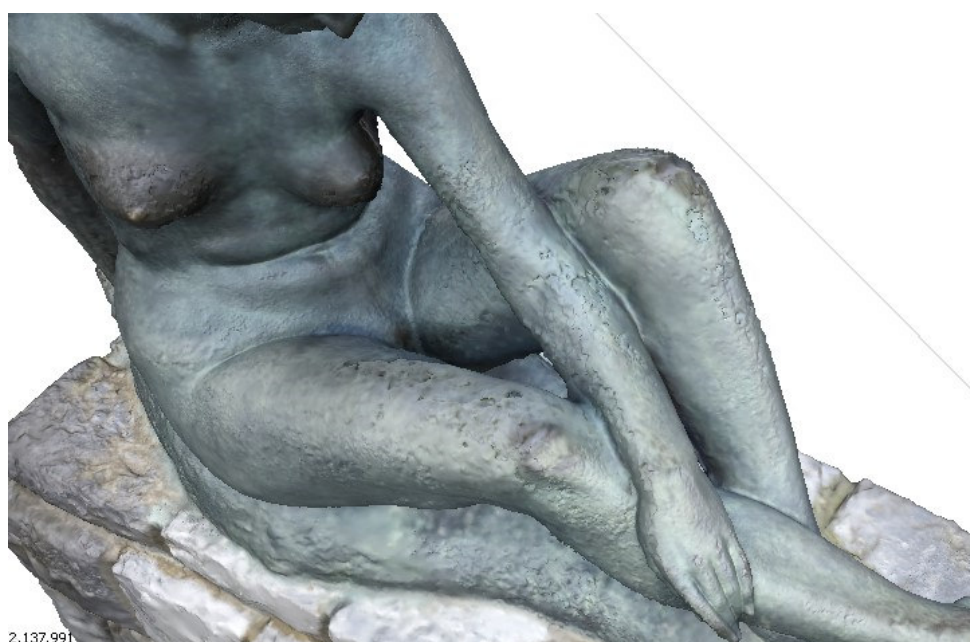


Slika 30. Izlazni rezultati kupačice izrađenoj u srednjoj kvaliteti

Za ovaj model nije rađena kalibracija boje ni tekstura jer je glavna svrha bila dobiti kvalitetne maske i identificirati potencijalno problematična područja na skulpturi. U početnom su modelu problematična bila stopala, središnji dio kipa, posebno lijeva noga, lijeva ruka te dio desnog bedra. Također, uočen je i problem s rupom koja se nalazi na tjemenu. Dijelovi kupačice koji nisu izlizani, odnosno koji su oksidirali, ispali su dobro u modelu, dok su dijelovi koji su izlizani pokazali tendenciju prema stvaranju rupičastih područja. Ovi rezultati su koristili kao osnova za daljnju analizu i poboljšanja modela. Uz to, izrađeni su modeli s i bez maskiranja te su dodani dodatni parametri koji omogućavaju bolju generaciju konačnog modela. Konačno oplošje modela je izrađeno na temelju dubinskih karata, što je omogućilo precizniju rekonstrukciju površine.



Slika 31. Kupačica izrađena u srednjoj kvaliteti



Slika 32. Bliži prikaz problematičnih područja














Slika 33. Stopalo kupačice izrađene u srednjoj kvaliteti

Proces popravka maski uključivao je pažljivo ručno uređivanje kako bi se osigurala točnost u najkritičnijim područjima. Najviše vremena posvetilo se popravljanju maski na stopalu i koljenu, gdje su se nalazile najveće nepravilnosti. Na desnoj je ruci također bilo potrebno ručno popraviti masku, ali u manjem obimu. Na slici 34 je prikazano kako je maska generirana te na koji način su se ručno popravljala problematična područja maskiranja. Nakon popravka, maske su korištene za ponovnu izradu modela u visokoj kvaliteti. Na taj je način osigurano da su svi ključni detalji pravilno uhvaćeni i rekonstruirani.



Slika 34. Popravak generirane maske

Generiranje oplošja provodilo se na dva načina: na temelju oblaka točaka i na temelju dubinskih karata. U oba slučaja svaki korak generiran je u visokoj kvaliteti. Konačni dobiveni oblak točaka je u oba slučaja pročišćen od viška okolnih točaka koje pripadaju okolini, a ne kipu. Kod izrade oplošja na temelju oblaka točaka pročišćavanje je bitan korak, ali kod izrade na temelju dubinskih karata nije ključno. Na slici 35 je prikazan broj generiranih točaka za svaku od metoda. Model izrađen na temelju dubinskih karata prošao je kroz kalibraciju boja, dok objekt generiran *dense cloudom* nije. Kalibracija boja omogućila je postizanje ujednačenih boja i svjetline na modelu izrađenom dubinskim kartama, što je poboljšalo njegovu vizualnu kvalitetu.

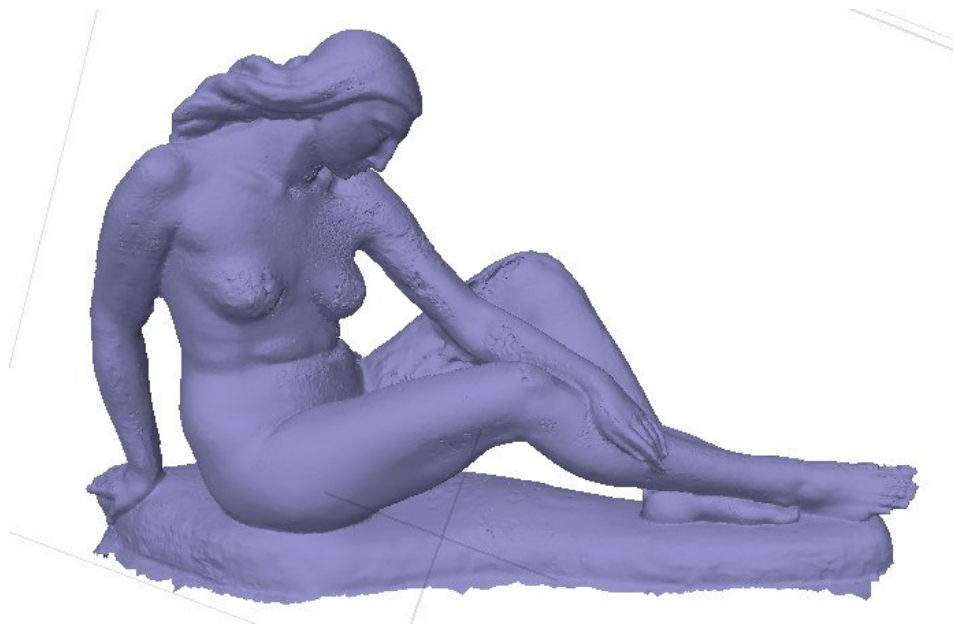
- ▼  **Depth maps (464 cameras, 4 markers, 577,996 points)**
 - ▶  Cameras (462/464 aligned)
 - ▶  Components (1)
 - ▶  Markers (4)
 - ⋮ Tie Points (577,996 points)
 -  Depth Maps (459, High quality, Mild filtering)
 - ⋮ Dense Cloud (73,622,550 points, High quality)
 - ◆ 3D Model (4,069,131 faces, High quality)
- ▼  **Dense Cloud (464 cameras, 4 markers, 577,996 points) [S]**
 - ▶  Cameras (462/464 aligned)
 - ▶  Components (1)
 - ▶  Markers (4)
 - ▶  Scale Bars (1)
 - ⋮ Tie Points (577,996 points)
 -  Depth Maps (459, High quality, Mild filtering)
 - ⋮ Dense Cloud (73,615,734 points, High quality)
 - ◆ 3D Model (4,722,013 faces, High quality)

Slika 35. Tijek izrade modela u visokoj kviliteti

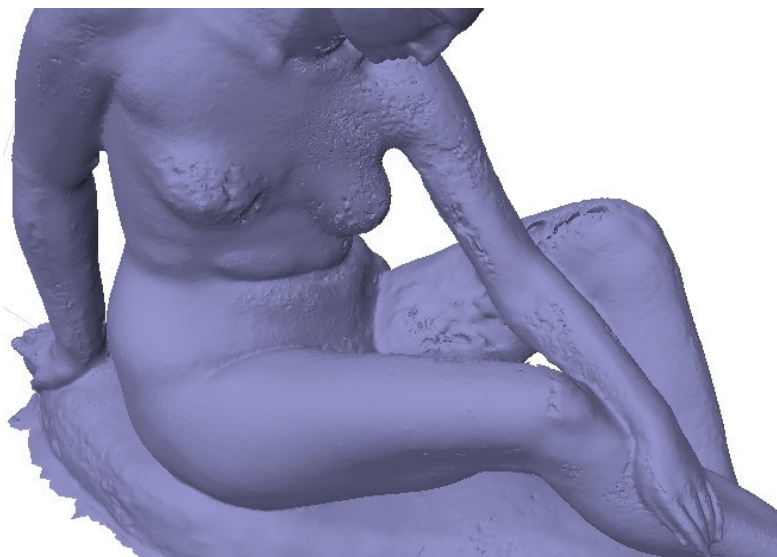


Slika 36. Pročišćeni oblak točaka kupačice u visokoj kviliteti

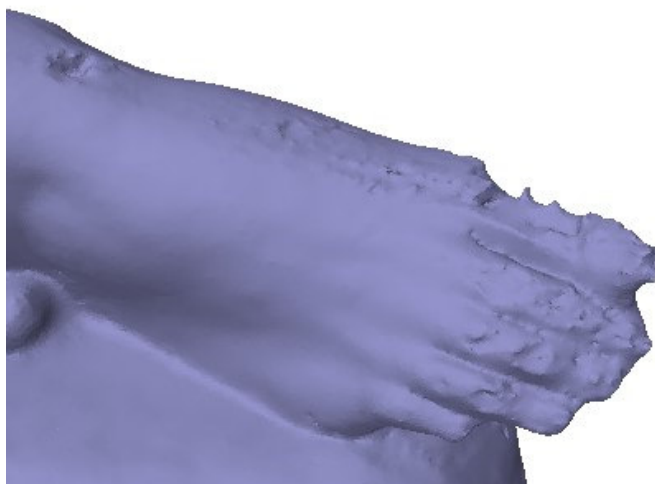
Kod modela izrađenog pomoću dubinskih karata, problematični su dijelovi stopalo, lijevo koljeno i desna ruka i dalje prisutni, ali u puno manjoj mjeri nego kod modela izrađenog u srednjoj kvaliteti. Tjeme u ovom modelu nema rupa, što predstavlja značajan napredak u usporedbi s prethodnim verzijama. Gledanjem iz daljine, model se na prvu čini vjernim prikazom stvarnog objekta, no detaljnijim pregledom vidljive su nepravilnosti koje narušavaju njegovu preciznost. Ipak, ovi su nedostaci znatno manji nego kod modela izrađenih u nižoj kvaliteti. To pokazuje važnost upotrebe visokokvalitetnih dubinskih karata za točnost rekonstrukcije.



Slika 37. Model izrađen pomoću dubinskih karata

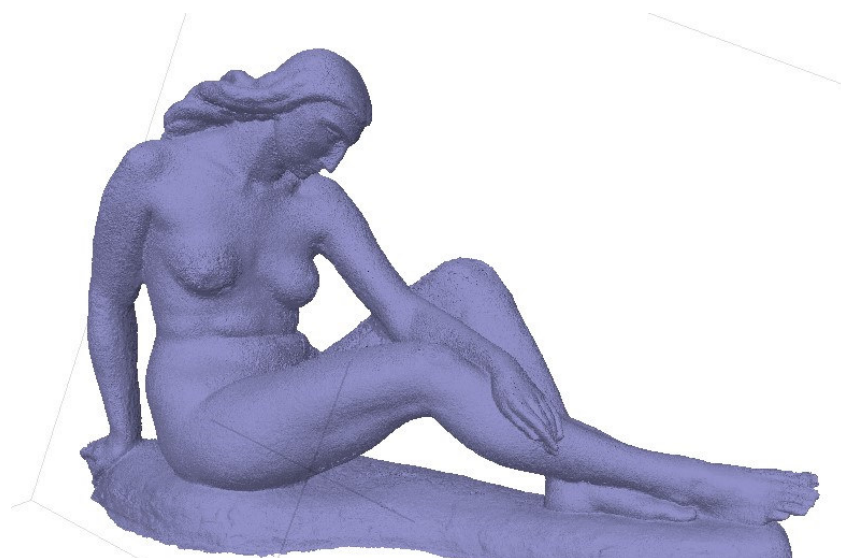


Slika 38. Model izrađen pomoću dubinskih karata

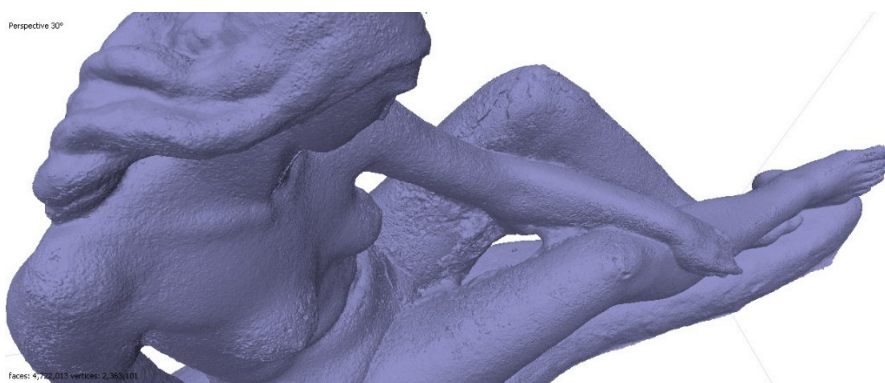


Slika 39. Soplo izrađeno pomoću dubinskih karata

Model izrađen na temelju oblaka točaka pokazao se znatno lošije kvalitete u usporedbi s modelom baziranim na dubinskim kartama. Već iz daljine, na prvi pogled vidljive su znatnost i veće nepravilnosti na ranije identificiranim problematičnim područjima, kao što su stopalo, lijevo koljeno i desna ruka. Ove nepravilnosti dodatno potvrđuju superiornost metode dubinskih karata u izradi preciznijih i detaljnijih modela.



Slika 40. Model izrađen na temelju oblka točaka

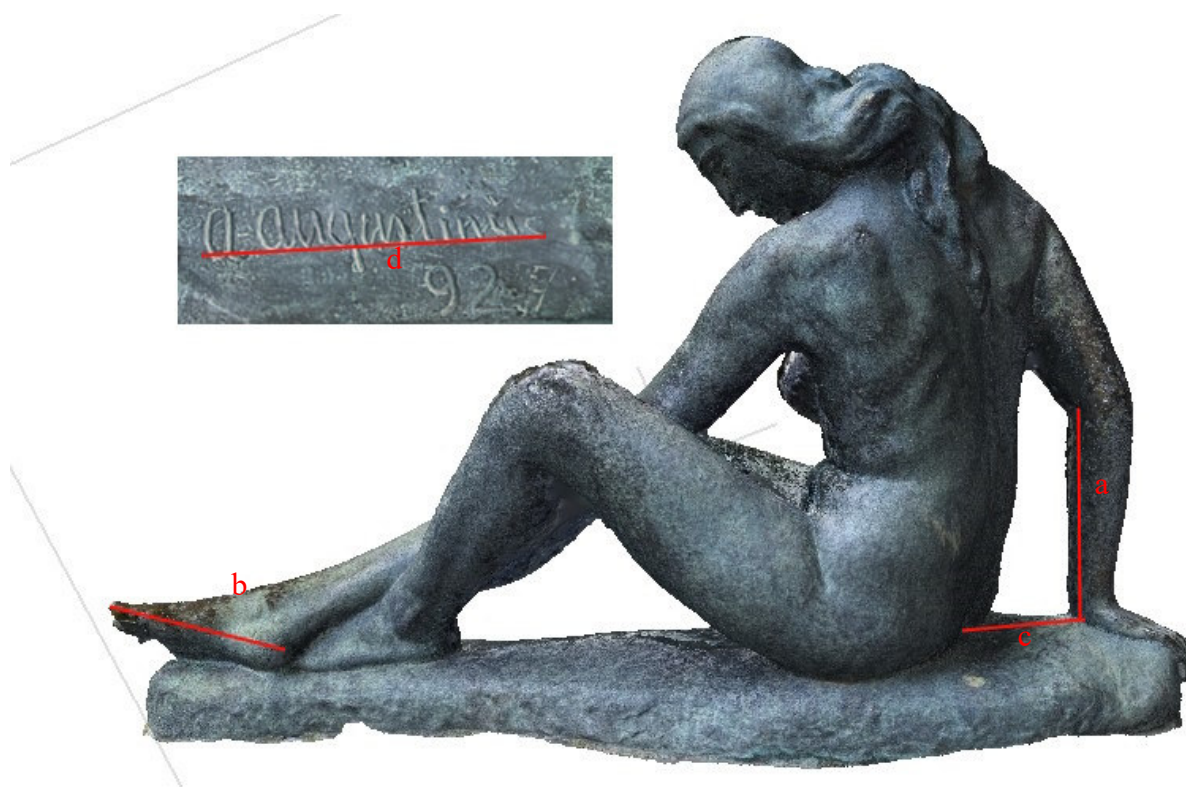


Slika 41.. Model izrađen na temelju oblka točaka

U tablici 1 prikazane su mjere koje su izmjerene na terenu i na modelima. Na slici 42. su jasno označene duljine koje su se mjerile, omogućujući usporedbu između stvarnih i modelskih mjerenja. Zaokružene daljine na centimetar odgovaraju stvarnom stanju na terenu. Pogreška mjerila koje je prikazano na slici 43. iznosi 0. Zbog svog nepravilnog oblika, kupačicu je teže točno izmjeriti, što dodatno otežava preciznost mjerenja. Unatoč tim izazovima, modeli su omogućili dovoljno točne rekonstrukcije za usporedbu s terenskim mjerenjima, pružajući korisne uvide u točnost i preciznost korištenih metoda.

Tablica 1. Usporedba mjerenih duljina kupačice

Položaj	Stvarna duljina (cm)	Dubinska karta (cm)	Dense cloud (cm)
Podlaktica desne ruke (a)	27.5	28.3	28.1
Dužina desnog stopala (b)	27.5	25.6	26.3
Udaljenost između stražnjice i desne ruke (c)	17.00	16.9	16.8
Potpis (d)	10.00	9.97	9.45



Slika 42. Prikaz mjerenih duljina

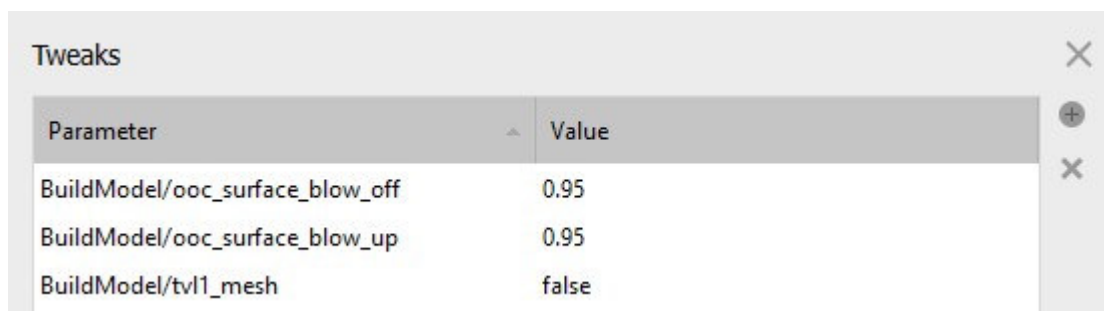
Scale Bars	Distance (m)	Accuracy (m)	Error (m)
<input checked="" type="checkbox"/> point 1_point 3	0.520000	0.001000	-0.000000
Total Error			
Control scale bars			0.000000
Check scale bars			

Slika 43. Parametri mjerila

Generiranje maske pokazalo se ključnim korakom u procesu, ali inicijalne maske sadržavale su pogreške koje je bilo potrebno ručno ispraviti na problematičnim mjestima. Na taj je način utrošeno puno manje vremena pri generiranju maski nego da se svaka fotografija ručno maskirala. Najviše popravaka bilo je na stopalu i koljenu, a manje na desnoj ruci. Sve ove faze rada pridonijele su boljem razumijevanju i procjeni metoda korištenih u procesu digitalne rekonstrukcije modela. Analizom rezultata jasno je da korištenje visokokvalitetnih dubinskih karata u kombinaciji s pažljivim maskiranjem i ručnim korekcijama može značajno poboljšati točnost i detaljnost digitalnih modela, pružajući precizne i pouzdane podatke za daljnju analizu i korištenje.

6.2 Majzekov trokut

Majzekov trokut je u svim slučajevima generiran u visokoj kvaliteti te su za svaki model dodana specifična podešenja koji su prikazani na slici 44. Podešenja su korištena za generiranje tankih objekata. Kod prvog načina podatci su obrađeni bez korištenja maski, oblak točaka nije uređivan, a model se bazirao na dubinskim kartama. Na modelu su jasno vidljive deformacije i nedostaje pola trokuta, što je rezultiralo brojnim rupama. Iako trokut u oblaku točaka izgleda obećavajuće na prvi pogled, konačni rezultat je bio rupičast. Iz ovog modela nije bilo praktično generirati maske jer bi bilo više posla popravljati ih, nego ih kreirati ručno.



The image shows a window titled 'Tweaks' with a close button (X) in the top right corner. Below the title bar is a table with two columns: 'Parameter' and 'Value'. The table contains three rows of data. On the right side of the table, there are three buttons: a plus sign (+) above a minus sign (-), and an X button below the minus sign.

Parameter	Value
BuildModel/ooc_surface_blow_off	0.95
BuildModel/ooc_surface_blow_up	0.95
BuildModel/tv11_mesh	false

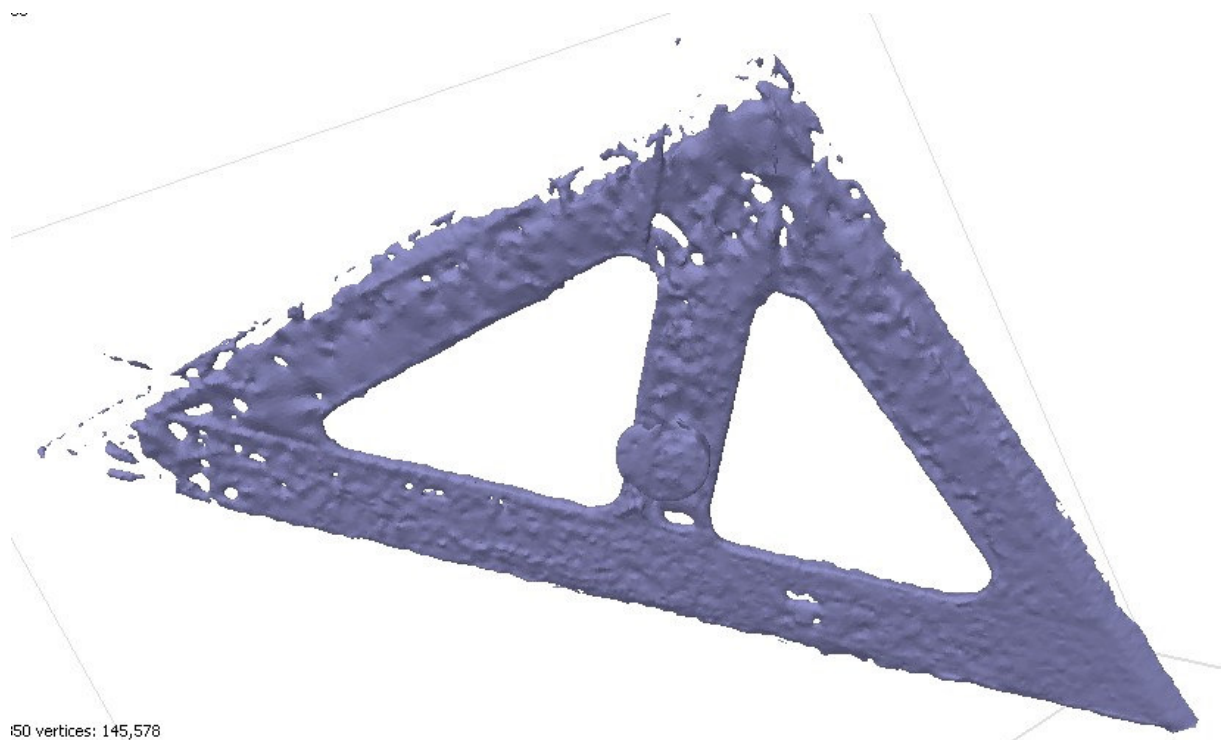
Slika 44. Korištena podešenja

- ▼ ☒ Bez maski (157 cameras, 24 markers, 10,330 points)
 - ▶ ☐ Cameras (157/157 aligned)
 - ▶ ☐ Components (1)
 - ▶ ☐ Markers (24)
 - ▶ ☐ Scale Bars (1)
 - ☑ Tie Points (10,330 points)
 - ☐ Depth Maps (109, High quality, Mild filtering)
 - ☑ Dense Cloud (10,616,815 points, High quality)
 - ◆ 3D Model (290,850 faces, High quality)
- ▼ ☒ Sa maskama (157 cameras, 24 markers, 43,939 points) [S]
 - ▶ ☐ Cameras (126/157 aligned)
 - ▶ ☐ Components (1)
 - ▶ ☐ Markers (24)
 - ▶ ☐ Scale Bars (1)
 - ☑ Tie Points (43,939 points)
 - ☐ Depth Maps (125, High quality, Mild filtering)
 - ☑ Dense Cloud (3,117,331 points, High quality)
 - ◆ 3D Model (3,225,374 faces)

Slika 45. Tijek izrade modela trokuta sa i bez maski

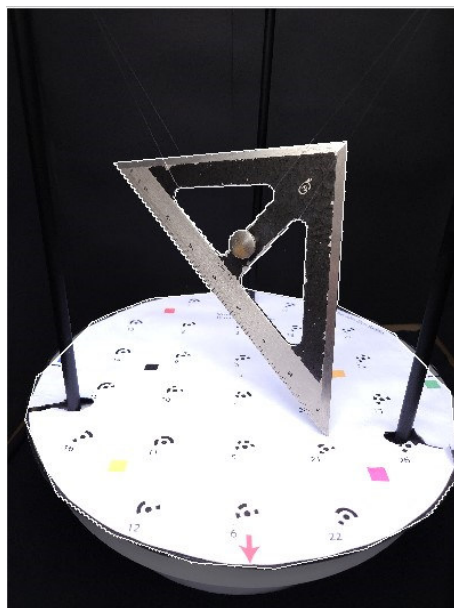


Slika 46. Oblak točaka trokuta bez maskiranja

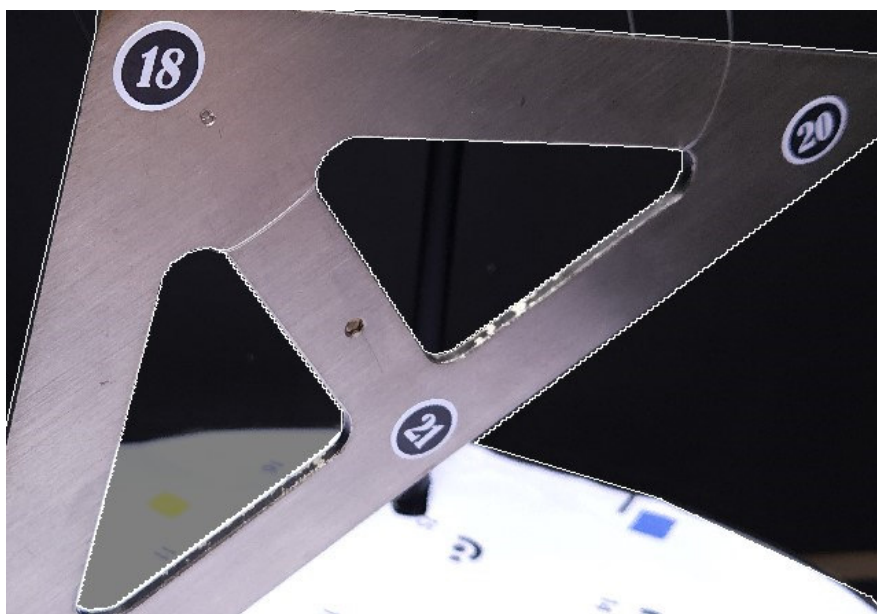


Slika 47. Model trokuta bez maskiranja

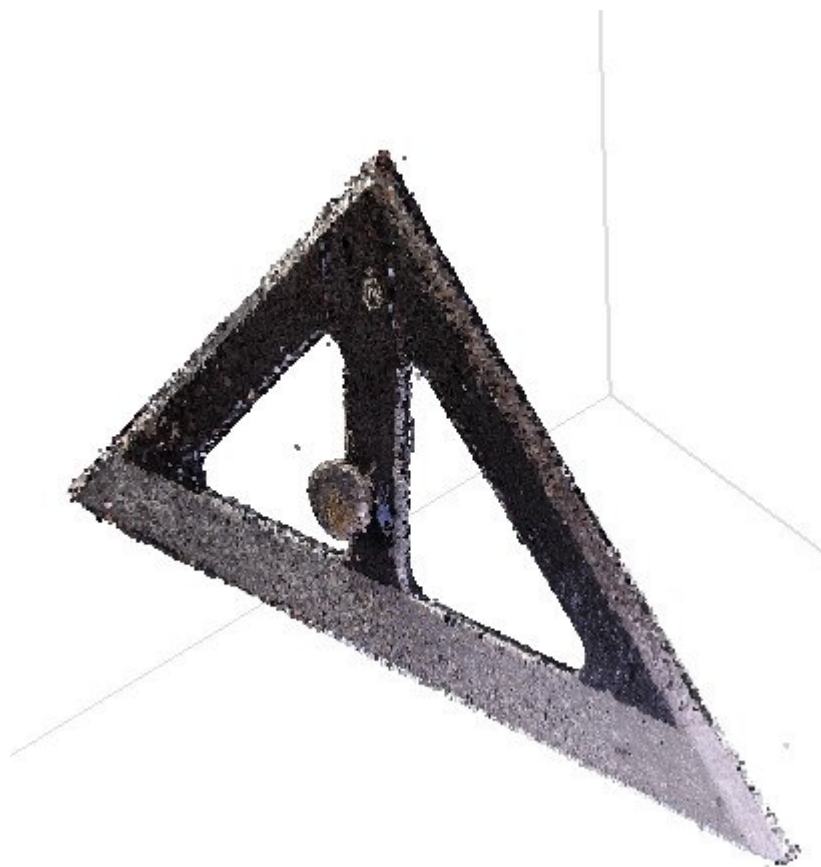
U drugom načinu obrade, maske su iscrtane ručno. Prilikom crtanja maski uočeno je da je teško raspoznati rubove trokuta od crne pozadine, s obzirom na to da je i sam trokut na mjestima crn. To je razlog zašto prvi model nije mogao ispasti dobro, budući da softver nije mogao prepoznati stvarni rub trokuta od pozadine. Generirani oblak točaka je potom uređen kako bi se uklonio višak točaka. Bilo je teško raspoznati višak točaka od onih koji pripadaju trokutu zbog njegove crne boje. Model je generiran na temelju uređenog oblaka točaka i dodana mu je tekstura. Iako rubovi trokuta nisu savršeno ravni i površina nije potpuno uglađena, trokut je cijel i puno boljeg izgleda nego onaj bez maski. Trokut bez teksture je jako zrnat, dok onaj sa teksturom nije.



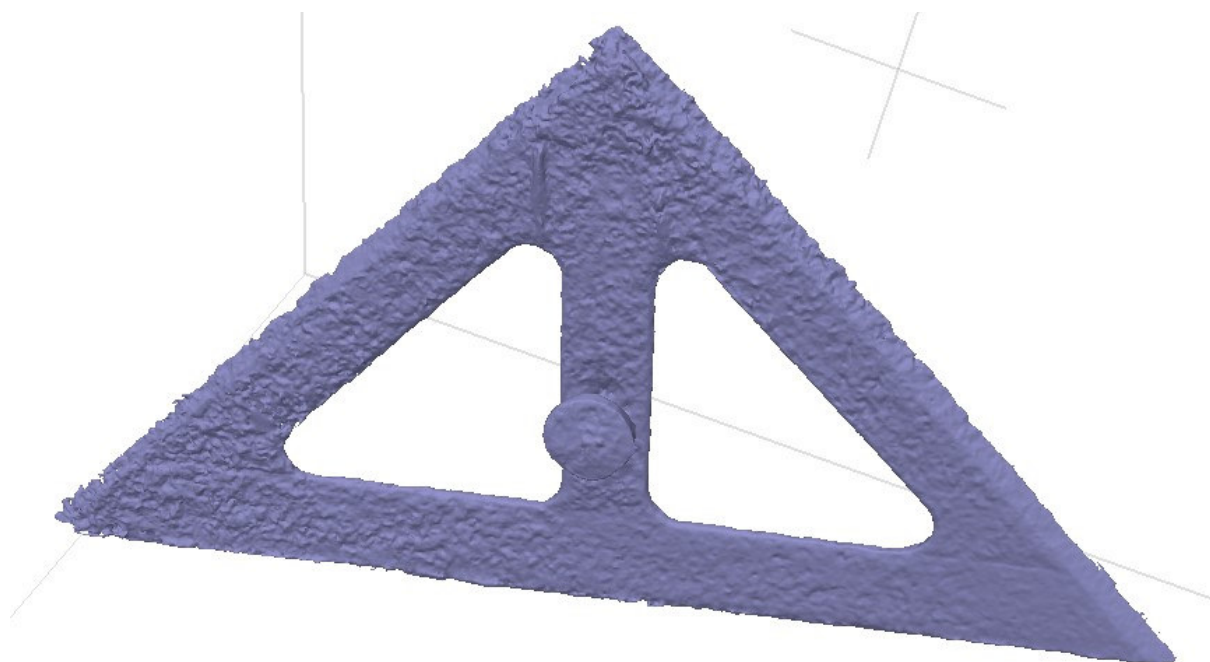
Slika 48. Maskiranje trokuta



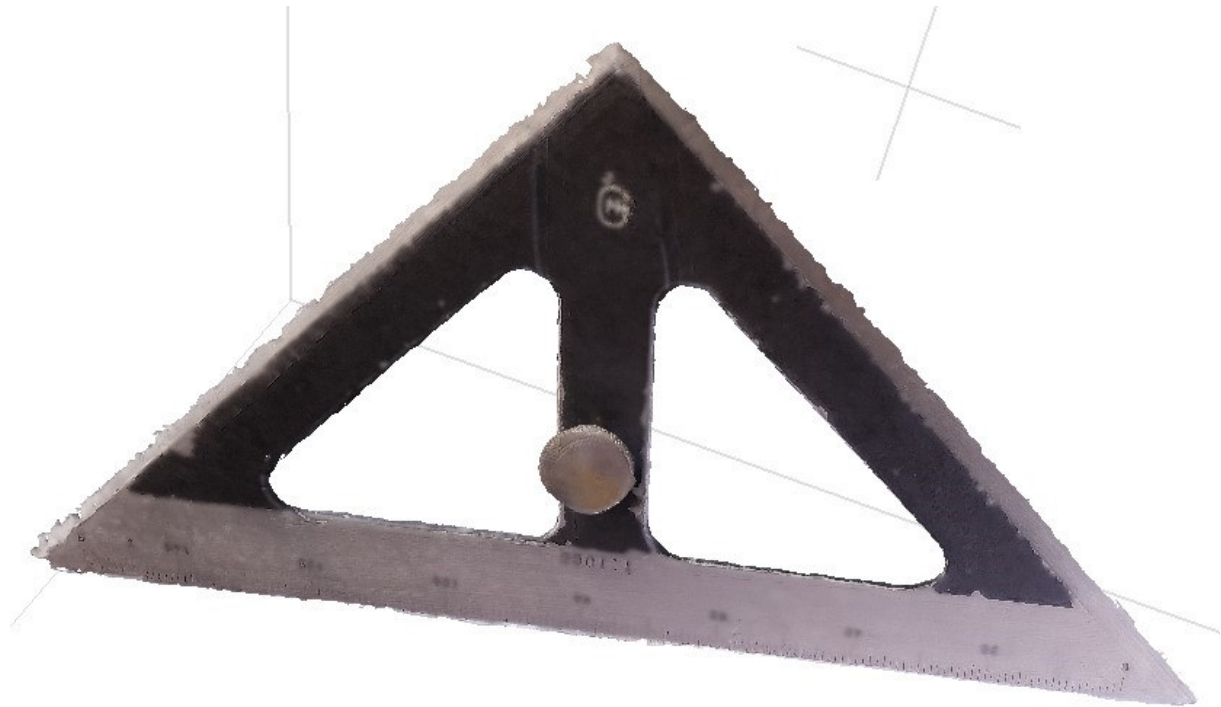
Slika 49. Maskiranje trokuta



Slika 50. Oblak točkaka trokuta izrađen sa maskiranjem













Slika 51. Model trokuta izrađen sa maskiranjem



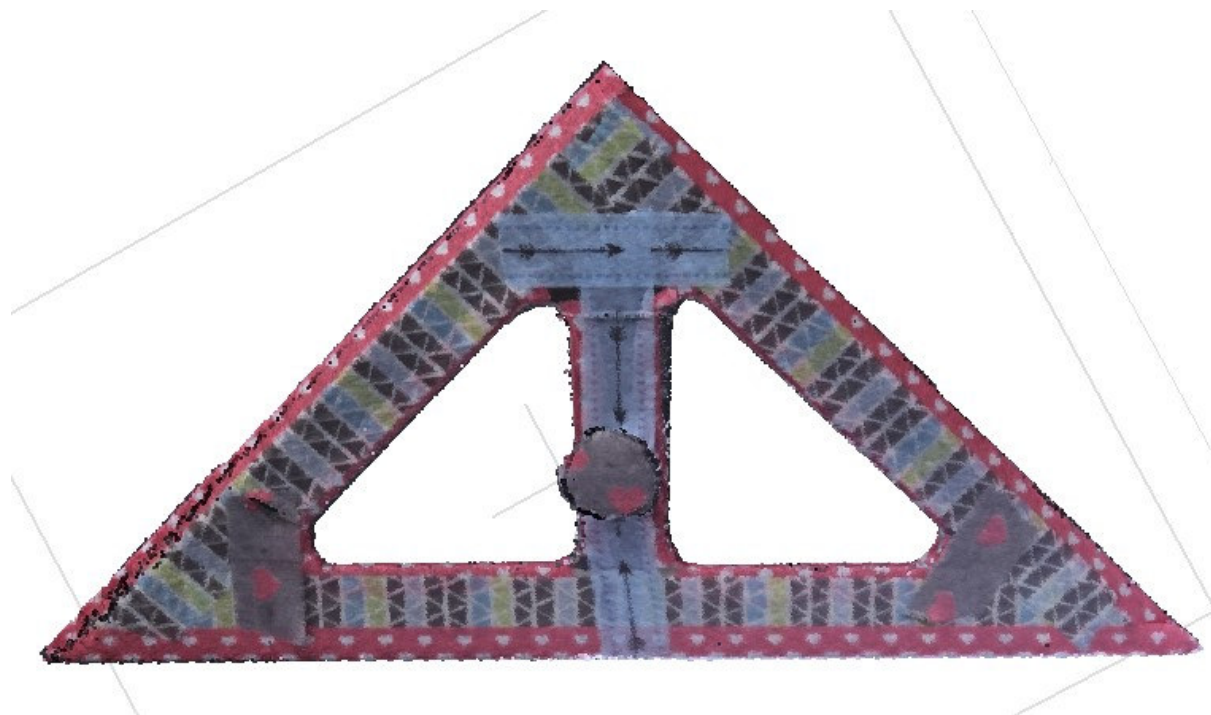
Slika 52. Model trokuta sa teksturom

S obzirom na to da je ručno iscrtavanje maski na tako velikom broju fotografija vremenski zahtjevno i može dovesti do pogrešaka, postavilo se pitanje bi li se mogao automatizirati postupak kada bi se stvorio veliki kontrast između objekta i pozadine. Zato je objekt fotografiran s trakama. Budući da je trokut muzejski primjerak, nije ga se smjelo oštetiti te je oblijepljen trakom u raznim bojama jer ta traka ne ostavlja ljepljivi sloj i lako se skida bez oštećenja objekta. Slike nisu maskirane te su generirana dva modela. Jedan je temeljen na dubinskim kartama i jedan na oblaku točaka. Na slici 53. je prikazan broj točaka i parametri za svaki model.

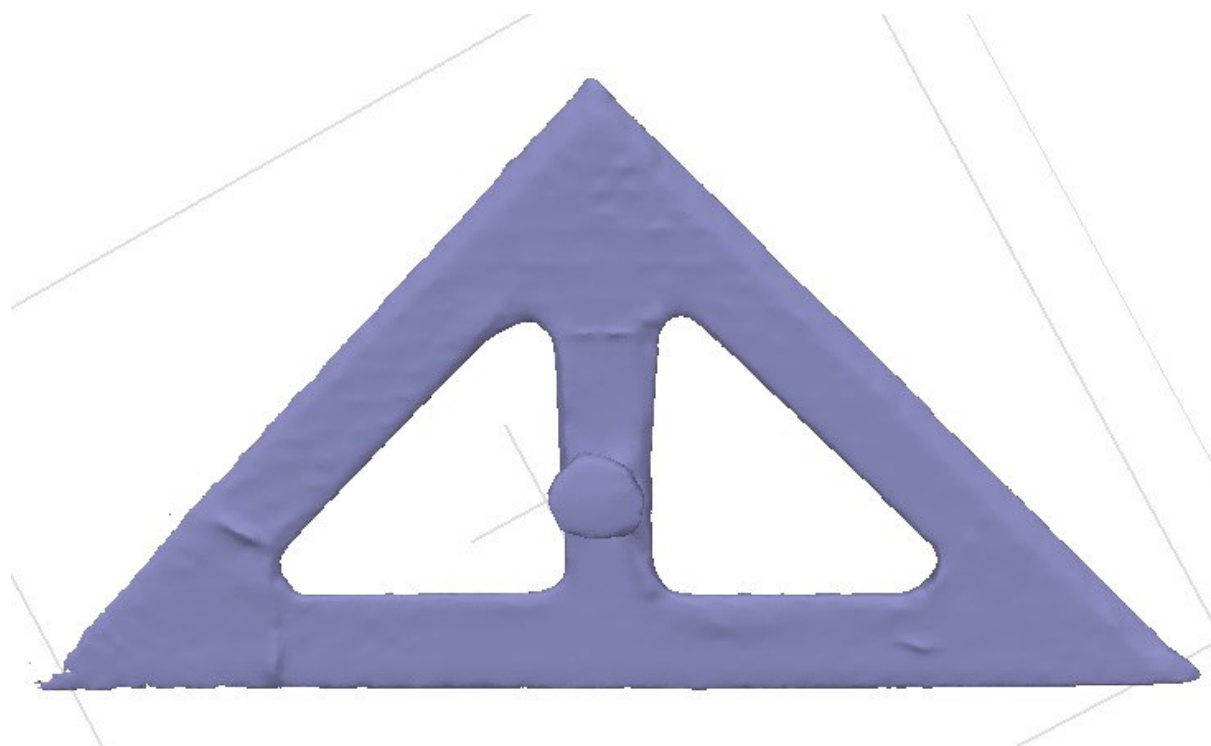
- ▼  **Dense cloud (244 cameras, 25 markers, 50,078 points)**
 - ▶  Cameras (244/244 aligned)
 - ▶  Components (1)
 - ▶  Markers (25)
 - Tie Points (50,078 points)
 -  Depth Maps (212, High quality, Mild filtering)
 - Dense Cloud (432,930 points, High quality)
 - ◆ 3D Model (180,000 faces, High quality)
- ▼  **Depth maps (244 cameras, 25 markers, 50,078 points)**
 - ▶  Cameras (244/244 aligned)
 - ▶  Components (1)
 - ▶  Markers (25)
 - Tie Points (50,078 points)
 -  Depth Maps (212, High quality, Mild filtering)
 - Dense Cloud (1,441,608 points, High quality)
 - ◆ 3D Model (71,905 faces, High quality)

Slika 53. Tijek izrade modela trokuta

Softver je uspješno prepoznao objekt te je u oblaku točaka bilo puno jednostavnije očistiti nepoželjne točke zbog vidljivog kontrasta. U oba slučaja objekt je ispao potpun, bez rupa i s ravnijim rubovima. U ovom slučaju, trokuti koji su izrađeni na temelju očišćenih oblaka točaka su bili puno bolji od onih izrađenih na temelju dubinskih karata. Na trokute s trakom je dodana tekstura, a po uzorcima na trakama vidljivo je kako površina nije savršeno ravna. Kod trokuta izrađenog od oblaka točaka nedostaje dio ruba, što postaje očito tek kada se postavi tekstura, iako je taj rub prisutan u oblaku točaka. Debljina trokuta se uspješno modelirala bez maskiranja.



Slika 54. Oblak točaka



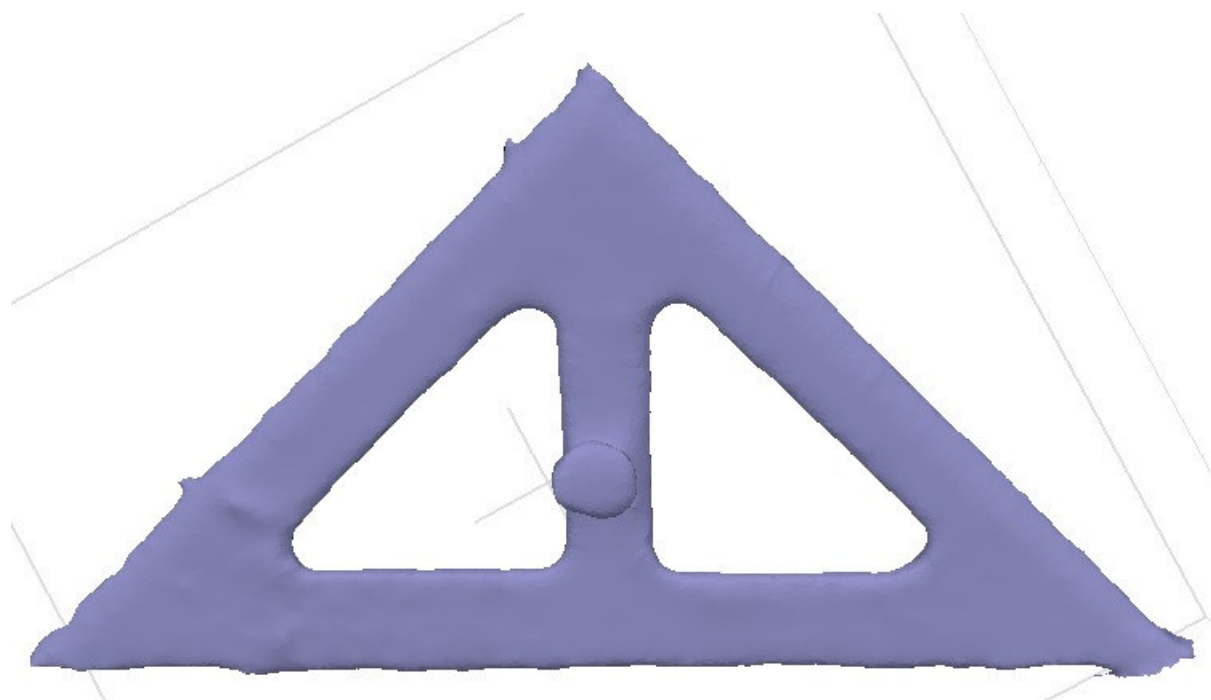
Slika 55. Model izrađen na temelju oblaka točaka



Slika 56. Prikaz modela sa teksturom



Slika 57. Prikaz modela sa teksturom



Slika 58. Model izrađen na temelju dubinskih karata



Slika 59. Prikaz modela sa teksturom

U tablici 2. prikazane su izmjerene stranice stvarnog trokuta i modela, čime se dodatno potvrđuje točnost i kvaliteta modela izrađenih različitim metodama.

Tablica 2. Usporedba mjerenih duljina trokuta

Položaj	Stvarna duljina (cm)	Nemaskirani trokut (cm)	Maskirani trokut (cm)	Traka – dense coloud (cm)	Traka – depth maps (cm)
Krakovi	17.9	17.2	17.4	17.8	17.9
Hipotenuza	25.3	24.8	24.7	24.4	25.2
Debljina	0.3	0.39	0.27	0.23	0.22

Gledajući mjere prikazane u tablici 2., vidljivo je kako postoji značajno odstupanje od stvarne veličine. To je zbog nepravilnosti samog modela, odnosno zbog neujednačenih i nedostajućih rubova. Model izrađen sa trakom, temeljen na dubinskim kartama, jedini je koji je cijeli u pravim veličinama, iako je pogreška mjerila 0 za sve modele.

Scale Bars	Distance (m)	Accuracy (m)	Error (m)
<input checked="" type="checkbox"/> target 5_target 11	0.050000	0.001000	-0.000000
Total Error			
Control scale bars			0.000000
Check scale bars			


























Slika 60. Parametri mjerila za sve modele

Analizirajući trokute, primjećuje se različita kvaliteta između modela generiranih na temelju dubinskih karata i onih baziranih na oblaku točaka. Trokuti izrađeni na temelju dubinskih karata pokazuju veće nepravilnosti, posebno na rubovima, što rezultira manjom vjernosti u odnosu na stvarni objekt. Iako su rubovi trokuta izrađeni na temelju oblaka točaka ravniji, moguće su vidljive deformacije i nedostaci, osobito na detaljnim dijelovima poput rubova. Unatoč tome, modeli izrađeni na temelju oblaka točaka imaju bolju cjelovitost i manje su podložni

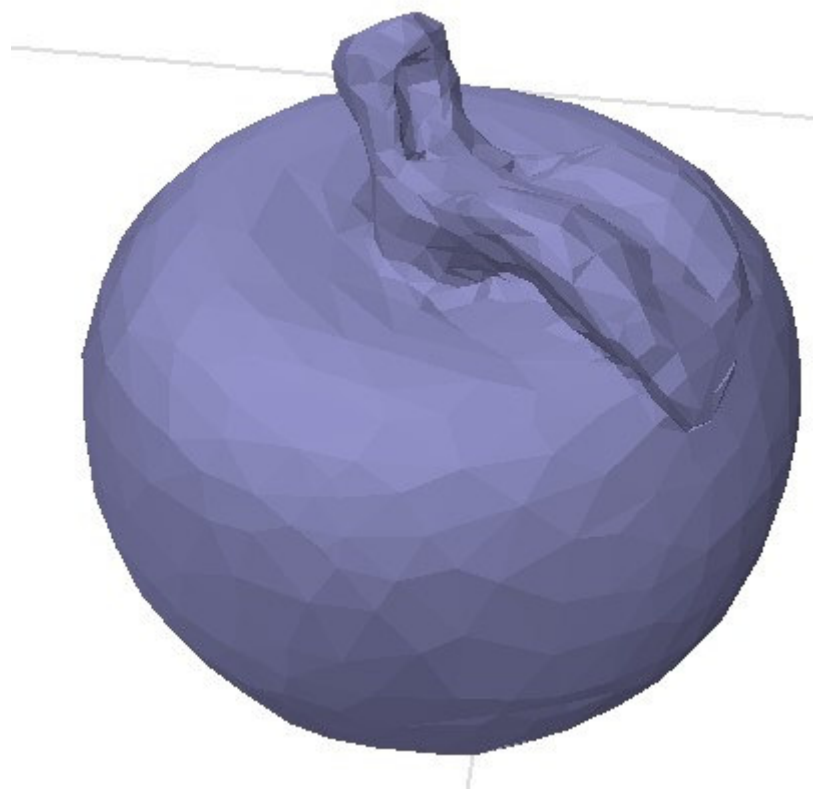
nedostacima dijelova objekta. U konačnici, trokuti s dodanom teksturom dodatno otkrivaju nepravilnosti, poput nedostataka na rubovima i deformacija. To ukazuje na potrebu za poboljšanjem postupka izrade modela radi postizanja veće preciznosti i vjernosti.

6.3 Jabuka

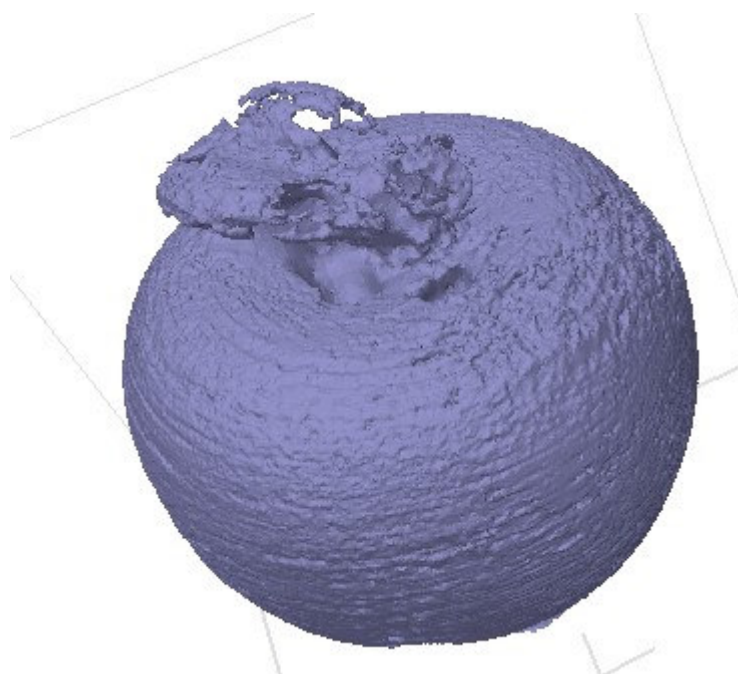
Jabuka se prvo modelirala u niskoj kvaliteti bez maski, gdje je izrađeni model zaglađen. Prošarana tekstura nije bila prisutna, ali su peteljka i list uspješno modelirani. Zatim je izrađen model u visokoj kvaliteti bez maski, gdje se prošarana tekstura jasno modelirana, ali su se na peteljci i listu pojavile velike rupe koje se nisu mogle zatvoriti.

- ▼  Visoka kvaliteta (139 cameras, 26 markers, 15,665 points) [S]
 - ▶  Cameras (139/139 aligned)
 - ▶  Components (1)
 - ▶  Markers (26)
 - ▶  Scale Bars (1)
 - ▶  Tie Points (15,665 points)
 - ▶  Depth Maps (101, High quality, Mild filtering)
 - ▶  3D Model (668,246 faces, High quality)
- ▼  Niska kvaliteta (139 cameras, 25 markers, 85,586 points) [S]
 - ▶  Cameras (139/139 aligned)
 - ▶  Components (1)
 - ▶  Markers (25)
 - ▶  Scale Bars (1)
 - ▶  Tie Points (85,586 points)
 - ▶  Depth Maps (139, Low quality, Moderate filtering)
 - ▶  3D Model (1,845 faces, Low quality)
- ▼  Visoka kvaliteta - maske (139 cameras, 25 markers, 149,029 points) [S]
 - ▶  Cameras (139/139 aligned)
 - ▶  Components (1)
 - ▶  Markers (25)
 - ▶  Scale Bars (1)
 - ▶  Tie Points (149,029 points)
 - ▶  Depth Maps (138, High quality, Moderate filtering)
 - ▶  Dense Cloud (5,736,821 points, High quality)
 - ▶  3D Model (458,230 faces, High quality)

Slika 61. Tijek izrade svih modela

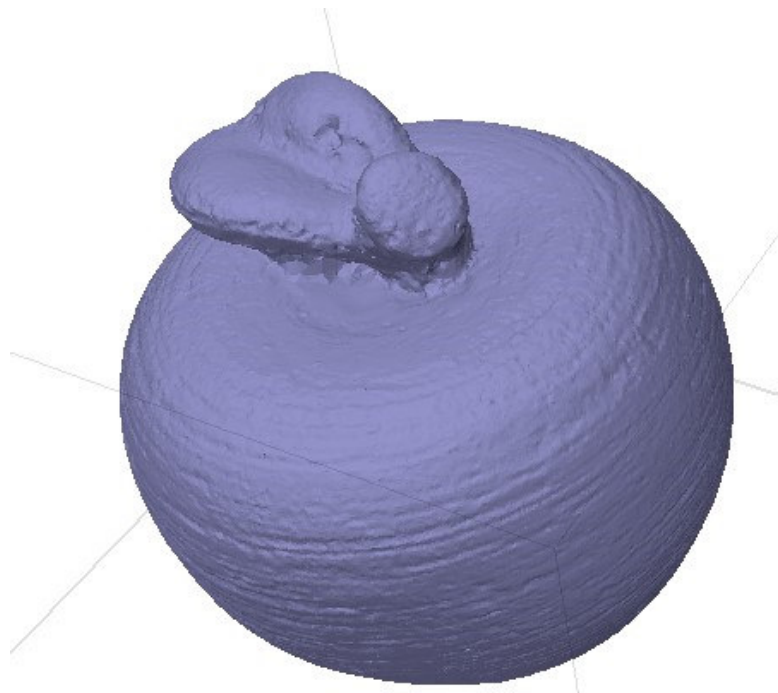


Slika 62. Model jabuke u niskoj kvaliteti

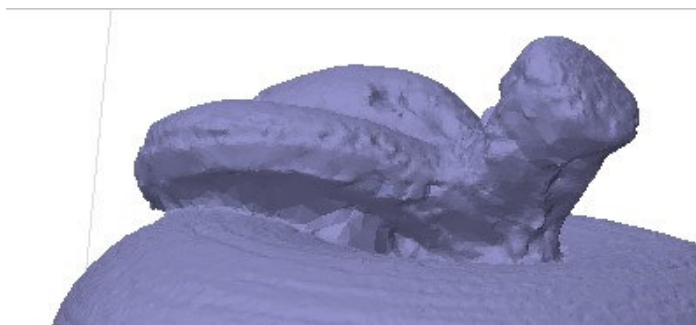


Slika 63. Model jabuke u visokoj kvaliteti

Od modela niske kvalitete izrađene su maske, te je model iznova izrađen u visokoj kvaliteti. Ovom metodom model se uspješno rekonstruirao bez većih rupa. Prošarana tekstura je također dobro očuvana, a peteljka i list su bez većih oštećenja. Jabuka i list nisu fizički spojeni; između njih je prazan prostor, ali na modelu izgledaju kao da su spojeni. Razlog za to je taj što se međuprostor ne vidi na slikama, pa program nije mogao pravilno rekonstruirati te dijelove. Kod dodavanja teksture, program je uspio vjerno rekonstruirati boju jabuke, ali je bilo potrebno kalibrirati boje, jer ne kalibrirana tekstura je bila presvijetla.



Slika 64. Model jabuke u visokoj kvaliteti sa maskiranjem



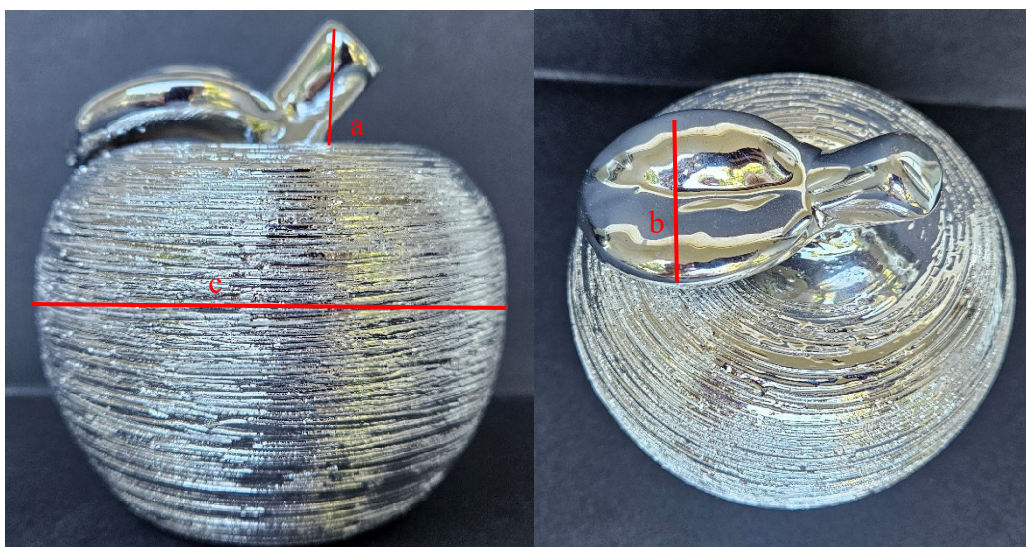
Slika 65. Bliži prikaz peteljke



Slika 66. Model jabuke sa teksturom

Tablica 3. Usporedba mjerenih duljina jabuke

Položaj	Stvarna duljina (cm)	Visoka kvaliteta (cm)	Niska kvaliteta (cm)	Visoka kvaliteta - maskirano (cm)
Peteljka (a)	2.90	2.74	2.61	2.78
List (b)	3.10	2.93	2.97	2.98
Promjer najšireg dijela (c)	8.90	8.91	8.82	8.91



Slika 67. Mjerene duljine jabuke

Kvaliteta je igrala značajnu ulogu u točnosti mjerenja jabuke. Iako su za sva tri modela pogreške bile minimalne, preciznost mjerenja je varirala što je vidljivo u tablici 3. Na slici 68. je prikazano da je pogreška za sva tri modela 0 mm, što ukazuje na visoku razinu točnosti. Međutim, modeli visoke kvalitete su pokazali manje nepravilnosti i rupe u usporedbi s modelima niže kvalitete, što je omogućilo preciznije određivanje mjera i poboljšalo ukupnu vjernost modela.

Scale Bars	Distance (m)	Accuracy (m)	Error (m)
<input checked="" type="checkbox"/> target 35_target 41	0.005000	0.000100	-0.000000
Total Error			
Control scale bars			0.000000
Check scale bars			

Slika 68. Parametri mjerila

6.4 Svijećnjak

Obje polovice svijećnjaka izrađene su u visokoj kvaliteti. Model gornje polovice nema donji dio, dok model donje polovice nema gornji dio. Za spajanje ovih polovica korišteno je poravnanje temeljeno na markerima. Na svijećnjak su zalijepljene četiri naljepnice kako bi se omogućilo precizno poravnanje polovica, jer svijećnjak sam po sebi nema dovoljno karakterističnih točaka. Na svakoj naljepnici odabrane su tri točke, što je ukupno činilo dvanaest točaka. Viškovi modela gornjeg i donjeg dijela su odsječeni kako bi se polovice bolje spojile, a zatim su spojeni oblaci točaka iz kojih je izrađeno novo oplošje modela u visokoj kvaliteti.

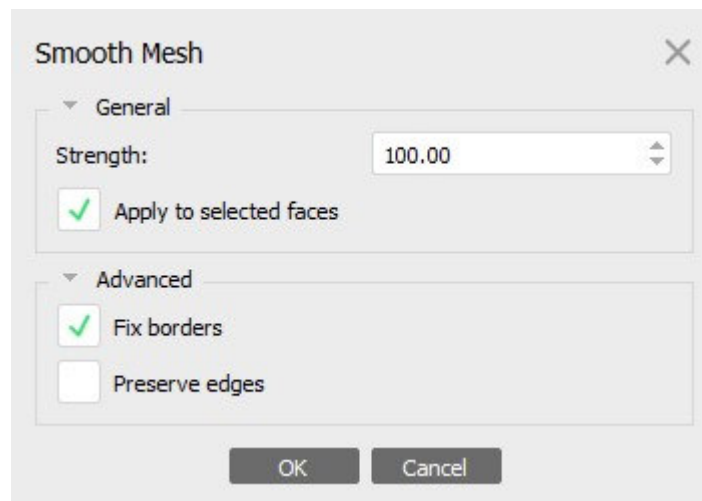


Slika 69. Uređeni oblaci točaka dviju polovica



Slika 70. Prikaz ne uređenog oblaka točaka dviju polovica

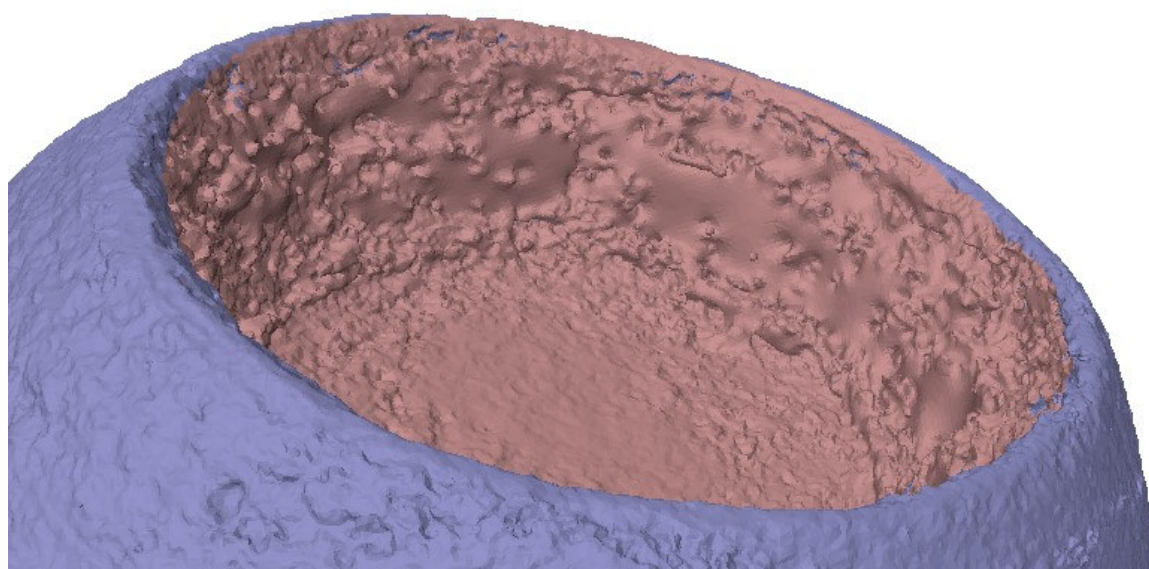
Prošarani dio modela se modelirao vrlo dobro s jasno vidljivim detaljima i teksturama. Na mjestima gdje su bile naljepnice vidljivi su njihovi otisci, što je pomoglo u preciznom spajanju modela. Međutim, gornji sjajni dio svijećnjaka je ispao neravno te je nad njim provedeno višestruko zaglađivanje, koristeći parametre prikazane na slici 71. Iako je dio vidno zaglađen, on nije posve gladak jer ima mnogo sitnih rupica i udubljenja koja se više ne mogu izravnati.



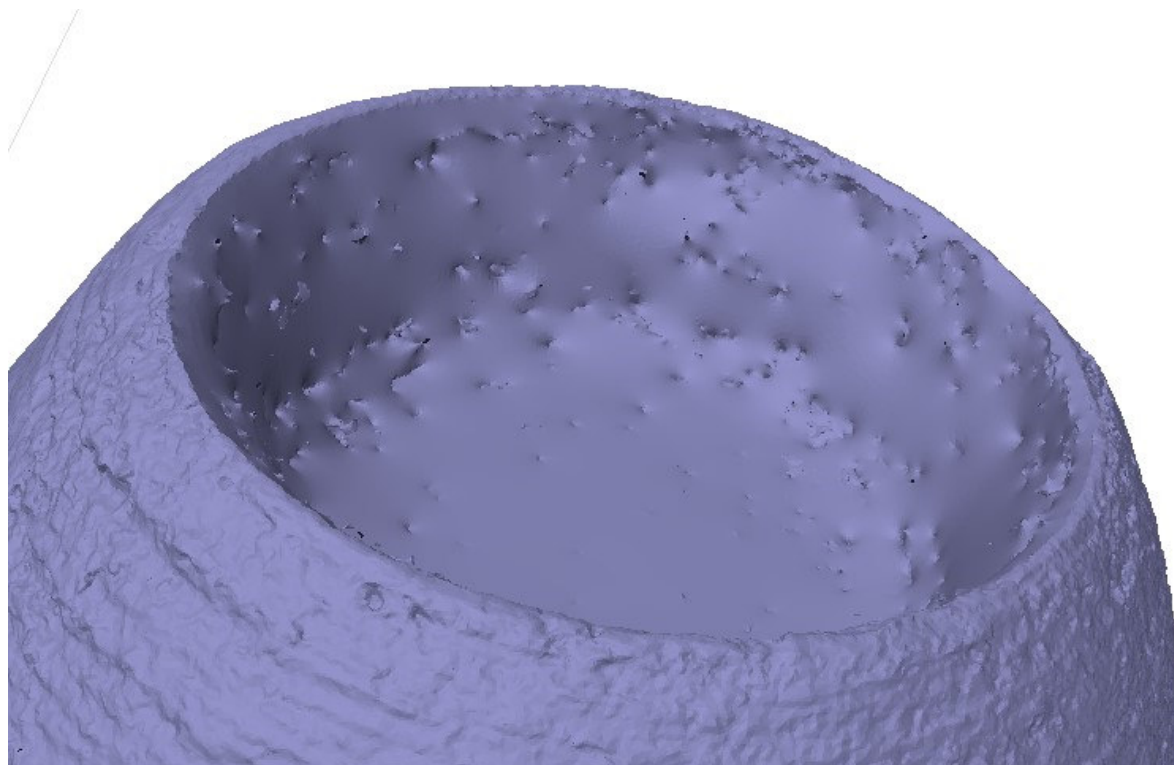
Slika 71. Parametri zaglađivanja modela



Slika 72. Konačni model svijećnjaka



Slika 73. Ne zaglađeni dio svijećnjaka



Slika 74. Zaglađeni dio svijećnjaka

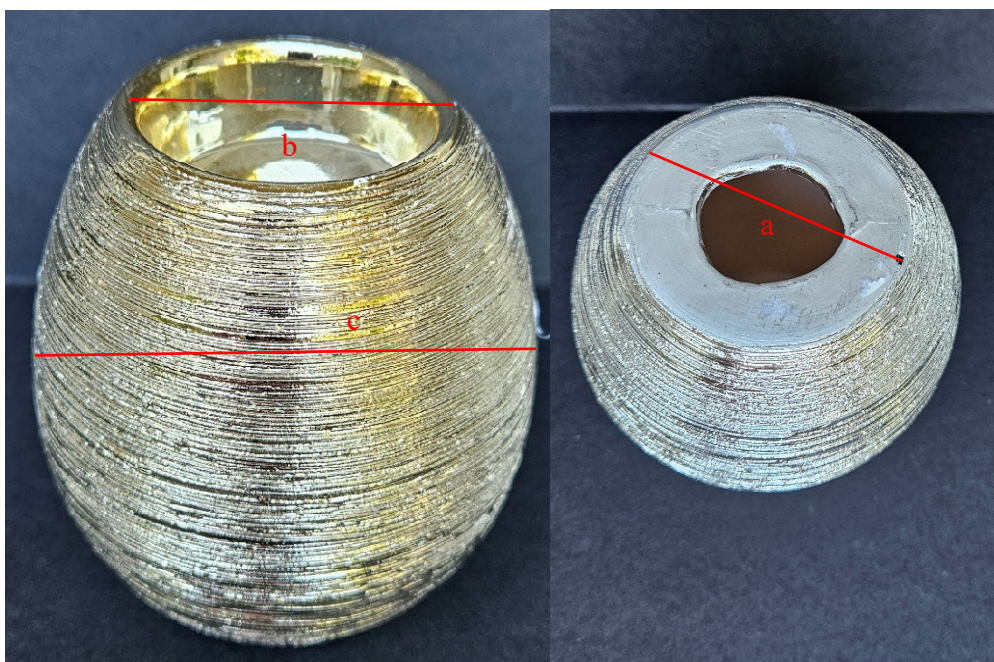
Kada je dodana tekstura, program je uspio rekonstruirati boju svijećnjaka na način da je gledanjem odozgora vidljivo kako je zlatan, dok je odozdol srebrn. Reflektirajući dio kod teksture ispao je prilično dobro i sitne rupice nisu jako vidljive, što je značajno poboljšalo vizualni dojam modela.



Slika 75. Model svijećnjaka sa teksturom

Tablica 4. Usporedba mjerenih duljina svijećnjaka

Položaj	Stvarna duljina (cm)	Duljina na modelu (cm)
Promjer dna (a)	5.60	6.13
Promjer vrha (b)	5.00	5.66
Širina (c)	8.70	9.63



Slika 76. Mjerene duljine svijećnjaka

Ovaj slučaj je sličan kao i kod modela jabuke. Prošarani dijelovi su modelirani dobro, s ponekom rupom, dok sjajni dijelovi imaju više sitnih rupica. Prilikom spajanja dva dijela svijećnjaka došlo je do problema s markerima. Obje polovice su slikane na istim markerima te je prilikom spajanja program smatrao da treba spojiti dijelove po njima. Zbog toga je bilo potrebno pobrisati te markere kako bi se spriječile greške u poravnanju polovica. Ovaj problem mogao je dovesti do deformacije mjerila, jer duljine modela odstupaju 5-6 mm od stvarnih duljina što je vidljivo u tablici 4. Pogreška mjerila koja je prikazana na slici 77. iznosi 3 mm, što je značajno utjecalo na preciznost konačnog modela. Uklanjanjem nepotrebnih markera i

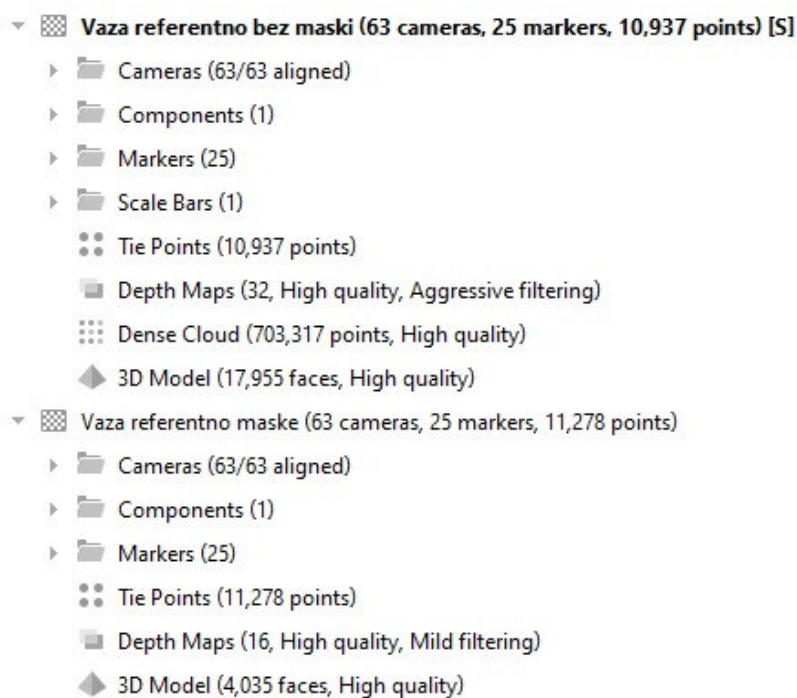
pažljivim poravnavanjem dviju polovica modela, postignuta je veća točnost, ali su i dalje prisutne manje nepravilnosti.

Scale Bars	Distance (m)	Accuracy (m)	Error (m)
<input checked="" type="checkbox"/> target 35_target 41	0.050000	0.000100	0.003259
<input checked="" type="checkbox"/> target 35_target 41	0.050000	0.000100	0.003110
Total Error			
Control scale bars			0.003186
Check scale bars			

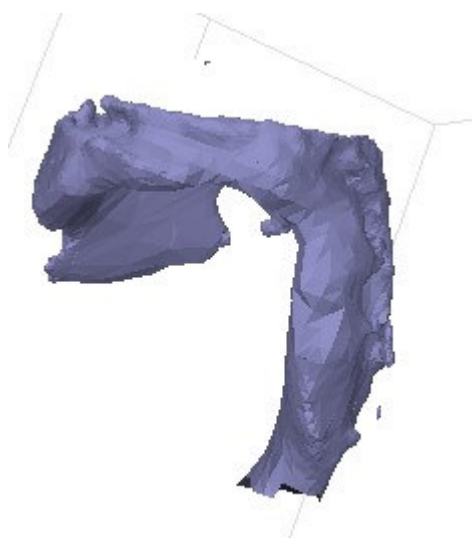
Slika 77. Parametri mjerila

6.5 Vaza

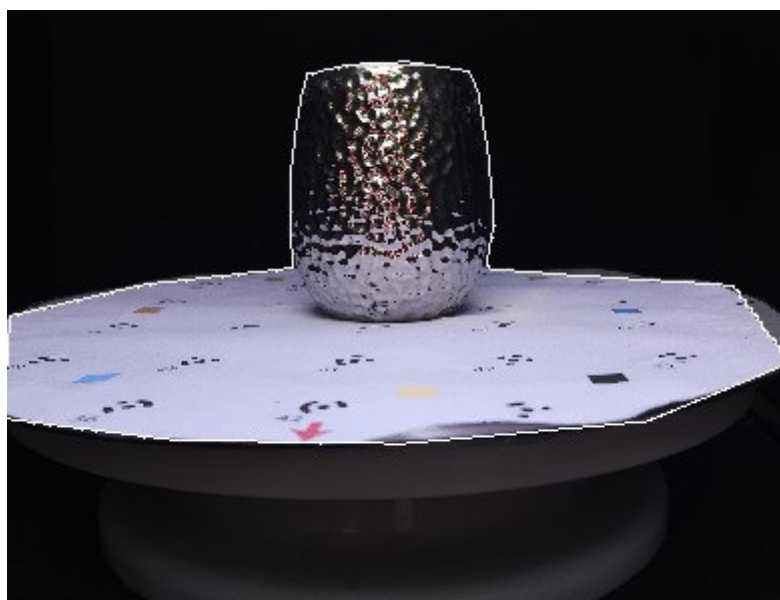
Modeli vaze su izrađeni u visokoj kvaliteti, osim referentnog modela u svjetlijem osvjetljenju koji je izrađen u ultravisokoj kvaliteti. Prvi referentni model je izrađen s maskiranjem i bez maskiranja. Model koji je izrađen bez maskiranja rekonstruiran je samo polovično, prikazujući samo prednju stranu modela koja je osvijetljena. Program nije mogao prepoznati gdje objekt završava jer je pozadina bila previše tamna i objekt se stopio s pozadinom. Zbog toga je postupak ponovljen s ručno dodanim maskama, jer maske iz ovog modela nije bilo moguće generirati kada model nije bio cijeli. Ni ovaj model nije bio uspješan; iako se rekonstruiralo više površine, ona opet nije ni malo nalikovala objektu, osim sredine koja je bila osvijetljena. Ovo je pokazalo da objekt mora imati jak kontrast između sebe i pozadine, kao kod trokuta, da bi model bio uspješan.



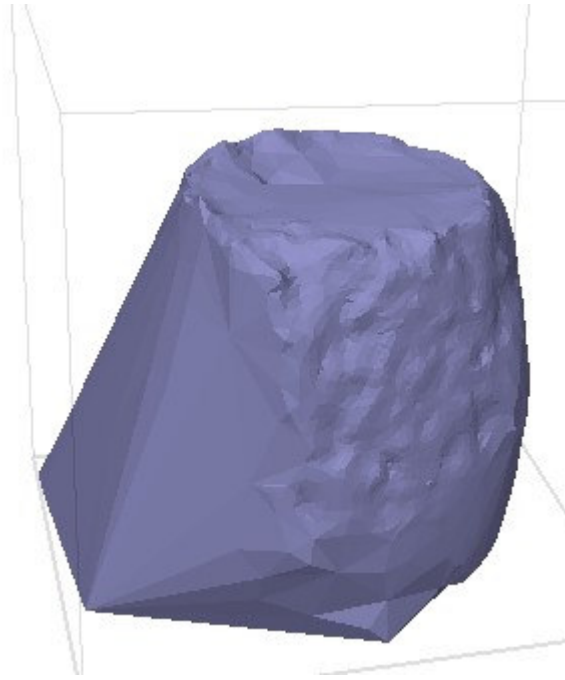
Slika 78. Prikaz tijeka izrade referentne vaze



Slika 79. Referentni model bez maskiranja



Slika 80. Maskiranje objekta

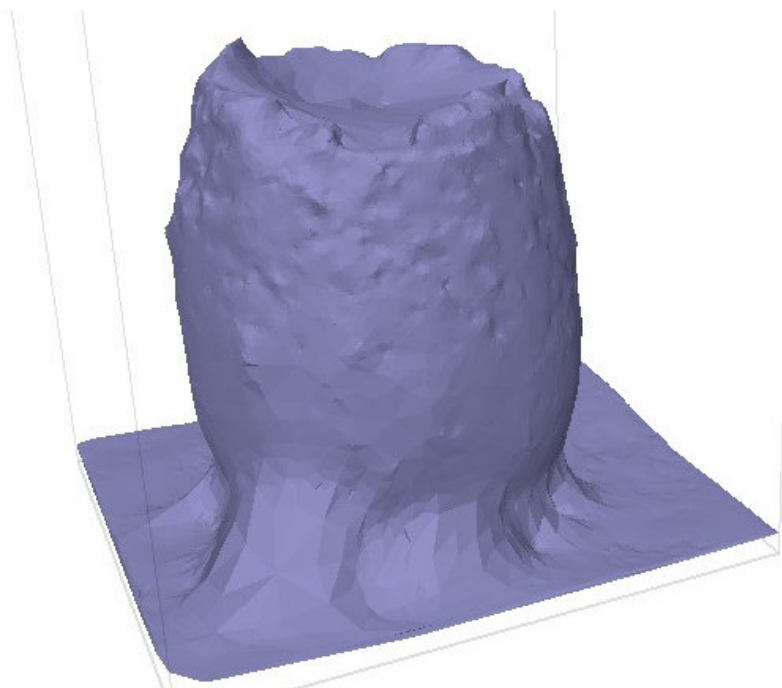


Slika 81. Referentni model sa maskiranjem

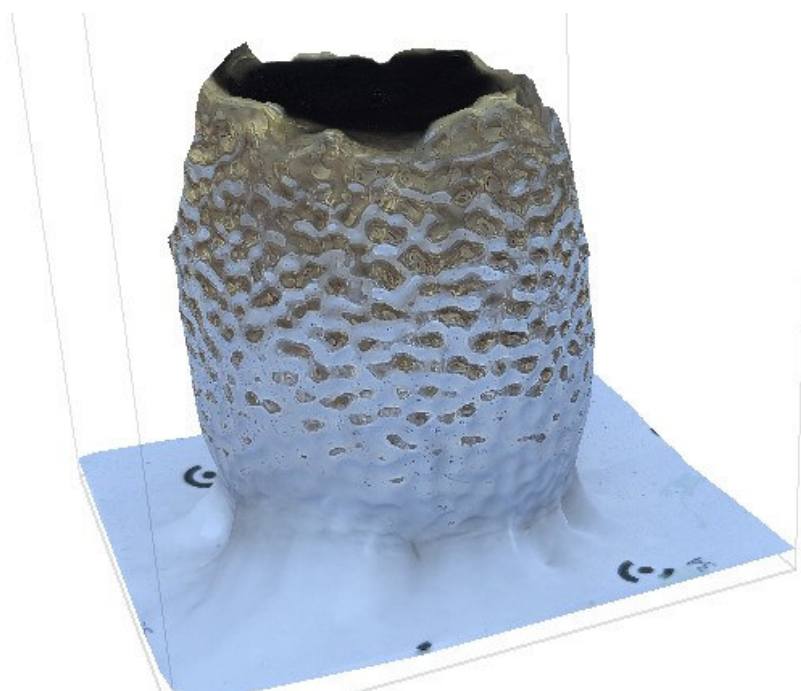
Stoga je ponovljeno snimanje, ali s puno više osvjetljenja. Ovaj model je bio najuspješniji od referentnih modela, ali donji dio vaze nije dobro rekonstruiran zbog presvijetlog odsjaja koji je zbunio program. Da je korištena drugačija podloga koja je dinamičnija ili da su se na tom mjestu stvorile sjene, taj dio bi se također bolje rekonstruirao.

- ▼  **Vaza referentno osvjetljeno (60 cameras, 24 markers, 21,592 points) [S]**
 - ▶  Cameras (60/60 aligned)
 - ▶  Components (1)
 - ▶  Markers (24)
 - ▶  Scale Bars (1)
 - Tie Points (21,592 points)
 -  Depth Maps (56, Ultra high quality, Aggressive filtering)
 -  3D Model (77,294 faces, Ultra high quality)

Slika 82. Tijek izrade referentnog modela

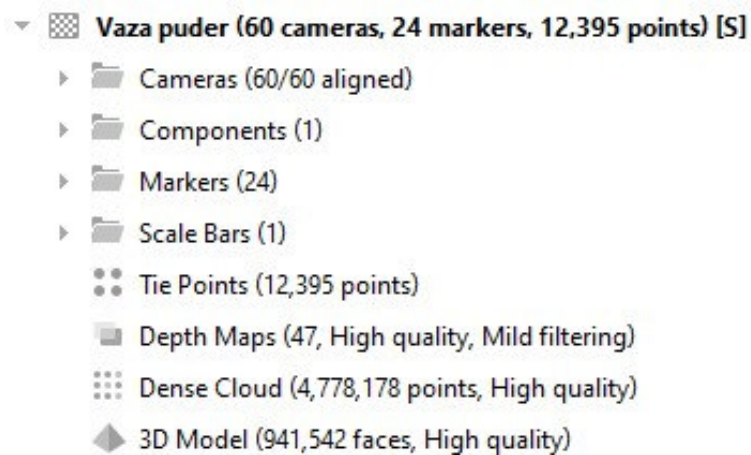


Slika 83. Referentni model

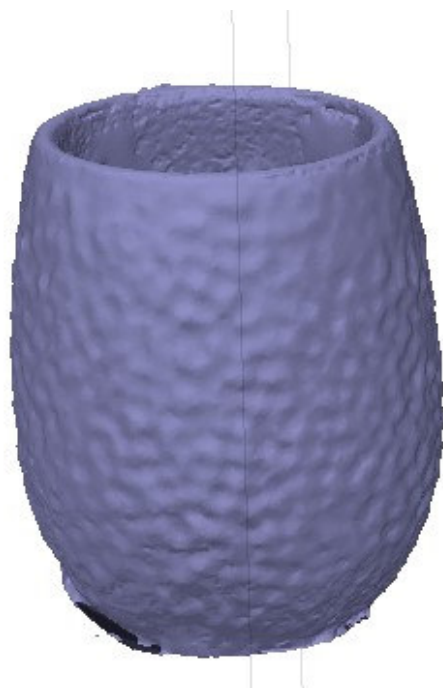


Slika 84. Model sa dodanom teksturom

Zatim je izrađen model koji je bio potpuno prekriven puderom. Taj model je bio uspješan, iako je pri dnu imao neke nepravilnosti. Puder je omogućio da se površina matira te se model mogao lako rekonstruirati. Dio pudera je obrisan s vaze te je puder ostao samo u rupama. Taj model se također uspješno rekonstruirao, iako je dio vaze bio reflektivan. Program je uspješno rekonstruirao objekt jer su sjene bile vidljive. Na ovom modelu program je uspješno uspio rekonstruirati i unutrašnjost vaze koja je imala samo tragove pudera po sebi. Dodavanjem teksture na modelima koji sadrže puder vidi se zrnatost pudera.









Slika 85. Tijek izrade vaze sa puderom



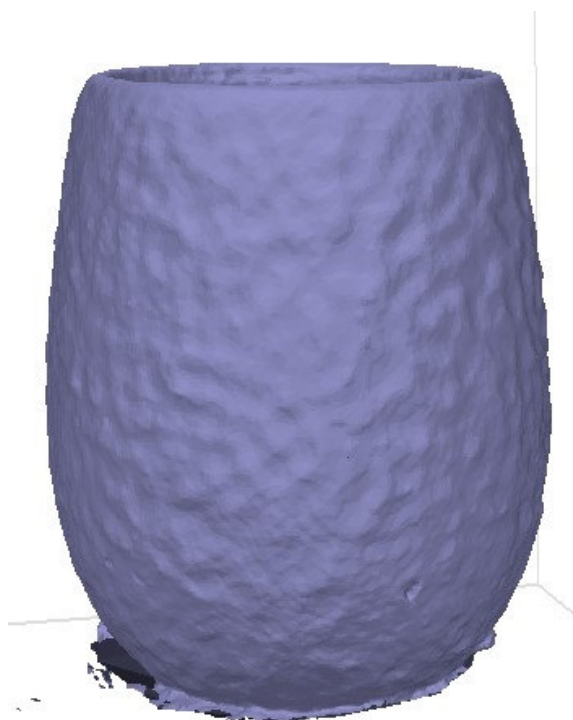
Slika 86. Model vaze sa puderom



Slika 87. Model vaze sa puderom sa dodanom teksturom

- ▼  **Vaza polupuder (65 cameras, 24 markers, 14,013 points) [S]**
 - ▶  Cameras (65/65 aligned)
 - ▶  Components (1)
 - ▶  Markers (24)
 - ▶  Scale Bars (1)
 - Tie Points (14,013 points)
 -  Depth Maps (59, High quality, Mild filtering)
 - Dense Cloud (4,111,179 points, High quality)
 - ◆ 3D Model (205,803 faces, High quality)

Slika 88. Tijek izrade modela sa polupuderom

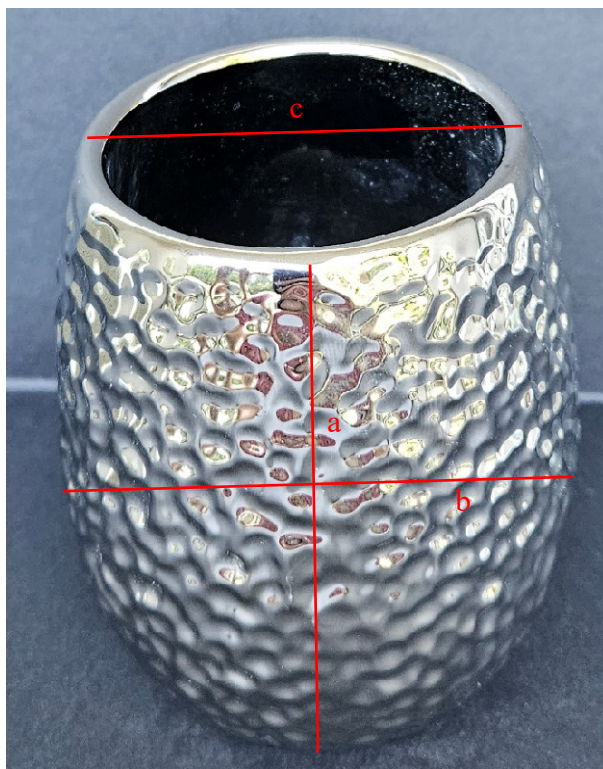


Slika 89. Model vaze sa polupuderom



Slika 90. Model vaze sa polupuderom sa dodanom teksturom

U tablici 5. prikazane su visina, širina i promjer objekta. Duljine za prva dva referentna slučaja nisu mjerene jer model nije bio uspješan. Visina na referentnom modelu varira jer model nije ravnomjerno izrađen, isto kao i promjer, ali je u tablici napisan prosjek. Iako su modeli s puderom i polupuderom vizualno ljepši, po mjerama je model bez ikakvih dodataka na mjestima gdje se potpuno rekonstruirao vjerniji originalu u veličini, iako svi modeli imaju pogrešku mjerila 0.



Slika 91. Prikaz mjerenih duljina vaze

Tablica 5. Usporedba mjerenih duljina vaze

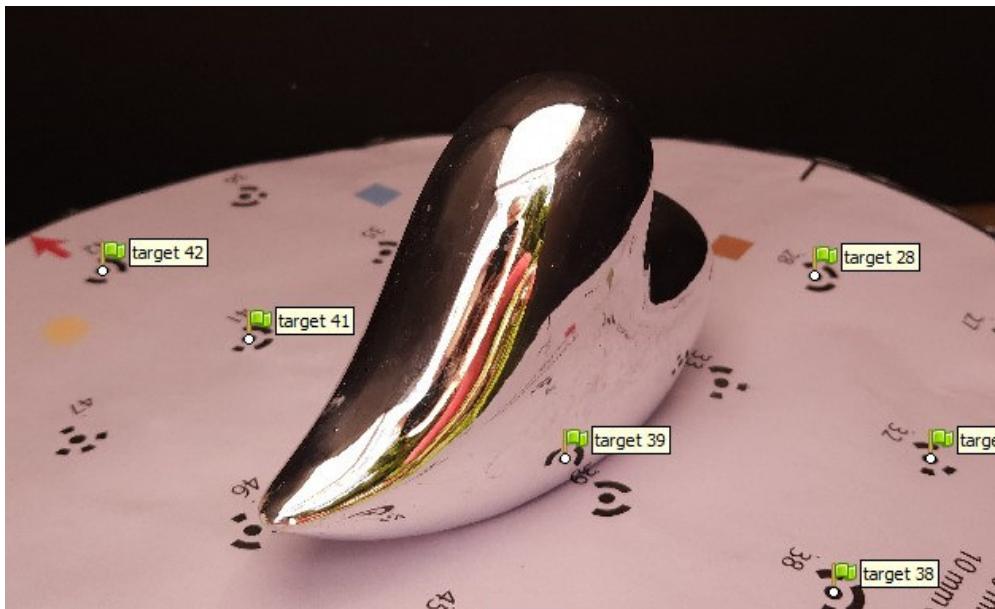
Položaj	Stvarna duljina (cm)	Referentno – osvjetljeno (cm)	Puder (cm)	Polupuder (cm)
Visina (a)	10.00	7.72-9.94	9.57	9.81
Širina najširi dio (b)	8.30	8.26	8.04	8.08
Promjer otvora (c)	6.50	6.46	6.61	6.56

Scale Bars	Distance (m)	Accuracy (m)	Error (m)
✓ target 35_target 41	0.005000	0.000100	-0.000000
Total Error			
Control scale bars			0.000000
Check scale bars			

Slika 92. Parametri mjerila

6.6 Srce

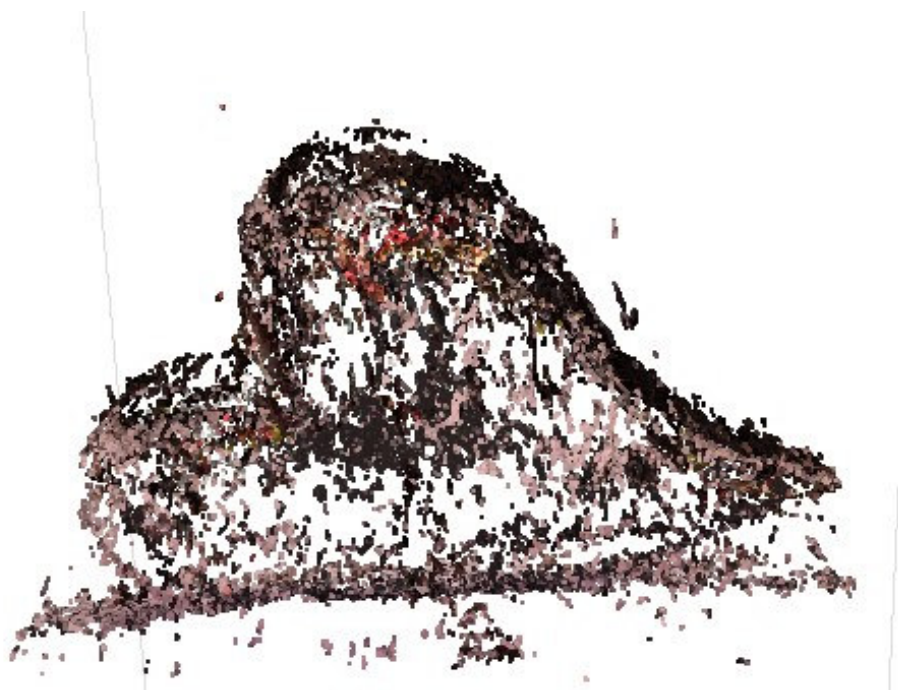
Model srca izrađen je na sličan način kao i model vaze. Prilikom očitavanja markera, program je prepoznao marker na objektu zbog svoje reflektivne površine, a ne na podlozi kao što je to prikazano na slici 93. Svaka slika je ručno pregledana te su se markeri uklanjali i dodavali ručno. Referentni model srca izrađen je u ultra visokoj kvaliteti, a u oblaku točaka se nazire oblik objekta. Međutim, kada se izradi oplošje, model postaje neprepoznatljiv. Isto se dogodilo i sa srcem prekrivenim puderom. Pogreška kod referentnog modela nastala je zbog previše reflektirajuće površine i nedostatka kontrasta s pozadinom. Dodavanje maski ne bi riješilo problem, jer bi rezultat bio sličan kao kod vaze, gdje bi se samo srednji dio srca rekonstruirao.



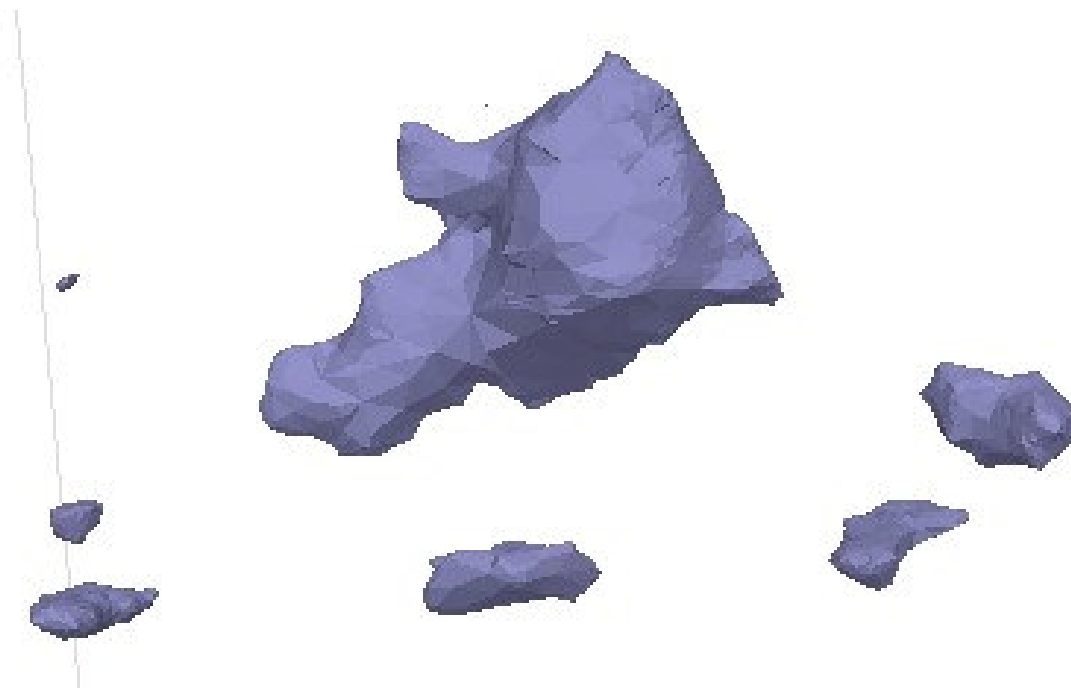
Slika 93. Pogreška detekcije markera

- ☒ **Srce referentno (79 cameras, 26 markers, 9,768 points) [S]**
 - ▶ 📁 Cameras (79/79 aligned)
 - ▶ 📁 Components (1)
 - ▶ 📁 Markers (26)
 - ▶ 📁 Scale Bars (1)
 - Tie Points (9,768 points)
 - 📄 Depth Maps (19, Ultra high quality, Mild filtering)
 - ☐ Dense Cloud (714,204 points, High quality)
 - ◆ 3D Model (6,670 faces, Ultra high quality)










Slika 94. Tijek izrade referentnog modela



Slika 95. Oblak točaka referentnog modela



Slika 96. Referentni model srca

- ▼  **Srce puder (63 cameras, 24 markers, 6,220 points) [S]**
 - ▶  Cameras (63/63 aligned)
 - ▶  Components (1)
 - ▶  Markers (24)
 - ▶  Scale Bars (1)
 - ▶  Tie Points (6,220 points)
 - ▶  Depth Maps (18, Ultra high quality, Mild filtering)
 - ▶  Dense Cloud (1,818,310 points, Ultra high quality)
 - ▶  3D Model (6,452 faces, Ultra high quality)

Slika 97. Tijek izrade modela sa puderom











Slika 98. Oblak točkaka modela sa puderom

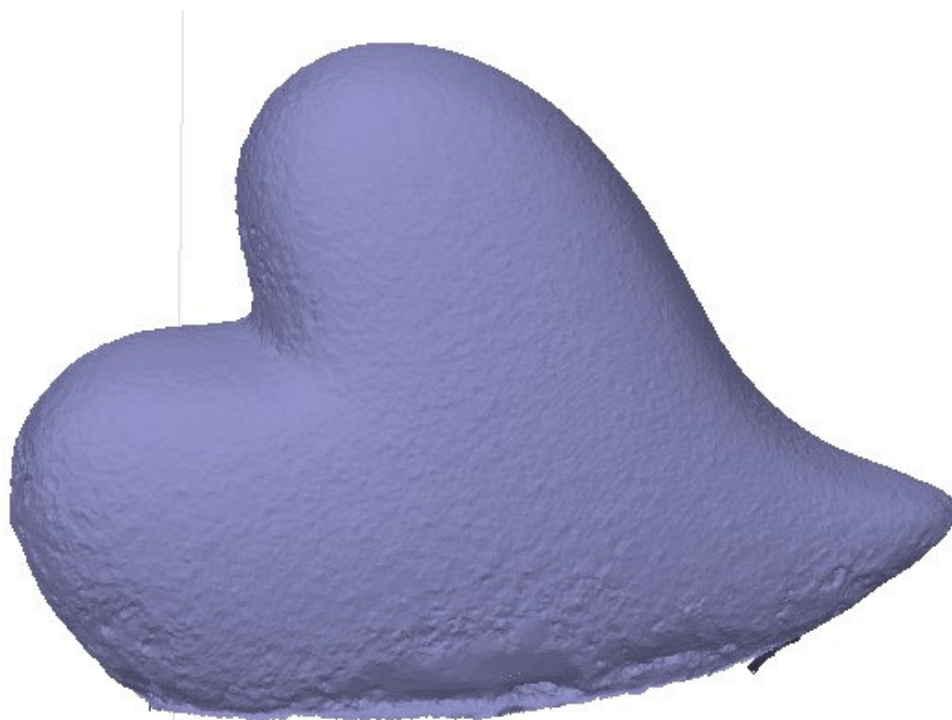


Slika 99. Model srca sa puderom i dodanom teksturom

Model srca prekrivenog puderom bio bi uspješan da je puder bio druge boje, čime bi se stvorio potreban kontrast. Ovaj problem riješen je modelom kojem su dodane smeđe pudraste mrlje. Taj model, iako je rekonstruiran u visokoj kvaliteti, vjerno prikazuje original.

- ▼  **Srce šareno (126 cameras, 26 markers, 21,817 points) [S]**
 - ▶  Cameras (126/126 aligned)
 - ▶  Components (1)
 - ▶  Markers (26)
 - ▶  Scale Bars (1)
 - Tie Points (21,817 points)
 -  Depth Maps (114, High quality, Moderate filtering)
 -  Dense Cloud (3,345,091 points, High quality)
 -  3D Model (287,151 faces, High quality)

Slika 100. Tijek izrade modela sa šarenim puderom

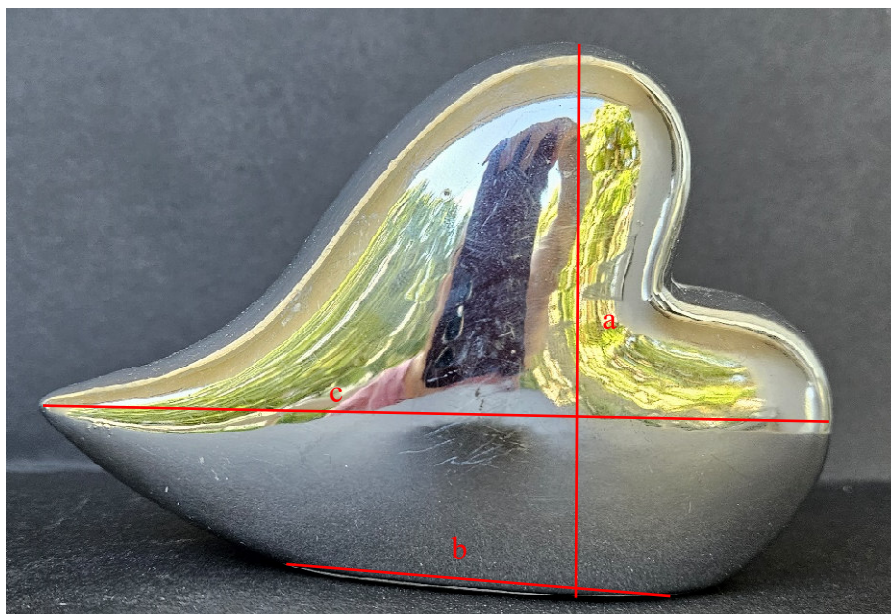


Slika 101. Model sa prošaranim puderom



Slika 102. Model sa dodanom teksturom

U tablici 6. prikazane su visina i širina srca te se pokazalo da je model veličinom vjeran originalu, dok je pogreška mjerila, kao i kod ostalih modela, iznosila 0.



Slika 103. Mjerene duljine

Tablica 6. Usporedba mjerenih duljina srca

Položaj	Stvarna duljina (cm)	Šareni puder (cm)
Visina (a)	8.20	8.15
Širina dna (b)	7.60	7.47
Najveća širina (c)	12.20	12.10

Scale Bars	Distance (m)	Accuracy (m)	Error (m)
<input checked="" type="checkbox"/> target 35_target 41	0.005000	0.000100	-0.000000
Total Error			
Control scale bars			0.000000
Check scale bars			

Slika 104. Parametri mjerila

ZAKLJUČAK

Ovaj rad ukazuje na složenost i važnost prilagodljivosti u procesu rekonstrukcije 3D modela. Raznolikost metoda i tehnika korištenih u procesu naglašava kako brojne varijable, poput broja fotografija, rezolucije i osvjetljenja, značajno utječe na konačne rezultate. Primjeri rekonstrukcije objekata pokazali su kako reflektirajuće površine i nedostatak kontrasta s pozadinom mogu uzrokovati poteškoće u stvaranju preciznih 3D modela. Posebno je važno napomenuti da statična kamera nije uvijek najbolje rješenje, jer pomicanje kamere pod određenim kutovima može smanjiti odsjaje, kao što se pokazalo kod kupačice i jabuke. Stvaranje sjena pomoću drugih objekata ili ruke može dodatno poboljšati kvalitetu modela. Dodavanje trake ili pudera, kao u slučaju trokuta i vaze, može poboljšati vidljivost i kontrast objekta, čime se postiže kvalitetnija rekonstrukcija.

Također, korištenje maskiranja, kao u slučaju trokuta, omogućava programu da preciznije očita objekt čak i kada se stapa s pozadinom. Generiranje modela u nižoj rezoluciji može poslužiti za stvaranje približnih modela koji se koriste za generiranje maski, što značajno skraćuje vrijeme obrade, posebno kada je riječ o velikom broju slika. Na primjer, izrada modela niske kvalitete, automatsko maskiranje i popravci kupačice s 469 fotografija trajali su znatno kraće, nego ručno maskiranje 170 fotografija trokuta. Primjeri rekonstrukcije svijećnjaka i jabuke pokazali su kako visoka kvaliteta modela može utjecati na točnost mjerenja, dok su primjeri vaze i srca istaknuli važnost stvaranja kontrasta s pozadinom i matiranja reflektirajućih površina za uspješnu rekonstrukciju. Dodavanje teksture može pomoći u rekonstruiranju boja i smanjenju vidljivosti manjih nedostataka na modelu. To je vidljivo na primjeru svijećnjaka gdje su sitne rupice postale manje vidljive nakon dodavanja teksture.

Analiza ovih primjera pokazuje da je iterativni proces popravaka i optimizacije ključan za postizanje najboljih mogućih rezultata. U konačnici, potrebno je sveobuhvatno razumijevanje tehnika rekonstrukcije, kao i fleksibilnost i prilagodljivost u primjeni tih tehnika ovisno o specifičnostima objekata, kako bi se postigli precizni i kvalitetni 3D modeli. Važno je prepoznati i prilagoditi se izazovima specifičnim za svaki objekt, bilo da se radi o reflektivnosti, kontrastu, ili kompleksnosti oblika, kako bi se postigli najbolji rezultati.

LITERATURA

Hartley, R., & Zisserman, A. (2003). Image-based modeling of surfaces with specular highlights.

Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., & Boehm, J. (2023). Close-range photogrammetry and 3D imaging. Walter de Gruyter GmbH & Co KG. (20.05.2024.)

Surmen, H. K. (2023). Photogrammetry for 3D reconstruction of objects: Effects of geometry, texture and photographing <https://www.ias-iss.org/ojs/IAS/article/view/2887>. *Image Analysis and Stereology*, 42(2), 51-63. <https://doi.org/10.5566/ias.2887>

POPIS URL-ova

URL 1. <https://rd.nytimes.com/projects/capturing-images-for-photogrammetry> (11.01.2024.)

URL 2. <https://www.youtube.com/watch?v=Q8edLfwNzxU> (28.05.2024.)

URL 3. <https://formlabs.com/blog/photogrammetry-guide-and-software-comparison/> (21.05.2024.)

URL 4. <https://alexelvisbadillo.weebly.com/gvals-resources.html> (14.03.2024.)

URL 5. <https://www.samsung.com/us/smartphones/galaxy-s23/specs/> (21.05.2024.)

URL 6. <https://www.youtube.com/watch?v=NzE7qj20Xwo> (21.05.2024.)

URL 7. <https://www.fonearena.com/blog/384206/samsung-galaxy-s23-galaxy-s23-plus-price-specifications.html> (21.05.2024.)

URL 8. <https://www.youtube.com/watch?v=GZtEGi5KDsQ> (14.03.2024.)

URL 9. <https://www.youtube.com/watch?v=nWh51Ipp5Sc> (14.03.2024.)

URL 10. <https://www.youtube.com/watch?v=uwdgLRkBaOM> (14.03.2024.)

URL 11. <https://daruvarski-portfolio.net/augustinciceva-kupacica/> (21.05.2024.)

URL 12. <https://dgu.gov.hr/geodetsko-informaticki-rjecnik/163?slovo=t> (11.01.2024.)

URL 13. <https://www.agisoft.com/> (16.05.2024.)

URL14. Agisoft Metashape Professional Edition priručnik. (2.1). Agisoft LLC.

Preuzeto sa <https://www.agisoft.com/downloads/user-manuals> (16.05.2024.)

POPIS SLIKA

Slika 1. Horizontalno snimanje objekata (URL 1).....	3
Slika 2. Vertikalno snimanje objekata (URL 1).....	3
Slika 3. Samsung Galaxy S23+ (URL 7)	6
Slika 4. Rotirajući stol sa obilježenim markerima	6
Slika 5. Paleta markera (URL4)	8
Slika 6. Augustinčičeva kupačica.....	11
Slika 7. Usavršavanje fotografija	12
Slika 8. Set Majezkovih trokuta	13
Slika 9. Prvi način snimanja majezkovog trokuta	14
Slika 10. Drugi način snimanja majzekovog trokuta	15
Slika 11. Jabuka.....	16
Slika 12. Prikaz načina snimanja jabuke	17
Slika 13. Svijećnjak.....	18
Slika 14. Prikaz načina snimanja svijećnjaka.....	19
Slika 15. Vaza	20
Slika 16. Prvi način snimanja vaze.....	21
Slika 17. Drugi način snimanja	21
Slika 18. Prikaz snimanja vaze sa puderom	22
Slika 19. Prikaz snimanja vaze četvrtim načinom.....	22
Slika 20. Metalno srce	23
Slika 21. Referentni način snimanja.....	24
Slika 22. Snimanje objekta sa puderom	25
Slika 23. Snimanje sa prošaranim puderom	25
Slika 24. Parametri za pronalazak markera	27
Slika 25. Parametri za fotogrametrijsku orijentaciju fotografija.....	29
Slika 26. Parametri za izradu gustog oblaka točaka.....	30
Slika 27. Korišteni parametri za izradu oplošja	31
Slika 28. Parametri kalibracije boja	32
Slika 29. Parametri za izradu teksture	33
Slika 30. Izlazni rezultati kupačice izrađenoj u srednjoj kvaliteti.....	34
Slika 31. Kupačica izrađena u srednjoj kvaliteti	35
Slika 32. Bliži prikaz problematičnih područja.....	35

Slika 33. Stopalo kupačice izrađene u srednjoj kvaliteti.....	36
Slika 34. Popravak generirane maske	37
Slika 35. Tijek izrade modela u visokoj kvliteti.....	38
Slika 36. Pročišćeni oblak točaka kupačice u visokoj kvaliteti.....	38
Slika 37. Model izrađen pomoću dubinskih karata	39
Slika 38. Model izrađen pomoću dubinskih karata	40
Slika 39. Soplo izrađeno pomoću dubinskih karata	40
Slika 40. Model izrađen na temelju oblka točaka	41
Slika 41.. Model izrađen na temelju oblka točaka	41
Slika 42. Prikaz mjerenih duljina	42
Slika 43. Parametri mjerila.....	43
Slika 44. Korištena podešenja	44
Slika 45. Tijek izrade modela trokuta sa i bez maski.....	45
Slika 46. Oblak točaka trokuta bez maskiranja	45
Slika 47. Model trokuta bez maskiranja.....	46
Slika 48. Maskiranje trokuta	47
Slika 49. Maskiranje trokuta	47
Slika 50. Oblak točaka trokuta izrađen sa maskiranjem	48
Slika 51. Model trokuta izrađen sa maskiranjem	48
Slika 52. Model trokuta sa teksturom.....	49
Slika 53. Tijek izrade modela trokuta	50
Slika 54. Oblak točaka	51
Slika 55. Model izrađen na temelju oblaka točaka.....	51
Slika 56. Prikaz modela sa teksturom	52
Slika 57. Prikaz modela sa teksturom	52
Slika 58. Model izrađen na temelju dubinskih karata	53
Slika 59. Prikaz modela sa teksturom	53
Slika 60. Parametri mjerila za sve modele	54
Slika 61. Tijek izrade svih modela	56
Slika 62. Model jabuke u niskoj kvaliteti.....	57
Slika 63. Model jabuke u visokoj kvaliteti.....	57
Slika 64. Model jabuke u visokoj kvaliteti sa maskiranjem.....	58
Slika 65. Bliži prikaz peteljke	59

Slika 66. Model jabuke sa teksturom	59
Slika 67. Mjerene duljine jabuke.....	60
Slika 68. Parametri mjerila.....	61
Slika 69. Uređeni oblaci točaka dviju polovica.....	62
Slika 70. Prikaz ne uređenog oblaka točaka dviju polovica.....	62
Slika 71. Parametri zaglađivanja modela	63
Slika 72. Konačni model svijećnjaka	64
Slika 73. Ne zaglađeni dio svijećnjaka.....	64
Slika 74. Zaglađeni dio svijećnjaka.....	65
Slika 75. Model svijećnjaka sa teksturom.....	65
Slika 76. Mjerene duljine svijećnjaka	66
Slika 77. Parametri mjerila.....	67
Slika 78. Prikaz tijeka izrade referentne vaze	68
Slika 79. Referentni model bez maskiranja.....	69
Slika 80. Maskiranje objekta.....	69
Slika 81. Referentni model sa maskiranjem.....	70
Slika 82. Tijek izrade referentnog modela	70
Slika 83. Referentni model.....	71
Slika 84. Model sa dodanom teksturom.....	71
Slika 85. Tijek izrade vaze sa puderom.....	72
Slika 86. Model vaze sa puderom	73
Slika 87. Model vaze sa puderom sa dodanom teksturom	73
Slika 88. Tijek izrade modela sa polupuderom	74
Slika 89. Model vaze sa polupuderom	74
Slika 90. Model vaze sa polupuderom sa dodanom teksturom	75
Slika 91. Prikaz mjerenih duljina vaze.....	76
Slika 92. Parametri mjerila.....	76
Slika 93. Pogreška detekcije markera	77
Slika 94. Tijek izrade referentnog modela	78
Slika 95. Oblak točaka referentnog modela	78
Slika 96. Referentni model srca	79
Slika 97. Tijek izrade modela sa puderom	79
Slika 98. Oblak točaka modela sa puderom	80

Slika 99. Model srca sa puderom i dodanom teksturom	80
Slika 100. Tijek izrade modela sa šarenim puderom	81
Slika 101. Model sa prošanim puderom.....	82
Slika 102. Model sa dodanom teksturom	82
Slika 103. Mjerene duljine	83
Slika 104. Parametri mjerila.....	83

POPIS TABLICA

Tablica 1. Usporedba mjerenih duljina kupačice	42
Tablica 2. Usporedba mjerenih duljina trokuta	54
Tablica 3. Usporedba mjerenih duljina jabuke.....	60
Tablica 4. Usporedba mjerenih duljina svijećnjaka	66
Tablica 5. Usporedba mjerenih duljina vaze	76
Tablica 6. Usporedba mjerenih duljina srca.....	83

PRILOZI

Prilog 1. CD sa rezultatima istraživanja.



Maja Zajc

Kućna : Silvije Strahimira Kranjčevića 33, 43500, Daruvar, Hrvatska

E-adresa: mzajc996@gmail.com **Telefonski broj:** (+385) 98931672

Spol: Žensko **Datum rođenja:** 8 ožu 1996 **Državljanstvo:** hrvatsko

RADNO ISKUSTVO

[28 ruj 2020 – Trenutačno]

Geodetska tehničarka

Ured ovlaštenog inženjera vl. Ivica Skenderović

Mjesto: 44250 Petrinja | **Zemlja:** Hrvatska

[7 ruj 2016 – 28 velj 2019]

Prodavačica odjeće, obuće i galanterije

Hennes & Mauritz

Mjesto: 21000 Split | **Zemlja:** Hrvatska

[21 ruj 2018 – 2 srp 2019]

Prodavačica odjeće, obuće i galanterije

Comma

Mjesto: 21000 Split | **Zemlja:** Hrvatska

OBRAZOVANJE I OSPOSOBLJAVANJE

[27 ruj 2021 – 21 ruj 2022]

univ. bacc. ing. geod. et geoinf.

Sveučilište u Zagrebu, Geodetski Fakultet <https://www.geof.unizg.hr/>

Mjesto: 10000 Zagreb | **Zemlja:** Hrvatska

[6 ruj 2010 – 16 svi 2014]

Geodetska tehničarka

Geodetska tehnička škola <https://www.geoskola.hr/>

Mjesto: 10000 Zagreb | **Zemlja:** Hrvatska

JEZIČNE VJEŠTINE

Materinski jezik/jezici: hrvatski

Drugi jezici:

engleski

SLUŠANJE C1 ČITANJE C1 PISANJE B2

GOVORNA PRODUKCIJA B2 GOVORNA INTERAKCIJA B2

Razine: A1 i A2: temeljni korisnik; B1 i B2: samostalni korisnik; C1 i C2:iskusni korisnik