

Izrada računalnog modela uporabom 3D skenera i postupka fotogrametrije

Grandverger, Lovro

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Bjelovar University of Applied Sciences / Veleučilište u Bjelovaru**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:144:248506>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-21**



Repository / Repozitorij:

[Digital Repository of Bjelovar University of Applied Sciences](#)



VELEUČILIŠTE U BJELOVARU
PREDDIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ MEHATRONIKA

**Izrada računalnog modela uporabom 3D skenera i postupka
fotogrametrije**

Završni rad br. 06/MEH/2022

Lovro Grandverger

Bjelovar, lipanj 2022.



Veleučilište u Bjelovaru
Trg E. Kvaternika 4, Bjelovar

1. DEFINIRANJE TEME ZAVRŠNOG RADA I POVJERENSTVA

Student: **Lovro Grandverger**

JMBAG: 0314021964

Naslov rada (tema): **Izrada računalnog modela uporabom 3D skenera i postupka fotogrametrije**

Područje: **Tehničke znanosti**

Polje: **Strojarstvo**

Grana: **Aditivne tehnologije**

Mentor: **dr.sc. Tomislav Pavlic**

zvanje: **viši predavač**

Članovi Povjerenstva za ocjenjivanje i obranu završnog rada:

1. **Ivana Jurković, mag.educ.philol.angl.et germ., predsjednik**
2. **dr.sc. Tomislav Pavlic, mentor**
3. **Danijel Radočaj, mag.inž.meh., član**

2. ZADATAK ZAVRŠNOG RADA BROJ: 06/MEH/2022

U sklopu završnog rada potrebno je:

1. Objasniti osnove i načine 3D skeniranja.
2. Opisati vrste komercijalnih 3D skenera.
3. Proučiti i opisati metode i mogućnosti dobivanja 3D modela korištenjem amaterske opreme.
4. Navesti postupke fotogrametrije i vizualizacije objekata.
5. Izraditi 3D model i opisati postupak izrade 3D modela korištenjem komercijalnog 3D skenera.
6. Izraditi 3D model i opisati postupak izrade 3D modela korištenjem improviziranog 3D skenera.

Datum: 17.06.2022. godine

Mentor: **dr.sc. Tomislav Pavlic**



Zahvala

Zahvaljujem roditeljima, obitelji i prijateljima na pruženoj podršci tijekom studiranja. Posebno zahvaljujem svom mentoru dr. sc. Tomislavu Pavlicu, mag. ing. mech. na pruženom vremenu, podršci i stručnim savjetima tijekom izrade završnog rada.

Sadržaj

1.	Uvod.....	1
2.	Općenito o 3D skenerima	2
3.	Tehnologije 3D skeniranja	3
3.1.	<i>Kontaktna metoda</i>	3
3.2.	<i>Beskontaktna metoda.....</i>	4
3.2.1.	<i>Beskontaktni aktivni skeneri.....</i>	4
3.2.2.	<i>Beskontaktni pasivni skeneri</i>	9
4.	Lasersko 3D skeniranje.....	12
4.1	<i>Podjela laserskih 3D skenera prema načinu mjerenja</i>	13
4.1.1	<i>Laserski pulsni skeneri</i>	13
4.1.2	<i>Skeneri faznog pomaka</i>	14
4.1.3	<i>3D skeneri s triangulacijskom metodom mjerenja</i>	15
4.2	<i>Podjela laserskih 3D skenera prema tehnologiji prostornog skeniranja.....</i>	16
4.2.1	<i>Lasersko skeniranje iz zraka.....</i>	16
4.2.2	<i>Lasersko skeniranje sa tla.....</i>	17
4.2.3	<i>Ručni laserski skeneri.....</i>	19
5.	3D skeniranje postupkom fotogrametrije.....	20
5.1	<i>Terestrička fotogrametrija (snimanje sa tla)</i>	21
5.2	<i>Aerofotogrametrija (snimanje iz zraka).....</i>	21
6.	Izrada računalnog 3D modela korištenjem MakerBot Digitizer laserskog skenera.....	22
6.1	<i>Pripremanje MakerBot Digitizer-a.....</i>	23
6.2	<i>Izrada računalnog 3D modela pomoću MakerBot Digitizer-a</i>	24
7.	Izrada računalnog 3D modela korištenjem improviziranog 3D skenera.....	29
7.1	<i>Korišteni računalni programi.....</i>	29
7.2	<i>Snimanje digitalnih fotografija za obradu.....</i>	29
7.3	<i>Obrada digitalnih fotografija</i>	30
7.4	<i>Poravnavanje fotografija.....</i>	32
7.5	<i>Izrada gustog oblaka točaka.....</i>	34
7.6	<i>Izrada mreže</i>	37
7.7	<i>Izrada teksture</i>	40
7.8	<i>Priprema i ispis 3D modela</i>	42
8.	ZAKLJUČAK.....	46
9.	LITERATURA	47
10.	OZNAKE I KRATICE.....	49
11.	SAŽETAK.....	50
12.	ABSTRACT	51

1. Uvod

Želju za zapisivanjem stvarnoga svijeta možemo vidjeti već u dalekoj prošlosti kada su naši preci crtali po zidovima pećina i izrađivali razne figurice i skulpture. Znan napredak u zapisivanju i objektivnom dokumentiranju stvarnog svijeta dogodio se prvom polovicom 19. stoljeća izumom fotografije (slika 1.1 prva zabilježena fotografija). Iako fotografija, uključujući i današnje digitalne načine fotografiranja, omogućuje objektivan prikaz stvarnih objekata u svijetu ona također ima i vrlo značajna ograničenja prilikom prikazivanja trodimenzionalnog svijeta. Daljnjim napretkom tehnologije, oko 1980. godine, došlo je do izuma prvog sustava za 3D rekonstrukciju objekata.

Zbog nedovoljno razvijene optičke tehnologije, prvi 3D skeneri koristili su kontaktne sonde kako bi se stvorila slika skeniranog objekta. Ova metoda je bila izuzetno spora budući da su sonde morale fizički dotaknuti skenirani objekt tisućama puta kako bi se sakupilo dovoljno digitalnih točaka za stvaranje vjernog 3D modela. U kasnim 80-ima, razvojem optičke tehnologije i daljnjim inovacijama, došlo je do razvoja beskontaktnih skenera koji su koristili analogne video kamere, te računala sa vrlo malo procesorske snage i video memorije što je znatno ograničavalo kvalitetu modela. Povećanjem računalne memorije i napretkom računalnih procesora u 90-ima, 3D skeneri su doživjeli znatan napredak te s time dolazi do pojave prvih komercijalnih 3D skenera. [1]



Slika 1.1 Pogled s prozora iz Le Gras-a [1]

2. Općenito o 3D skenerima

3D skener je uređaj koji procesom mjerenja i snimanja površine stvarnoga objekta ili okoliša prikuplja podatke o njihovom obliku i obilježjima. Prikupljeni podaci se spremaju na računalo u obliku oblaka točaka te se najčešće upotrebljavaju za izradu digitalnih 3D modela. Uporaba 3D skenera, zbog svojih mnogih prednosti, može se vidjeti u raznim industrijama. U inženjerstvu, mogućnost skeniranja bilo kojega predmeta i stvaranje vjernog digitalnog modela ubrzava i poboljšava postupke reverznog inženjerstva i izrade prototipa. Primjena 3D skeniranja od donedavno je došla do izražaja i u industrijama vezanim za zdravstvo poput izrade protetičkih udova, dentalnih usadaka, uzimanja potrebnih mjera, te mnogih drugih primjena. Osim inženjerstva i zdravstvenih industrija, 3D skeniranje postaje značajno i u arhitekturi za izradu preciznih modela građevina, muzejskim djelatnostima za izradu digitalnih modela raznih skulptura, figura i raznih drugih povijesnih artefakata, u animaciji i industriji video igara za brzu i preciznu izradu digitalnih modela, te u raznim drugim industrijama. [2,3]

Izrada i dizajn 3D skenera može se bazirati na raznim vrstama tehnologija. Svaka od tehnologija izrade ima vlastita ograničenja, ali i prednosti. Zbog toga postoje različite vrste skenera kao što su CT (eng. *Computerised Tomography*) skeneri, skeneri sa okretnim postoljem, PCMM (eng. *Portable Coordinate Measuring Machines*) skeneri, ručni skeneri, zemaljski skeneri i mobilni skeneri. Iako navedene vrste skenera koriste različite tehnologije i namijenjeni su za različite primjene, sve vrste 3D skenera spremaju podatke u obliku oblaka točaka. Spremanje podataka u jednakim oblicima omogućuje kombiniranje podataka u naknadnoj obradi, što poboljšava završni model predmeta ili okoliša.

Za razliku od običnih kamera, 3D skeneri ne bilježe samo informacije o boji već prikupljaju i detaljne informacije o udaljenosti predmeta ili okoliša unutar njihovog vidnog polja. Određeni 3D skeneri mogu zabilježiti i ostale optičke aspekte poput boje, odsjaja itd. Kod pojedinih, složenijih slučajeva, skeniranjem iz samo jednog kuta nije moguće proizvesti cjelokupan i detaljan model. U tom slučaju potrebno je izvesti višestruko skeniranje iz više različitih kutova i dobivene rezultate potrebno je smjestiti u zajednički referentni sustav. Procesom spajanja dobivenih rezultata moguće je proizvesti detaljan i cjelokupan model skeniranog predmeta ili okoliša. Opisani proces najčešće se naziva tok 3D skeniranja. [2]

3. Tehnologije 3D skeniranja

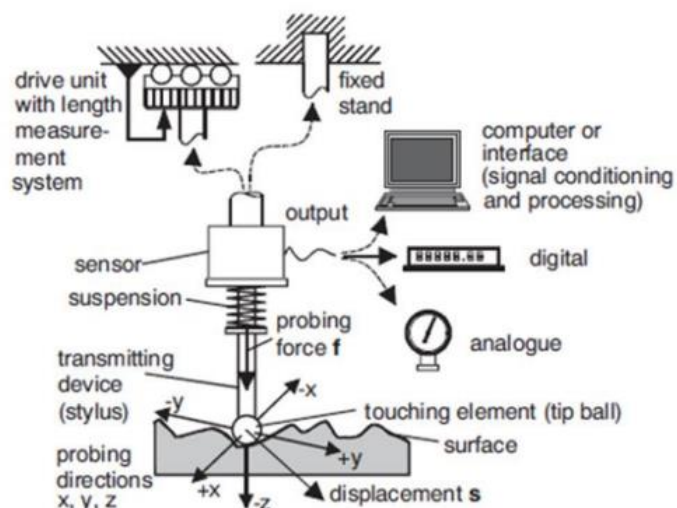
Glavna podjela tehnologija 3D skeniranja je na kontaktne i beskontaktne metode. Beskontaktne metode se daljnjom podjelom dijele na aktivne i pasivne metode. U svaku od navedenih metoda skeniranja spadaju razne tehnologije pomoću kojih se može generirati digitalni 3D model. [4]

3.1. Kontaktna metoda

Kontaktne 3D skeneri koriste ticala kojima fizički dotiču predmet koji je čvrsto učvršćen u mjestu (slika 3.1.1). Taktilno ticalo pomiče se površinom skeniranog objekta čime prikuplja informacije o izgledu objekta. Kada je potrebna veća preciznost ili kada su u pitanju tehnički kompliciraniji izgledi objekta, koristi se skener sa mjernom rukom na čijem se kraju nalazi taktilno ticalo. Mehanička ruka skenera može biti automatizirana ili ručno kontrolirana. Doticanjem površine objekta skener bilježi položaj vrha ticala u koordinatnom sustavu. Pomoću zabilježenih podataka kreira se oblak točaka koji je potreban za izradu digitalnog 3D modela. [4]

Kontaktno 3D skeniranje najčešće se primjenjuje u kontroli kvalitete zbog njihove visoke preciznosti i mogućnosti skeniranja transparentnih i reflektivnih dijelova. Najveći nedostaci kontaktnih 3D skenera su mala brzina skeniranja i mogućnost oštećenja skeniranog objekta prilikom dodira ticala s površinom. [4]

Najčešća vrsta kontaktnih 3D skenera su CMM (engl. *Coordinate Measuring Machines*) i PCMM. CMM je kontaktni uređaj koji služi za mjerenje geometrijskih karakteristika objekta, te može mjeriti u tri ortogonalne osi, x, y i z. PCMM su lagani, prijenosni uređaji sa jednakom svrhom kao i CMM uređaji. PCMM uređaji zahtijevaju ručno upravljanje te imaju manju točnost mjerenja u usporedbi s CMM uređaja. [5]



Slika 3.1.1 Osnovna konfiguracija ticala kontaktnog 3D skenera [5]

3.2. Beskontaktna metoda

3D skeneri bazirani na beskontaktnim metodama ne dotiču površinu objekta prilikom postupka skeniranja. Beskontaktna metoda mogu biti aktivne ili pasivne, a krajnji rezultat je vrlo precizan oblak točaka koji se dalje može koristiti pri izradi digitalnog 3D modela. Glavna prednost beskontaktnih metoda naspram kontaktnih metoda skeniranja je brže i preciznije skeniranje objekta. [4]

3.2.1. Beskontaktni aktivni skeneri

Aktivni skeneri emitiraju svjetlost ili određene vrste radijacije na skenirani objekt. Detektiranjem refleksije svjetlosti ili radijacije uređaj prikuplja podatke o izgledu skeniranog objekta ili okoliša. Najčešće korišteni beskontaktni aktivni skeneri su laserski skeneri, 3D skeneri sa strukturiranim svjetlom, modulirani svjetlosni skeneri, skeneri s magnetskom rezonancijom, računalna tomografija, itd. [4]

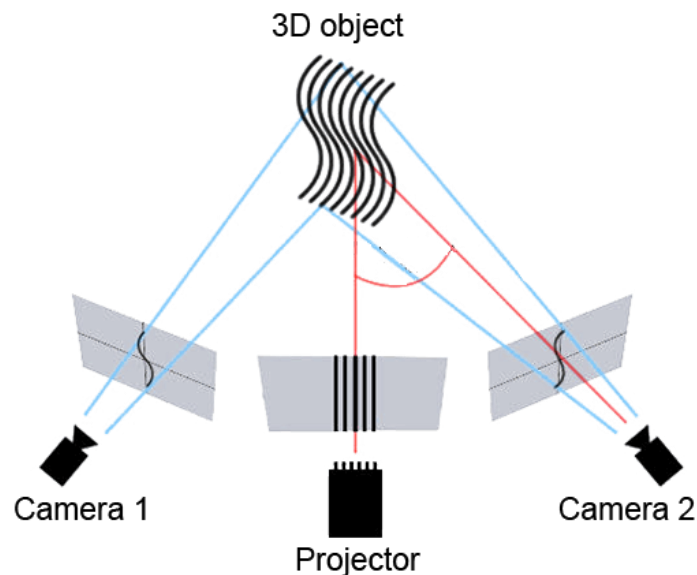
3.2.1.1. 3D skeneri sa strukturiranim svjetlom

Strukturirano svjetlosni skeneri projiciraju svjetlosni uzorak na skenirani predmet te detektiraju deformacije svjetlosnoga uzorka na predmetu (slika 3.2.1.1.1). Projicirani svjetlosni uzorak može biti jednodimenzionalan ili dvodimenzionalan. [4]

Primjer jednodimenzionalnog uzorka je linija. Linija se projicira na predmet pomoću *sweeping* lasera ili LCD projektora. Kamera koja je malo odmaknuta od projektora gleda oblik linije, te postupkom sličnim triangulaciji skener izračunava udaljenost svake pojedine točke u projiciranoj liniji. U slučaju jedno linijskog uzorka, linija se pomiče po vidnom polju, te se informacije prikupljaju za svaku liniju pojedinačno. [4]

Primjer dvodimenzionalnog uzorka je mreža ili linijske pruge. Kamera gleda deformacije na projiciranom uzorku, te skener proračunava udaljenost svake točke u uzorku. Prilikom skeniranja kompleksnijih predmeta potrebna je primjena posebnih algoritama za više linijsku lasersku triangulaciju. [4]

Prednost 3D skenera sa strukturiranim svjetlom je njihova brzina skeniranja. Umjesto skeniranja svake točke zasebno, oni mogu skenirati više točki predmeta ili cijelo vidno polje odjednom. Time se smanjuje ili eliminira problem izobličenja pri gibanju. [4]



Slika 3.2.1.1.1 Prikaz rada 3D skenera sa strukturiranim svjetlom [6]

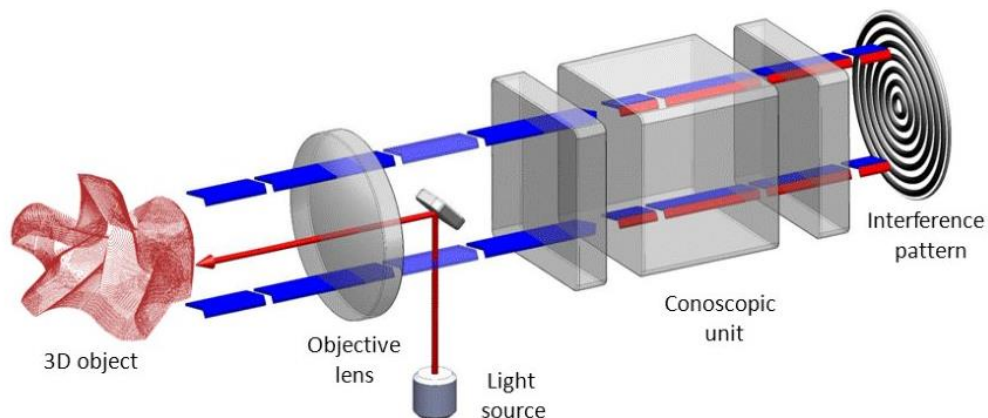
3.2.1.2 3D skeneri sa moduliranim svjetlom

3D skeneri sa moduliranim svjetlom projiciraju svjetlo koje se neprestano mijenja na skenirati predmet. Najčešće, izvor svjetlosti izmjenjuje amplitudu svjetla u sinusoidnom uzorku. Kamera na skeneru detektira reflektirano svjetlo i pomoću vrijednost za koju je uzorak svjetla pomaknut određuje udaljenost koju je taj uzorak svjetla prošao.

Modulirano svjetlo omogućuje 3D skeneru da zanemari svjetlo iz drugih izvora čime se uklanja mogućnost interferencije. [4]

3.1.1.3 Konoskopska holografija

Konoskopska holografija je tehnika bazirana na svojstvu dvostruke refrakcije anizotropnih kristala. U konoskopskim sustavima projicira se laserska zraka, koja se fokusira pomoću leća objektiva, na površinu objekta. Dio raspršenog svjetla odbija se natrag od objekta u sustav i ulazi u konoskopsku jedinicu koja sadrži anizotropni kristal. Anizotropni kristal razdvaja svjetlosnu zraku u dvije ortogonalne polarizacije koje putuju kroz kristal različitim brzinama. Detektira se nastala interferencija na izlazu iz konoskopske jedinice i pomoću algoritama se izračunava udaljenost objekta iz dobivenih podataka. Konoskopski sustavi, gdje je potrebna samo jedna putanja svjetlosne zrake, idealni su za industrijsku uporabu zbog svoje jednostavne izvedbe, visoke stabilnosti i otpornosti prema vibracijama. Princip rada konoskopskog sustava prikazan je na slici 3.1.1.3.1. [2]

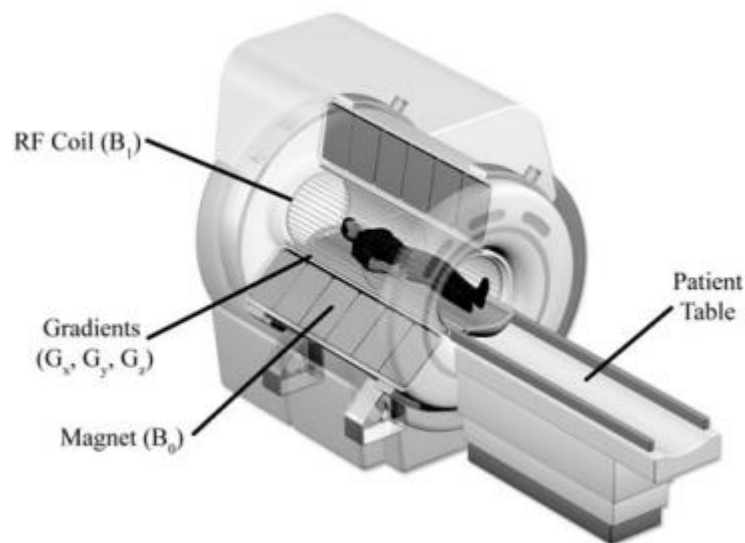


Slika 3.1.1.3.1 Princip rada konoskopskog sustava [2]

3.1.1.4 Skeniranje pomoću magnetske rezonancije

Skeneri bazirani na magnetskoj rezonanciji, skraćeno MR ili MRI (eng. *Magnetic Resonance Imaging*) neinvazivna je tehnologija slikovne dijagnostike koja proizvodi detaljne anatomske slike. Najčešće se koristi za otkrivanje bolesti, dijagnostiku i za praćenje terapije. Presjek MR skenera može se vidjeti na slici 3.1.1.4.1.

MR skener iskorištava tjelesna prirodna magnetska svojstva za stvaranje detaljnih slika bilo kojega dijela tijela. Za stvaranje slika upotrebljavaju se protoni vodika zbog svojeg visokog udjela u ljudskom tijelu. U normalnim uvjetima protoni vodika okreću se u tijelu sa nasumično poravnatim osima. MR skener sadrži elektromagnet koji stvara snažno magnetsko polje pod čijim se utjecajem osi protona međusobno poravnaju. Ova pojava stvara magnetski vektor usmjeren duž osi magnetskog polja. Dodatkom radiovalova frekvencije jednakoj rezonantnoj frekvenciji vodika, magnetski vektor se otklanja. Gašenjem izvora radiovalova magnetski vektor vraća se u prvobitno stanje što uzrokuje emitiranje signala (također u području radiovalova). Zavojnice prijavnika se koriste oko snimanog dijela tijela kako bi se poboljšala detekcija emitiranog signala. Intenzitet primljenog signala se precrtava u sivoj skali i izrađuju se slike presjeka. [7]



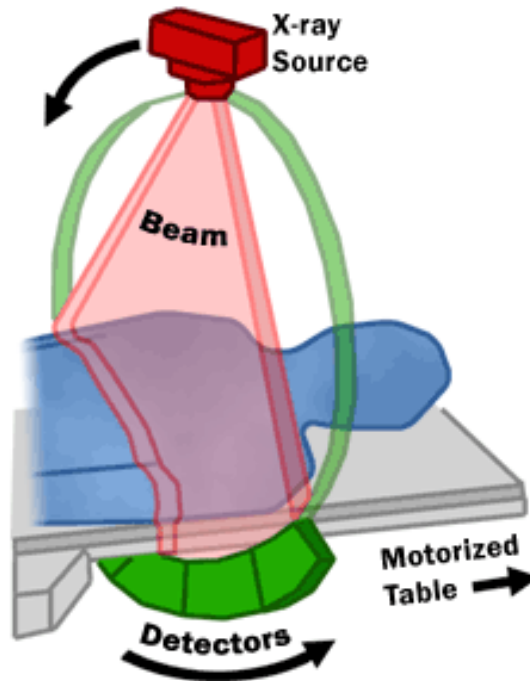
Slika 3.1.1.4.1 Presjek MR skenera [10]

3.1.1.5 Računalna tomografija

Računalna tomografija ili CT (eng. Computed Tomography) je slikovna radiološka metoda stvaranja slika presjeka tijela pomoću rendgenskih zraka. Uski snop rendgenskih zraka usmjerava se u tijelo i brzo se okreće oko tijela pri čemu proizvodi signale koje dalje obrađuje računalo i stvara slike presjeka tijela (slika 3.1.1.5.2). Generirane slike presjeka tijela nazivaju se tomografske slike (primjer tomografskih slika može se vidjeti na slici 3.1.1.5.1). Tomografske slike pružaju mogu pružiti medicinske detaljnije slike u odnosu na uobičajene rendgenske slike. Nakon što računalo prikupi više uzastopnih slika presjeka, one se mogu digitalno spojiti kako bi se stvorila 3D slika tijela koja omogućuje lakšu identifikaciju osnovnih struktura tijela ili moguće tumore i ostale abnormalnosti. [8]



Slika 3.1.1.5.1 Primjer tomografskih slika i rekonstrukcije glave i vrata [9]



Slika 3.1.1.5.2 Prikaz načina skeniranja računalnom tomografijom [11]

3.2.2. Beskontaktni pasivni skeneri

Pasivni skeneri ne emitiraju nijednu vrstu radijacije ili svjetlosti na skenirani objekt. Ova vrsta skenera oslanja se na detekciju reflektiranog zračenja okoline. Većina beskontaktnih pasivnih skenera detektira vidljivu svjetlost budući da je najčešće dostupna, no mogu se koristiti i ostale vrste zračenja kao što je infracrveno zračenje. Budući da pasivni skeneri ne zahtijevaju posebne vrste opreme, već samo digitalne kamere, često su jeftiniji od ostalih vrsta skenera. Najčešće korišteni pasivni skeneri su 3D skeneri bazirani na slici, fotometrijski skeneri, *silhouette* skeneri i stereoskopski video skeneri. [4]

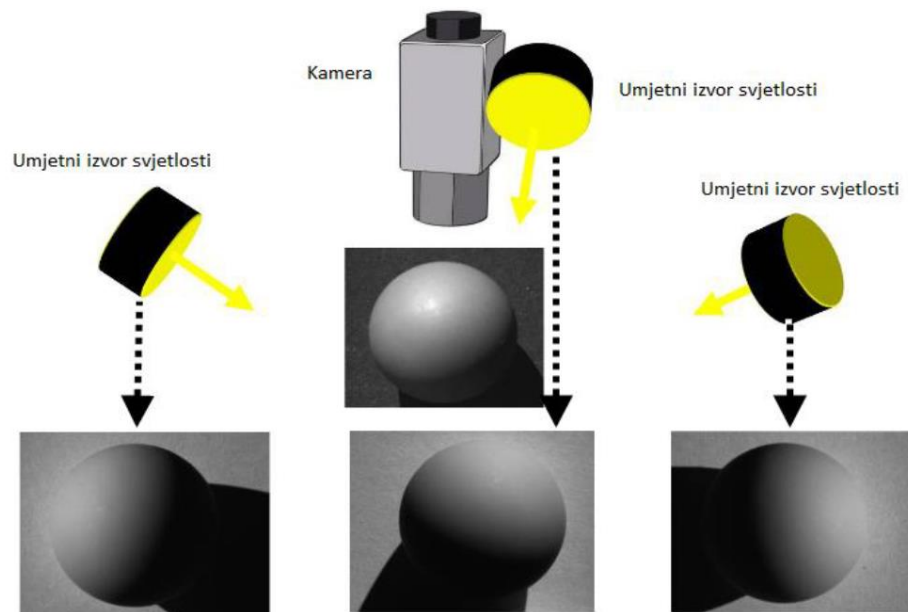
3.2.2.1. 3D skeniranje bazirano na slici

Ova vrsta 3D skenera je bazirana na postupku fotogrametrije. Postupak slikanja skeniranog predmeta sličan je panoramskoj fotografiji, no umjesto uzimanja više slika objekta iz jednog kuta, uzima se više slika iz različitih kutova kako bi se replicirao skenirani predmet. 3D skeniranje bazirano na slici korisno je pri izradi brzih i jednostavnijih modela kao što su modeli zgrada. [4]

3.2.2.2. Fotometrijski skeneri

Fotometrijski skeneri najčešće upotrebljavaju samo jednu kameru, no uzimaju više slika pri različitom osvjetljenju. Ovim načinom rada pokušava se invertirati skenirani predmet kako bi se dobila orijentacija površine u svakom pikselu. [4]

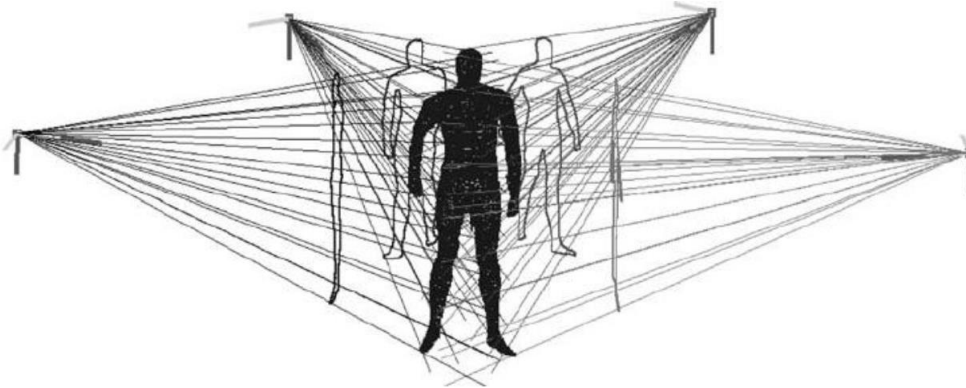
Princip rada fotometrijskih skenera prikazan je na slici 3.2.2.2.1.



Slika 3.2.2.2.1 Princip rada fotometrijskog skenera [2]

3.2.2.3. *Silhouette* skeneri

Silhouette skeneri koriste konture skeniranog predmeta koji se kreiraju iz niza fotografija predmeta iz raznih kutova na kontrastnoj pozadini. Konture predmeta se izvlače i spajaju kako bi se proizvela vizualna aproksimacija trupa predmeta (slika 3.2.2.3.1). Glavni nedostatak ove tehnike skeniranja je nemogućnost skeniranja udubljenja predmeta. [4]



Slika 3.2.2.3.1 Prikaz sustava sjena kod *silhouette* skenera [2]

3.2.2.4. Stereoskopski skeneri

Stereoskopski skeneri najčešće imaju dvije video kamere, malo udaljene jednu od druge, usmjerene na isti objekt. Analiziranjem razlika u dobivenim slikama iz kamera moguće je odrediti udaljenost u svakoj zasebnoj točki na slici. Ova metoda temelji se na istim principima rada kao i ljudski vid. [4]

Primjer stereoskopskog skenera prikazan je na slici 3.2.2.3.2.



Slika 3.2.2.4.1 Primjer stereoskopskog skenera [12]

4. Lasersko 3D skeniranje

3D lasersko skeniranje počelo je revolucionirati naše mogućnosti karakteriziranja površinskih svojstava objekata generiranjem visoko kvalitetnih podataka s preciznošću i točnošću koja prije nije bila moguća. Laserski 3D skeneri mogu se podijeliti u tri glavne kategorije prema načinu mjerenja:

- Pulsni skeneri (eng. *Time of Flight* - TOF)
- Skeneri faznog pomaka (eng. *Phase Shift*)
- Triangulacijska metoda mjerenja (eng. *Laser Triangulation*)

Navedeni načini mjerenja najčešće se koriste zasebno, no u određenim slučajevima mogu se kombinirati kako bi se postigao univerzalniji sistem. Laserski 3D skeneri također se često dijele i prema tehnologiji prostornog skeniranja:

- Lasersko skeniranje iz zraka
- Lasersko skeniranje sa tla
- Ručni laserski skeneri

Glavne prednosti laserskih 3D skenera su brzina i preciznost skeniranja predmeta i okoliša. Podaci prikupljeni 3D skenerom spremaju se u obliku oblaka točaka, te se prikazuje u obliku poligonske mreže. [4]

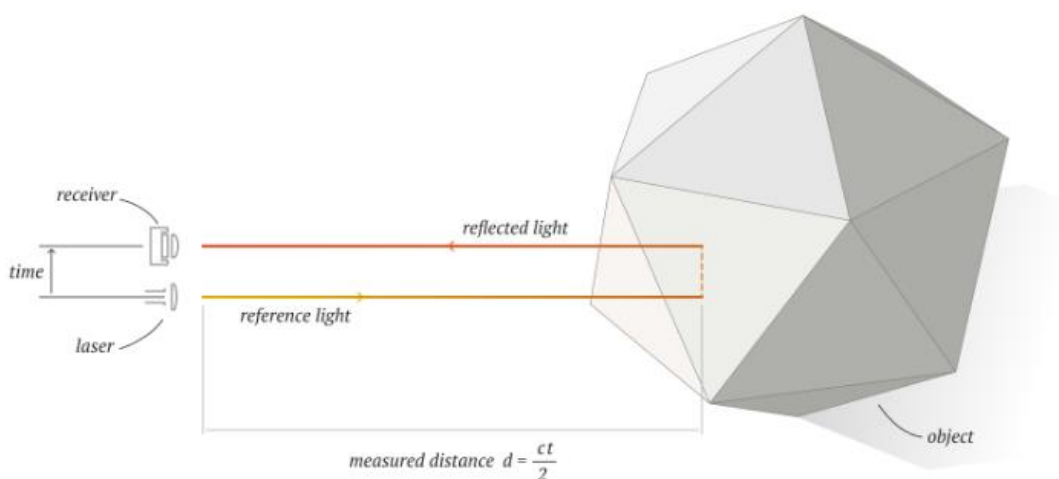
Nedostatak laserskih 3D skenera je visoka cijena cjelokupnog procesa. Često je cijena ručnog snimanja manja, ali zahtijeva veću radnu snagu kao i duže vrijeme za obavljanje zahtjevnijih projekata. Zbog visoke preciznosti i brzine laserskog skeniranja, cijeli proces skeniranja može biti završen u samo jednoj sesiji skeniranja, dok je postupak ručnog skeniranja relativno spor, a može dovesti i do dodatnih poteškoća što na kraju negira prednost niže cijene. [4]

4.1 Podjela laserskih 3D skenera prema načinu mjerenja

4.1.1 Laserski pulsni skeneri

Laserski pulsni skeneri koriste lasersko svjetlo za ispitivanje skeniranog objekta. Glavna komponenta ove vrste skenera je daljinomjer koji mjeri udaljenost do površine skeniranog objekta tako da mjeri potrebno vrijeme emitiranom laserskom svjetlu da se reflektira od površine objekta do detektora u skeneru. Izmjereno vrijeme predstavlja dvostruki put svjetla, od skenera do objekta i obrnuto, te kako bi se dobila ispravna udaljenost potrebno je dobiveno vrijeme podijeliti s 2 i pomnožiti s brzinom svjetlosti (slika 4.1.1.1). Preciznost laserskih pulsni skenera ovisi jedino o tome koliko precizno uređaj može izmjeriti vrijeme. [4]

Laserski daljinomjer detektira jedino udaljenost jedne točke u smjeru gledanja. Zbog toga, skener skenira cijelo vidno polje točku po točku mijenjanjem smjera gledanja daljinomjera tako da detektira ostale točke. Smjer gledanja daljinomjera može se mijenjati rotiranjem daljinomjera ili korištenjem sistema rotacijskih zrcala. Najčešće se koristi metoda sa sistemom rotacijskih zrcala zbog toga što su zrcala lakša, te se mogu mnogo brže rotirati i s većom preciznošću. Laserski pulsni skeneri imaju mogućnost mjerenja udaljenosti aproksimativno od 10 000 do 100 000 točaka po sekundi. Laserski pulsni skeneri također mogu biti i u 2D izvedbi, pa se tada nazivaju TOF kamere (eng. *Time Of Flight Cameras*). [4]



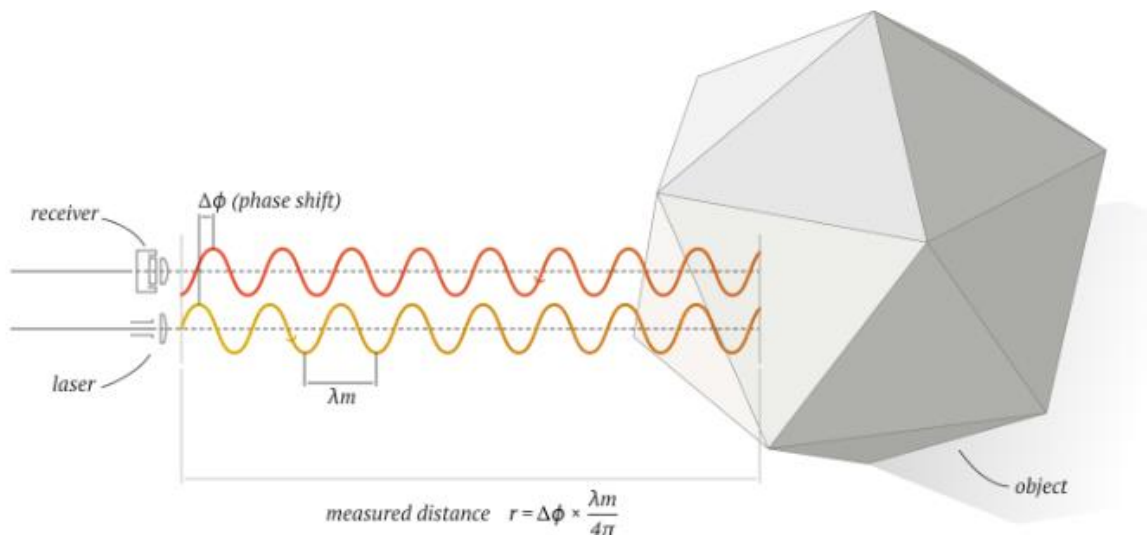
Slika 4.1.1.1 Princip rada laserskog pulsni skenera [13]

4.1.2 Skeneri faznog pomaka

Laserski skeneri faznog pomaka rade tako da uspoređuju fazni pomak u reflektiranom laserskom svjetlu sa standardnom fazom koja se mjeri za usporedbu. Ovaj način mjerenja sličan je pulsnim skenerima, osim što se uspoređujući fazni pomak reflektiranog laserskog svijetla dobiva preciznija izmjera udaljenosti.

U načinu mjerenja faznim pomakom, mjeri se fazni pomak između emitirane i zaprimljene svjetlosti s određenom valnom duljinom (slika 4.1.2.1). Mjerena udaljenost zatim se izračuna pomoću računala ovisno o izmjenom faznom pomaku. Maksimalni domet skenera koji se može mjeriti određenom modulacijom iznosi polovicu modulacijske valne duljine. Mjerenjem s visoko-frekventnom modulacijom pruža preciznije mjerenje duljine, što za posljednju ima manji domet skenera. [4]

Laserski skeneri faznog pomaka imaju veću brzinu skeniranja od laserskih pulsnih skenera, no dobiveni oblak točaka sadrži više smetnji. Također, domet laserskih skenera sa faznim pomakom koji iznosi od 70 do 80 m znatno je manji od laserskih pulsnih skenera koji imaju domet od 200 do 300 m. [4]

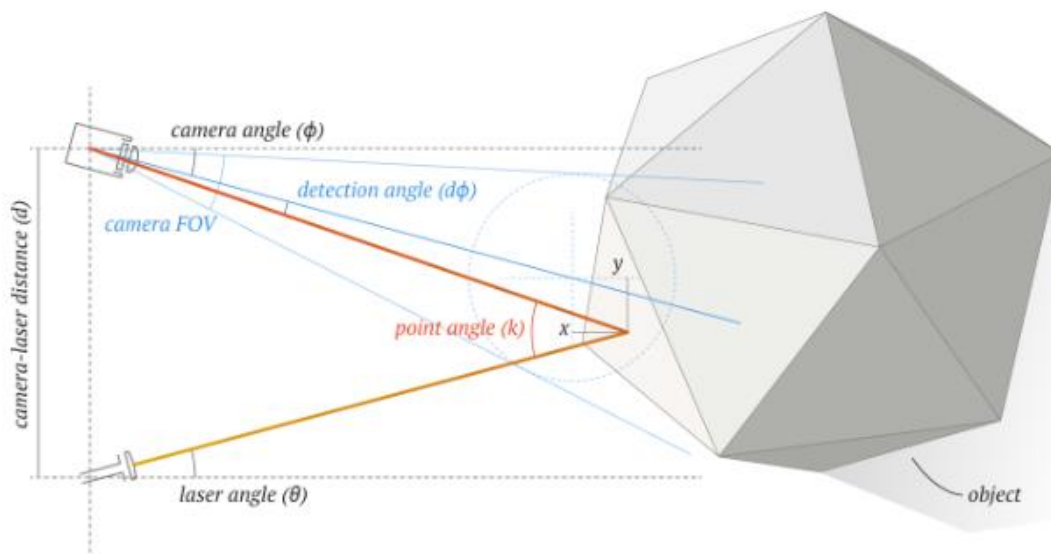


Slika 4.1.2.1 Princip rada skenera faznog pomaka [13]

4.1.3 3D skeneri s triangulacijskom metodom mjerenja

3D skeneri s triangulacijskom metodom mjerenja također koriste lasersko svjetlo za ispitivanje objekta ili okoliša. Uređaj emitira lasersko svjetlo na skenirani objekt i koristi kameru kako bi pronašao lasersku točku. Ovisno o udaljenosti površine objekta, točka lasera će se pojaviti u različitim mjestima u vidnom polju kamere. Ova metoda mjerenja naziva se triangulacija zbog toga što laser, točka lasera i kamera formiraju trokut. Poznata je vrijednost jedne stranice trokuta koja predstavlja udaljenost između kamere i izvora lasera te je poznat kut izvora lasera. Kut kamere moguće je saznati gledanjem pozicije laserske točke u vidnom polju kamere. Pomoću ova tri podatka moguće je potpuno definirati izgled trokuta i njegovu veličinu, te kut koji predstavlja lasersku točku.

U većini slučajeva umjesto laserske točke, preko objekta se emitira laserska pruga kako bi se ubrzao proces skeniranja (slika 4.1.3.1). [4]



Slika 4.1.3.1 Princip rada triangulacijskog laserskog skenera [13]

4.2 Podjela laserskih 3D skenera prema tehnologiji prostornog skeniranja

4.2.1 Lasersko skeniranje iz zraka

1994. godine, nova tehnologija zračnog trodimenzionalnog skeniranja postala je dostupna. Zračni laserski skener (eng. *Airborne Laser Scanner* – ALS) je uređaj koji se postavlja na podnožje zrakoplova, te se najčešće upotrebljava za prostorno skeniranje. Osim prostornog skeniranja, moguća primjena je i za praćenje fizikalnih procesa u atmosferi budući da omogućuje vrlo precizno mjerenje brzine, smjera kretanja i gustoće čestica u atmosferi. Model i vrsta skenera ovisi o njegovoj primjeni, te o modelu zrakoplova kao i mjestu ugradnje u zrakoplov. Osnovni princip rada laserskog skeniranja iz zraka prikazan je na slici 4.2.1.1. [4]

Temeljne značajke zračnih laserskih skenera mogu se sažeti na sljedeće tri značajke:

- Položaj zrakoplova određuje se dualnom frekvencijom GPS-a
- Orijentacija i visina zrakoplova konstantno se motre pomoću osjetljivog IRS sustava (eng. *Inertial Reference System*)
- Uređaj za mjerenje terena emitira diskretne laserske zrake, te mjeri vrijeme koje je potrebno laserskoj zraci da se reflektira od terena natrag do zrakoplova

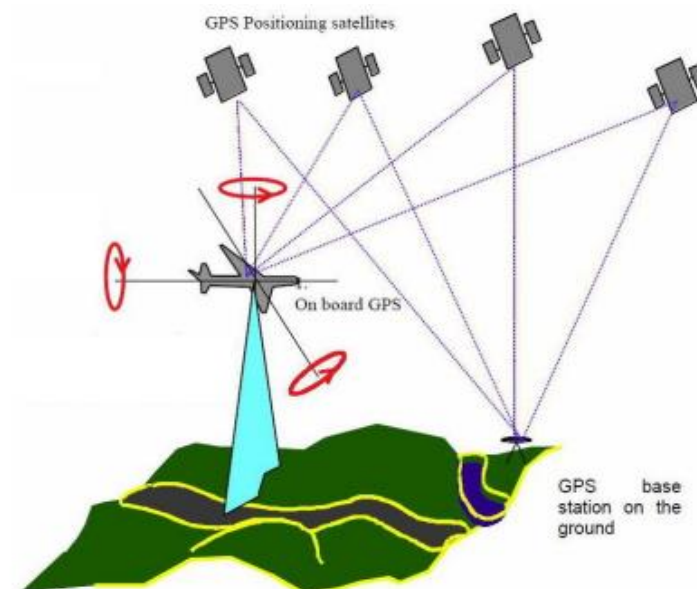
Laserska zraka usmjerava se prema tlu pomoću rotirajućeg zrcala. Program za obradu podataka kombinira podatke o poziciji skenera u zrakoplovu, visini zrakoplova i izmjerenoj udaljenosti pomoću lasera i izrađuje digitalni visinski model, tj. model reljefa. [4]

Operativni parametri laserske frekvencije, širine vala, brzine zrakoplova i visine letenja zrakoplova prilagođuju se kako bi se dobila optimalna gustoća podatkovnih točaka za svaki model. Prosječni razmak točaka može se kretati od 10 metara pa sve do razmaka od jednog metra ili manje. Širina laserskog vala može prekriti površinu do 700 metara. Zračni laserski skener emitira laser s valnom duljinom od 1.04 μm što nije u vidljivom spektru, te je sigurno za oči. [4]

Pri najčešćoj operacijskoj visini, širina emitiranog vala iznosi 300 mm pri dnu vala. Ako se skeniranje izvodi iznad vegetacije, određeni dio signala će se reflektirati od krošnje drveća, dio će doći do unutrašnjosti krošnji, a dio će doći do tla. Razni skeneri mogu se prilagoditi tako da bilježe udaljenost pomoću prve refleksije lasera koju zaprime, zadnje refleksije koju zaprime ili koristeći više refleksija od jednog emitiranog pulsa. Sastavni dio zračnih

laserskih skenera uključuje program koji primjenjuje morfološke filtre za razdvajanje emitiranih zraka na one koji su došli do tla i na one koje nisu došli do tla. Program zahtijeva od operatera da definira vrijednosti karakteristika kao što su kut terena, očekivana devijacija i udaljenost GPS satelita do bazne stanice na tlu. Program koristi rekurzivni algoritam baziran na promjeni kosine terena kako bi odredio koja zraka zadovoljava zadane vrijednosti, te ih raspodijelio u zrake koji su došli do tla i na one koje nisu došli do tla. [4]

Daljnjom obradom podataka, zrake koje nisu došli do tla mogu se raspodijeliti u preciznije kategorije. Te kategorije mogu uključivati dalekovode, kablove ili vegetaciju za istraživanje područja za energetske vodove ili kategorije poput najviših drveća u određenom području za modeliranje šuma. [4]



Slika 4.2.1.1 Osnovni prikaz laserskog skeniranja iz zraka [4]

4.2.2 Lasersko skeniranje sa tla

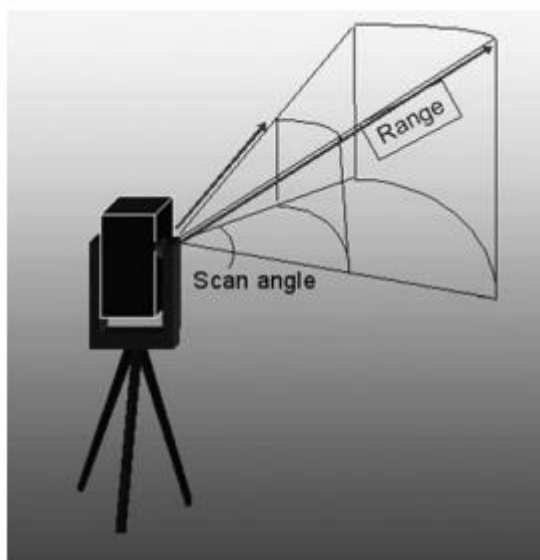
Lasersko skeniranje sa tla (eng. *Terrestrial Laser Scanning* – TLS) radi na istim principima kao i lasersko skeniranje iz zraka, osim što se skener nalazi na tlu. Postavljanje skenera na tlo pruža određene prednosti u skeniranju diskretnih objekata iz više kutova. Lasersko skeniranje sa tla najkorisnije je za skeniranje nepravilnih objekata poput zgrada ili raznih oblika reljefa kao što su naličja litica. [4]

Ovi sistemi mogu mjeriti nekoliko tisuća točaka po sekundi što omogućuje prikupljanje skupova podataka daleko većih od onih prikupljenih tradicionalnim mjerenjem ili

postupkom fotogrametrije. Lasersko skeniranje sa tla je novi i efikasan način skeniranja velikih objekata i cijelih scena. Razni proizvođači nude drugačije sustave koji su najčešće dizajnirani i proizvedeni za specifične zadatke. [4,14]

Laserski skener može se opisati kao motorizirana mjerna stanica, koja automatski mjeri sve točke u njenom horizontalnom i vertikalnom vidnom polju. Za svaku izmjerenu točku, bilježi se njena udaljenost do skenera zajedno s horizontalnim i vertikalnim kutovima, što omogućuje da se prostorne koordinate u odnosu s položajem skenera mogu lako izračunati (slika 4.2.2.1). Ovime se za jednu poziciju postavljanja laserskog skenera može odmah izraditi gusti oblak točaka. [4]

Određene vrste skenera imaju mogućnost zahvaćanja cijele polutke iz jednog položaja, dok druge vrste skenera imaju ograničeno vidno polje od 40° do 60° . Uz prostorne koordinate, laserski skeneri također mjere i vrijednost intenziteta za svaku točku. Intenzitet se definira kao mjera snage elektroničkog signala dobivena pretvaranjem i pojačavanjem optičke snage povratnog raspršivanja. Ta mjerenja najčešće se koriste kao podrška vizualnoj analizi oblaka točaka. Intenzitet točaka ima potencijal uporabe i u složenijim zadacima poput registracije i klasifikacije po svojstvu površinskog materijala. [4]



Slika 4.2.2.1 Prikaz rada laserskog skenera sa tla [15]

4.2.3 Ručni laserski skeneri

Ručni laserski skeneri stvaraju 3D model koristeći mehanizam triangulacije. Laserska točka ili crta projicira se na skenirani objekt iz ručnog uređaja, te senzor mjeri udaljenost od površine objekta do skenera. Podaci su dobiveni u odnosu na unutarnji koordinatni sustav i iz razloga kako bi se prikupili podaci kada je skener u pokretu potrebno je znati položaj skenera. Položaj skenera može se odrediti koristeći referentne značajke skenirane površine ili koristeći vanjsku metodu praćenja. Vanjsko praćenje položaja često podrazumijeva laserski tragač sa integriranom kamerom ili fotogrametrijski postupak koristeći tri ili više kamera. Obje navedene metode najčešće upotrebljavaju infracrvene diode koje pričvršćene na skener koje emitiraju svjetlost i koje kamera vidi kroz filtre koji pružaju otpornost prema svjetlosti okoliša. [4]

Podaci su prikupljeni pomoću računala i spremljeni kao podatkovne točke u trodimenzionalnom prostoru tj. oblaku točaka. Obradom dobivenih podataka moguće je izraditi poligonalnu mrežu, te kasnije CAD model. Ručni laserski skeneri mogu spajati podatke sa pasivnim senzorima vidljive svjetlosti (koji imaju mogućnost prikupljanja informacija o teksturi i boji objekta) kako bi se izradio potpuni 3D model. [4]

Primjer korištenja ručnog laserskog skenera u industriji prikazan je na slici 4.2.3.1.



Slika 4.2.3.1 Primjer ručnog laserskog skenera [16]

5. 3D skeniranje postupkom fotogrametrije

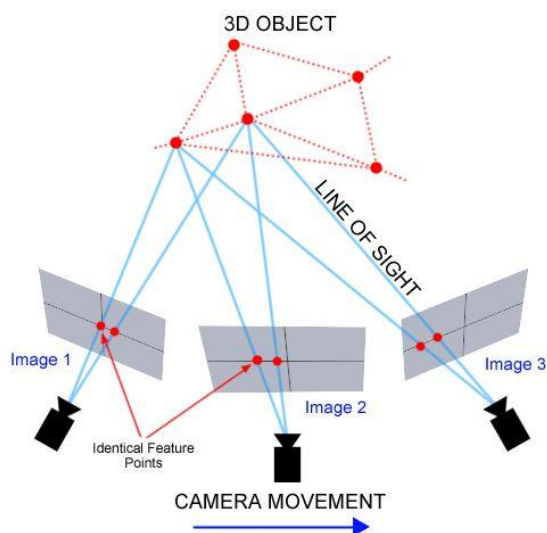
Digitalna fotogrametrija je vrsta 3D skeniranja koja se temelji na digitalnim fotografijama. Pomoću računalnog programa analiziraju se sličnosti među fotografijama i pomoću tih sličnosti dobivaju se podaci o obliku i boji objekta. Budući da se većina informacija trodimenzionalnog prostora izgubi prilikom fotografiranja, potrebne su minimalno dvije fotografije kako bi program mogao započeti obradu podataka. Kvaliteta završnog 3D modela ovisi o kvaliteti samih fotografija. Poželjno je uslikati objekt iz više položaja i visina, te uzeti što više fotografija zbog toga što program prepoznaje iste točke na pojedinim fotografijama i na taj način rekonstruira objekt (slika 5.1). [17]

Za dobivanje geometrije objekta pomoću fotogrametrije, najčešće se koriste dvije metode: *Structure-from-Motion* (SfM) metoda i *Multi-View Stereo* (MVS) metoda. SfM metoda procjenjujući lokaciju i orijentaciju objekta na fotografijama i parametre kamere stvara 3D oblak točaka. MVS metoda radi na principu tradicionalne fotogrametrijske tehnike prilagođene nizu fotografija i upotrebljava podatke SfM metode čime stvara još veći broj 3D točaka u oblaku. Ovakva metoda stvaranja digitalnih 3D modela razvijena je tek u posljednjem desetljeću kada je došlo i do razvoja digitalnih fotoaparata visoke rezolucije i računalnih algoritama koji uočavaju korelacije među fotografijama. [18]

Pri snimanju fotografija određeni osnovni uvjeti moraju biti zadovoljeni kako bi računalni program mogao uspješno i precizno izraditi 3D model:

- Objekt je potrebno fotografirati iz što više različitih položaja i visina
- Prilikom fotografiranja objekta, svaka sljedeća fotografija mora sadržavati ≥ 60 dijela prethodne fotografije
- Za daljnju obradu podataka i georeferenciranje objekta potrebno je da na najmanje 3 fotografije budu vidljive 3 ili više kontrolne točke
- Fotografije bi u prvom planu trebale imati skenirani objekt te što manje okolnog okoliša
- Poželjno je fotografirati prilikom ravnomjernog osvjetljenja objekta kako bi se postigla precizna tekstura objekta

Snimanje fotografija za postupak fotogrametrije može se izvesti na više načina tako da fotogrametriju možemo podijeliti na dvije metode: terestrička fotogrametrija (snimanje sa tla) i aerofotogrametrija (snimanje iz zraka).



Slika 5.1 Prikaz postupka snimanja fotografija u fotogrametriji [19]

5.1 Terestrička fotogrametrija (snimanje sa tla)

Glavna razlika između navedenih metoda je što se krajnji rezultat mjerenja kod aerofotogrametrije dobiva na temelju zračnih fotografija, dok kod terestričke fotogrametrije krajnji rezultat se dobiva iz fotografija prikupljenih mjernom kamerom na tlu. Prednost skeniranja objekata terestričkom fotogrametrijom je primarno ta što se mogu snimiti fotografije visoke kvalitete i preciznosti, odnosno može se prikazati vrlo visoka razina detalja skeniranog objekta. Zbog tog razloga i razloga što je terestričkom fotogrametrijom moguće snimiti fotografije unutar objekta, terestrička fotogrametrija ima važnu ulogu prilikom očuvanja objekata kulturne baštine.

5.2 Aerofotogrametrija (snimanje iz zraka)

Za razliku od terestričke fotogrametrije, kod aerofotogrametrije krajnji rezultat dobiva se na temelju fotografija snimljenih iz zraka. Te fotografije dobivaju se pomoću letjelice koja iz zraka snima veliki broj visoko rezolucijskih fotografija određenog područja. Krajnji rezultat dobiven aerofotogrametrijom je 3D rekonstrukcija određenog područja odnosno terena ili većeg objekta i takav model sadrži informacije o visini terena, teksturi, obliku i boji svake snimljene točke.

6. Izrada računalnog 3D modela korištenjem MakerBot Digitizer laserskog skenera

Laserski 3D skener korišten za izradu digitalnog modela je MakerBot Digitizer (slika 6.1). MakerBot Digitizer je laserski 3D skener koji skenira željeni objekt pomoću dva lasera i kamere te iz dobivenih podataka stvara 3D digitalni model u .stl obliku datoteke. Vrlo je jednostavan za korištenje i moguće je napraviti vrlo precizne modele predmeta.

MakerBot Digitizer može skenirati predmete do 20.32 cm širine i 20.32 cm visine te težine do 3 kg. Predmet se postavlja na okretnu ploču koja okreće predmet prilikom čega jedan od lasera projicira lasersku zraku na predmet. Kamera, sa crvenim filtrom, bilježi točke gdje laserska zraka udara u predmet i time skener dobiva podatke o dimenzijama i izgledu skeniranog predmeta. Nakon što okretna ploča napravi jedan puni krug, proces se još jednom ponavlja prilikom čega se koristi drugi laser. Kada je završen i drugi krug, prikupljeni podaci programski se spajaju kako bi se dobio potpuni 3D model predmeta. Budući da se okretna ploča okreće konstantnom brzinom, svaki proces skeniranja traje točno devet minuta. [20]

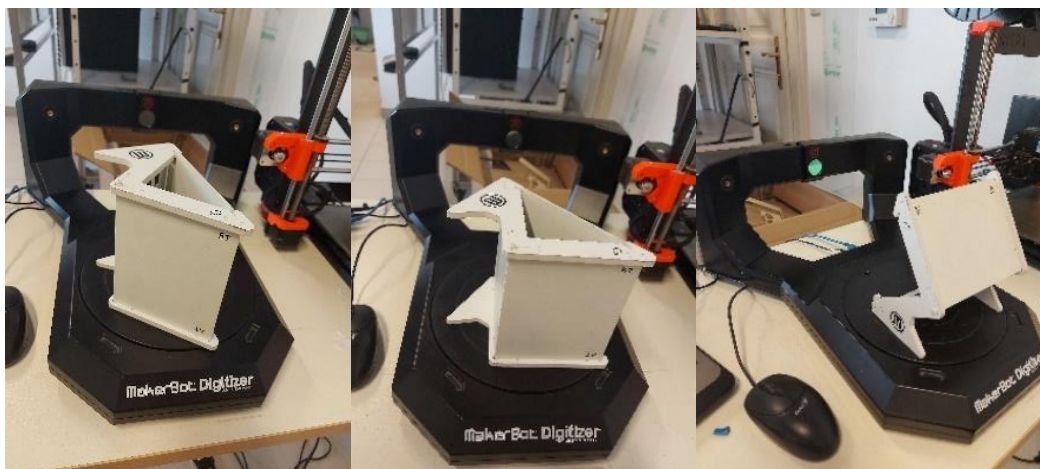


Slika 6.1 MakerBot Digitizer [21]

6.1 Pripremanje MakerBot Digitizer-a

Prije povezivanja MakerBot Digitizer-a s računalom, potrebno je instalirati MakerWare for Digitizer računalni program. Nakon instalacije programa, potrebno je uspostaviti MakerBot Digitizer prema dobivenim uputstvima te uključiti ga i povezati s računalom. Prilikom povezivanja s računalom operativni sustav Windows prepoznaje da je novi uređaj spojen te instalira potrebne upravljačke programe. Postupak instalacije MakerBot Digitizer-a prikazan je u videu <https://youtu.be/spRWWBpsOT0?t=1000> u vremenu od 16:40 do 18:05.

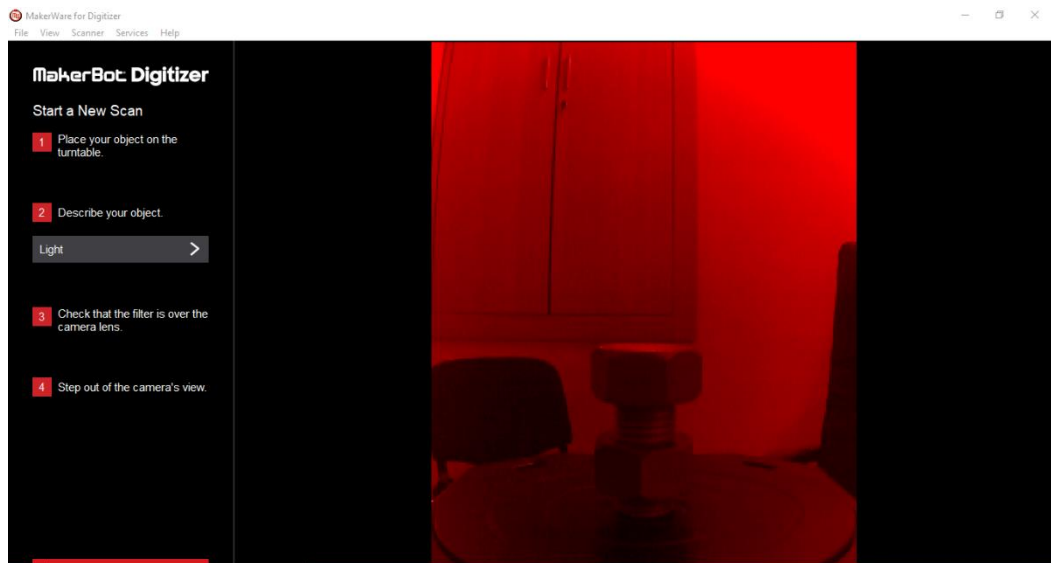
Prilikom prvog pokretanja programa, program pokreće početno postavljanje. Pri početnom postavljanju dobivaju se upute za postavljanje skenera za kalibraciju. Kalibracija skenera je potrebna kako bi se osigurala najbolja kvaliteta 3D skeniranja te ju je preporučljivo provesti prilikom prvobitnog postavljanja skenera i nakon svakih dvadeset skeniranja. Kalibracija se izvodi pomoću kalibracijskog alata koji se orijentira drugačije za pojedinu fazu kalibriranja (slika 6.1.1).



Slika 6.1.1 Kalibracija 3D skenera

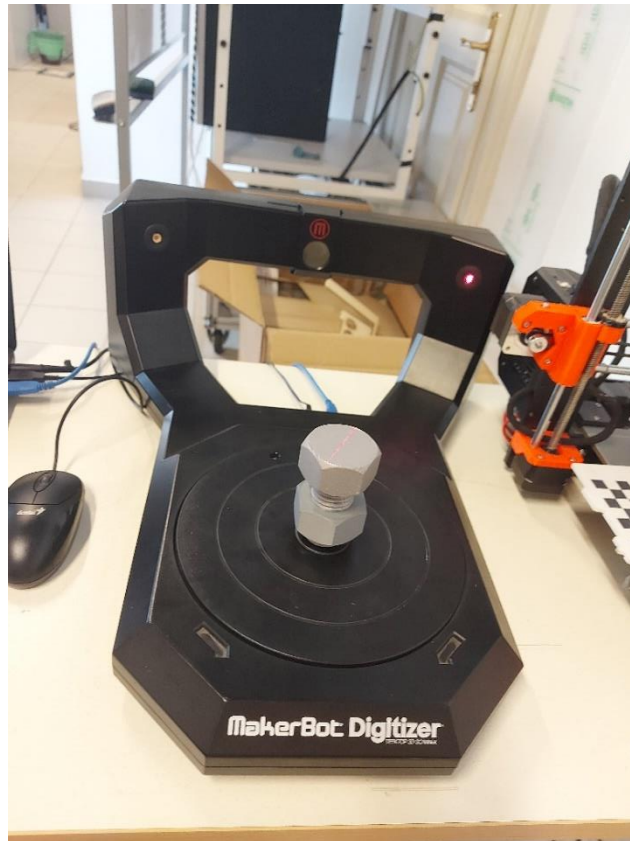
6.2 Izrada računalnog 3D modela pomoću MakerBot Digitizer-a

Nakon provedene kalibracije skenera, može se započeti sa skeniranjem predmeta. Prilikom postavljanja predmeta kojega želimo skenirati, potrebno je paziti da je predmet odgovarajućih dimenzija, te kada ga postavljamo na skener da ne prelazi granice okretne ploče. Sljedeće je potrebno osigurati da je crveni filter namješten preko kamere, a će to biti vidljivo u programu tako što će slika kamere biti zasjenčena crveno (slika 6.2.1).

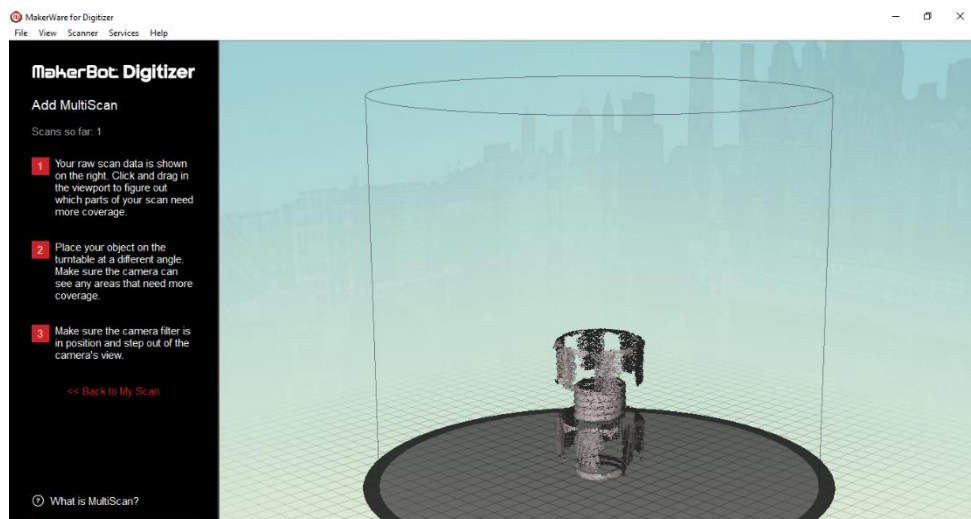


Slika 6.2.1 Slika s kamere s crvenim filtrom

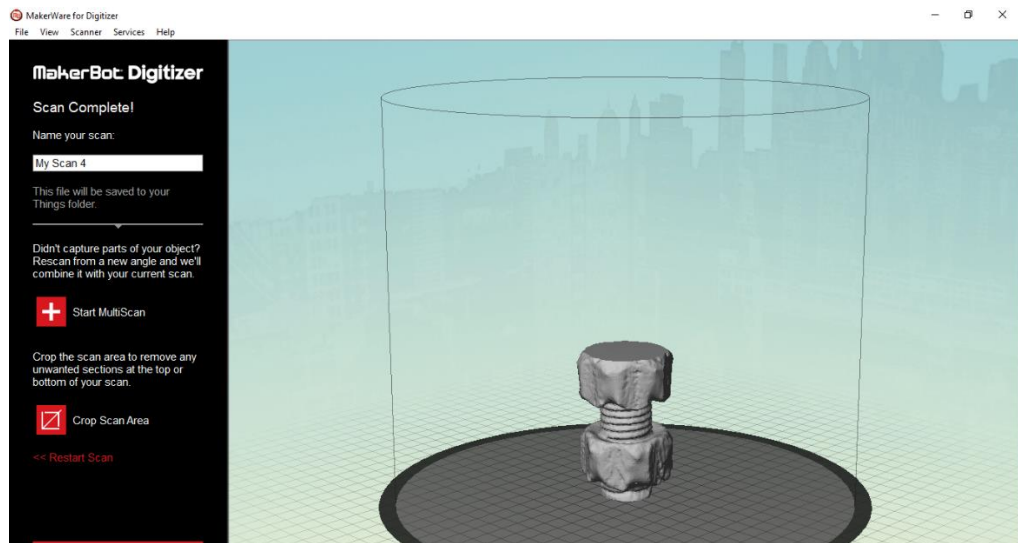
Prije početka skeniranja, u programu je potrebno odabrati svjetlinu skeniranog objekta. Ponuđene su tri opcije: svijetlo, srednje i tamno/teško za skenirati. Veliki problem sa optičkim skenerima jest refleksija svijetla od objekta. Ukoliko skenirani predmet ima visoki reflektirajući koeficijent, poželjno ga je obložiti s tankim slojem materijala koji ima manji reflektirajući koeficijent poput krede. Odabrani predmet za skeniranje je 3D isprintani, svijetlo sivi vijak sa maticom, te je u programu odabrana svijetla opcija. Kada je odabrana svjetlina predmeta, pokreće se postupak skeniranja (slika 6.2.2 i slika 6.2.3). Konačni izgled modela nakon prvog ciklusa skeniranja prikazan je na slici 6.2.4.



Slika 6.2.2 Skeniranje predmeta

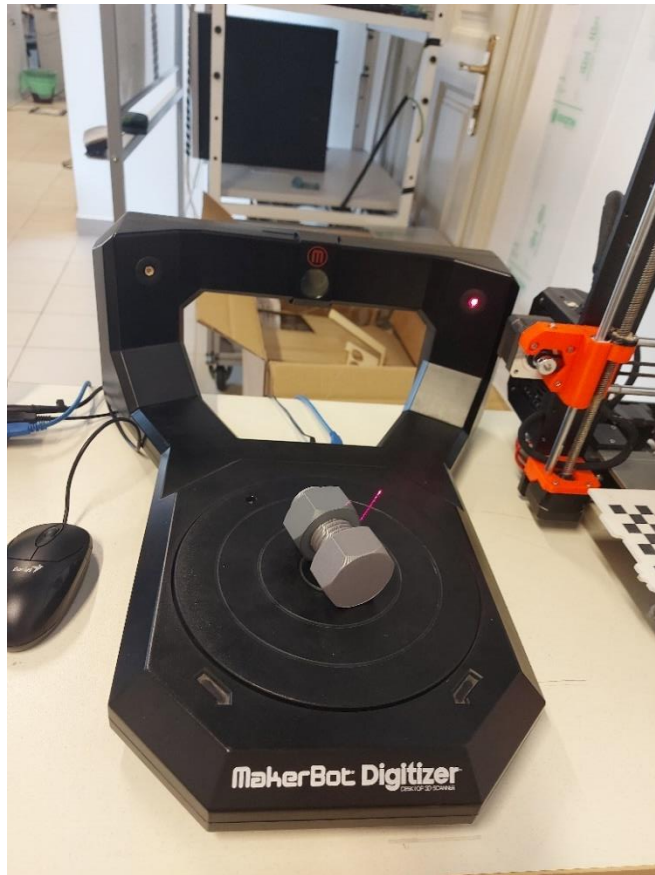


Slika 6.2.3 Skeniranje predmeta u programu MakerBot Digitizer

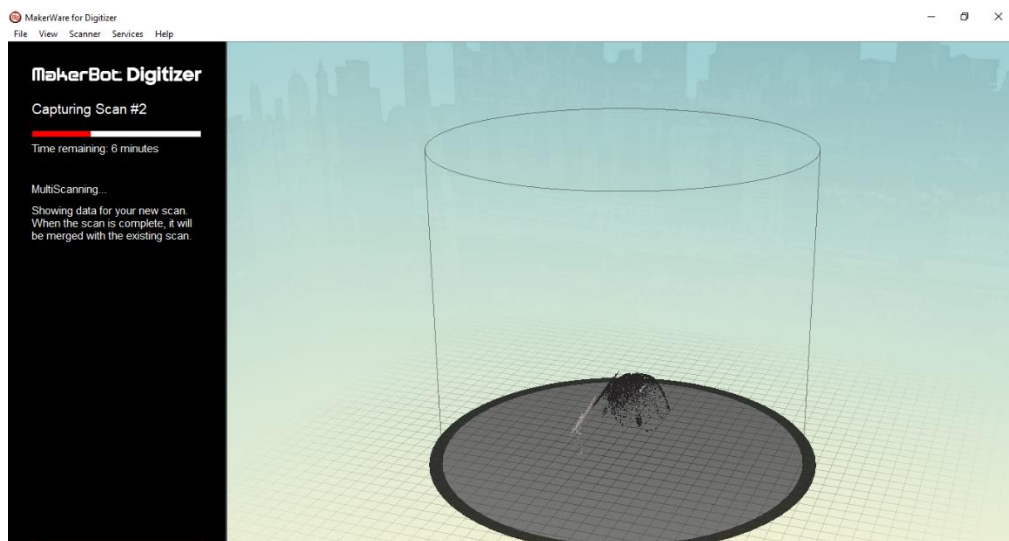


Slika 6.2.4 Konačni izgled modela nakon prvog ciklusa skeniranja

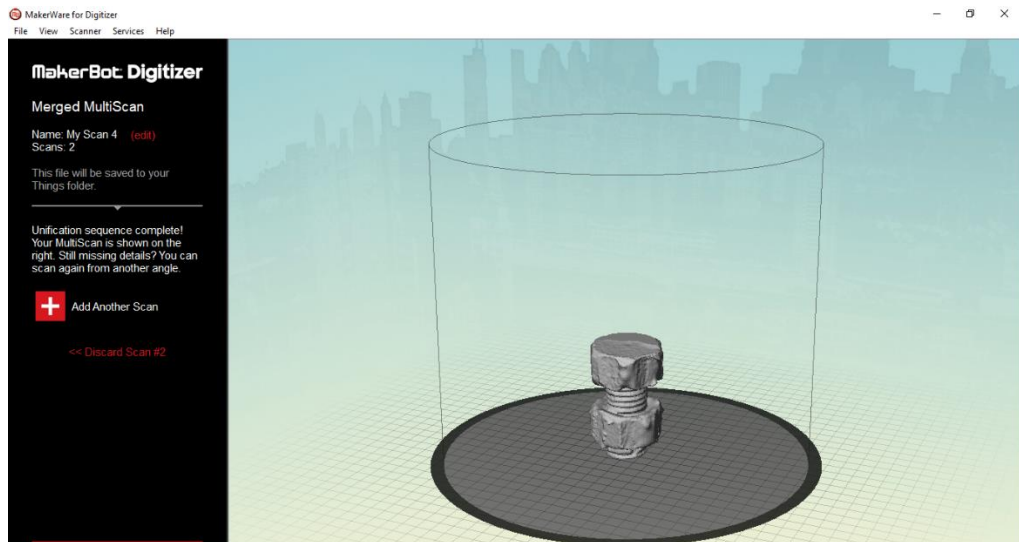
Kako bi se postigao precizniji 3D model, nakon završenog ciklusa skeniranja, predmet se polaže horizontalno (slika 6.2.5) i odabire se opcija MultiScan (slika 6.2.6). MultiScan tehnologija je skeniranje predmeta iz različitih kutova i spajanje dobivenih podataka u jedan model. Konačni izgled modela nakon postupka MultiScana prikazan je na slici 6.5.7.



Slika 6.2.5 Drugi ciklus skeniranja predmeta



Slika 6.5.6 Drugi ciklus skeniranja predmeta u programu MakerBot Digitizer



Slika 6.5.7 Konačni izgled modela nakon MultiScana

Kvaliteta dobivenog 3D model značajno ovisi o nekoliko parametara kao što su osvjetljenje prostorije, reflektirajući koeficijent predmeta, odabir postavki svjetline te razne smetnje u vidokrugu kamere. Kvalitetu modela moguće je poboljšati ponavljanjem procesa skeniranja više puta i spajanjem dobivenih podataka u jedan model ili naknadnim uređivanjem modela u programima za 3D modeliranje.

7. Izrada računalnog 3D modela korištenjem improviziranog 3D skenera

Osim uporabe raznih laserskih i ostalih komercijalnih 3D skenera, moguće je izraditi precizan 3D model korištenjem improviziranih 3D skenera kao što je uzimanje digitalnih fotografija i izrada 3D modela pomoću postupka fotogrametrije.

7.1 Korišteni računalni programi

Za izradu 3D modela postupkom fotogrametrije korišten je računalni program Agisoft Metashape. Agisoft Metashape računalni je program koji se koristi za fotogrametrijsko procesiranje digitalnih slika i generiranje 3D prostornih podataka. Program omogućuje obradu fotografija iz RGB ili više spektralnih kamera, uključujući sisteme s više kamera, u precizne prostorne informacije u obliku gustog oblaka točaka, poligonskih modela s teksturama, georeferencirane ortomozaike, digitalne modele reljefa (DMR) i digitalne modele visina (DMV). Daljnjim procesiranjem omogućuje se eliminiranje sjena i pogrešaka u teksturama iz modela, automatsko klasificiranje gustog oblaka točaka, itd. [22]

Preciznost dobivenih podataka ovisi o kvaliteti digitalnih fotografija. Digitalne fotografije moguće je dobiti pomoću bespilotnih letjelica ili digitalnog fotoaparata. Nadalje, kvaliteta digitalnih fotografija ovisi o udaljenosti uređaja koji prikuplja fotografije od snimanog predmeta ili objekta, količini prikupljenih fotografija i broju različitih kutova iz kojih su snimljene pojedine fotografije. [22]

7.2 Snimanje digitalnih fotografija za obradu

Snimanje fotografija važan je korak prilikom prikupljanja podataka u postupku skeniranja. Fotografije snimljene pri lošem osvjetljenju, nefokusirane fotografije, nedovoljno preklapanje fotografija, itd. mogu dati neprecizne i netočne podatke, čime će cijeli daljnji postupak biti neispravan i krajnji model neće biti precizan i ispravan. Po mogućnosti, objekt bi trebao biti sniman pod ujednačenim osvjetljenjem i na pozadini s najvećim kontrastom, te je preporučljivo zamaskirati ili eliminirati sve okolne objekte ili okoliš.

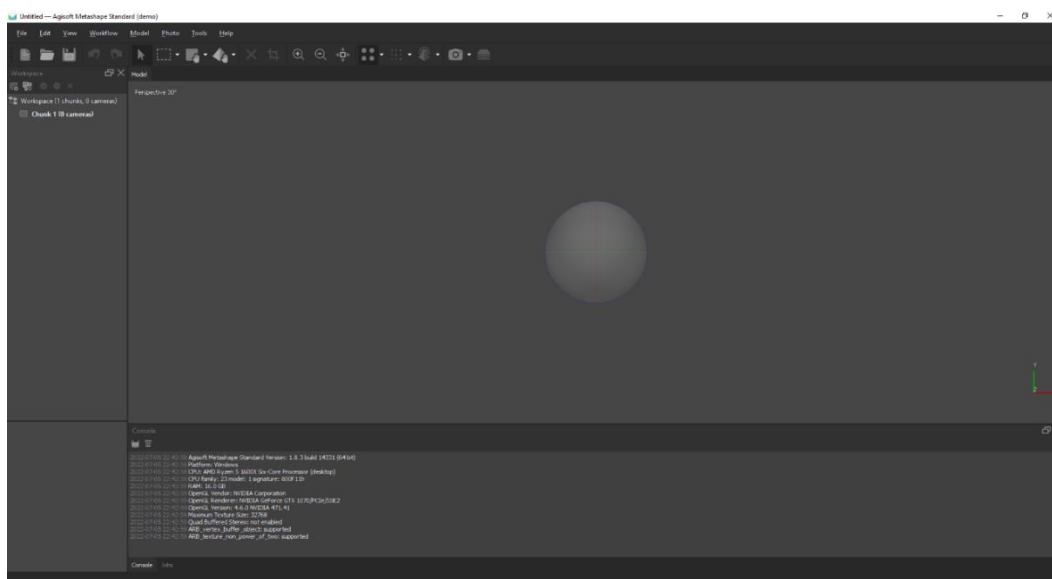
Pri izboru kamere za snimanje fotografija, poželjno je odabrati kameru sa što većom rezolucijom te izbjegavati kamere s lećama širokog kuta kako bi se izbjegla moguća distorzija fotografija. Nadalje, prilikom snimanja fotografija poželjna je konstantnost

snimanih kutova čime bi se znatno ubrzao proces poravnanja fotografija u računalnom programu. Konstantnost kutova snimanja najčešće se postiže korištenjem postolja za kameru što osigurava konstantnu visinu snimanja pri različitim kutovima i pozicijama oko objekta.

U svrhu izrade ovog modela snimljene su 53 fotografije kipa svete Jelene Križarice u Bjelovaru stražnjom kamerom pametnog telefona Samsung A71. Kamera ima rezoluciju od 64 megapiksela s otvorom blende od f/1.8, a snimljene fotografije su spremljene u 6936x9248 rezoluciji.

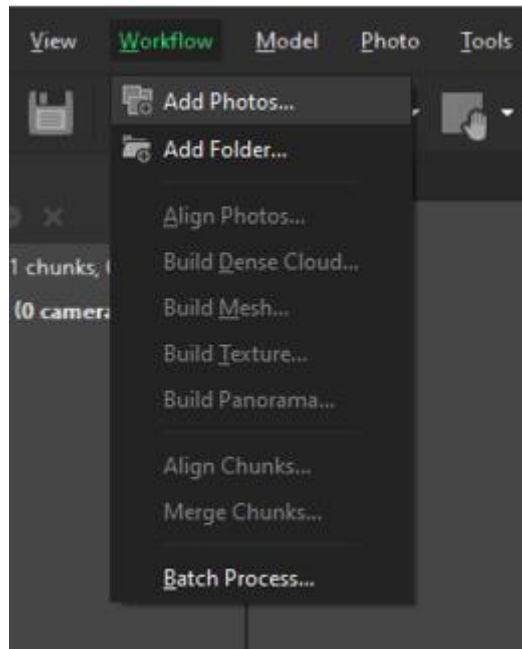
7.3 Obrada digitalnih fotografija

U postupku izrade 3D modela prvi korak je otvaranje sučelja računalnog programa Agisoft Metashape-a (slika 7.3.1) i učitavanje snimljenih fotografija u Agisoft Metashape. Postupak učitavanja fotografija moguće je vidjeti u videu <https://youtu.be/spRWWBpsOT0?t=85> u vremenu od 1:25 do 1:40).

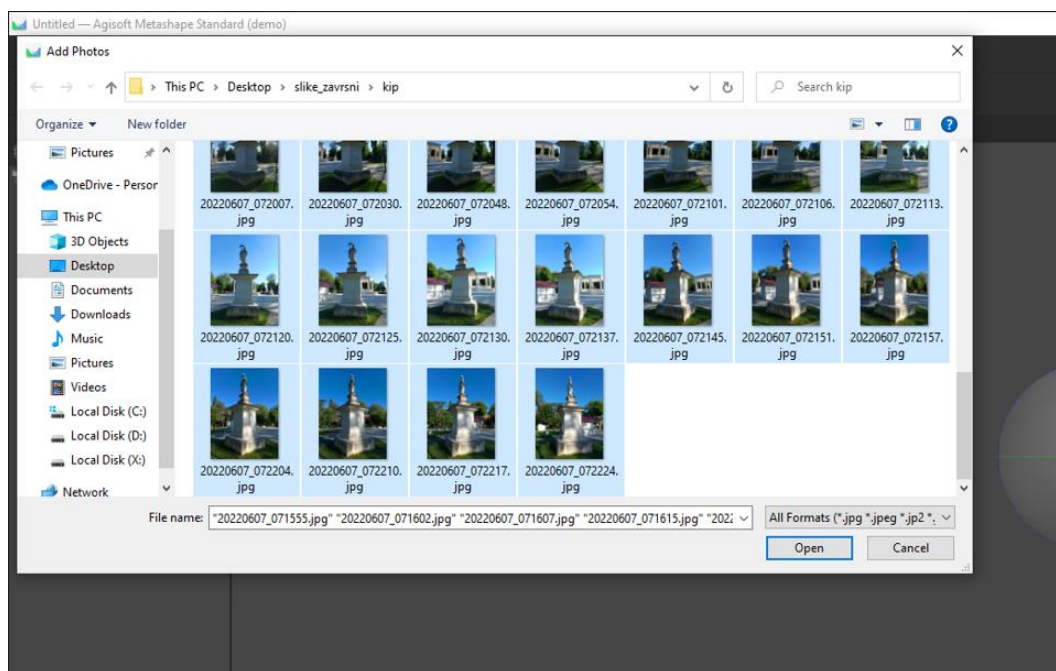


Slika 7.3.1 Sučelje Agisoft Metashape-a

Fotografije je moguće učitati pojedinačno (slika 7.3.3) naredbom *Add Photos* (hrv. Dodaj Fotografije) ili učitavanjem mape s fotografijama koristeći naredbu *Add Folder* (hrv. Dodaj Mapu). Sve naredbe za obradu fotografija korištene u ovom radu nalaze se pod karticom *Workflow* (hrv. Tijek rada) (slika 7.3.2).



Slika 7.3.2 Odabir naredbe Dodaj fotografije



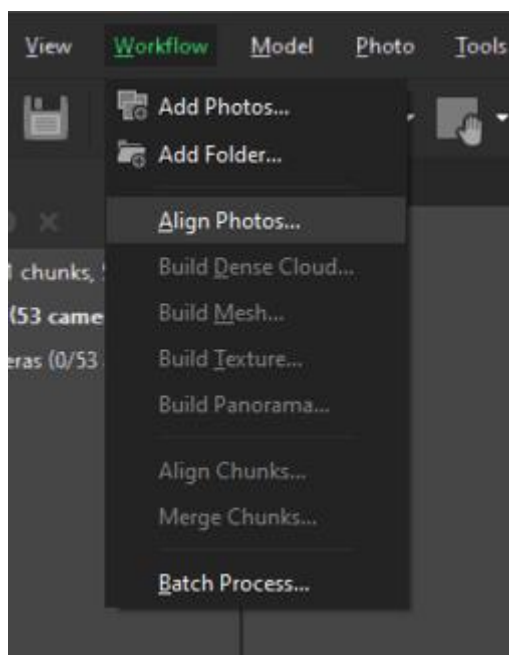
Slika 7.3.3 Odabir željenih fotografija za obradu

Buduću da su snimljene fotografije spremene u .jpg formatu, moguće ih je direktno učitati u program bez prethodnog uređivanja. Program podržava JPG, JPEG, TIFF, PNG, PPM, OpenEXR, BMP i JPEG Multi-Picture formate fotografija te ako snimljene fotografije nisu u prethodno spomenutim formatima, prije učitavanja u program potrebno ih je pretvoriti u jedan od podržanih formata.

Nakon učitavanja fotografija, one će biti prikazane u donjem dijelu sučelja i u padajućem izborniku na lijevoj strani sučelja gdje ih je moguće pojedinačno pregledati ili po potrebi, ukloniti s popisa fotografija. [22]

7.4 Poravnanje fotografija

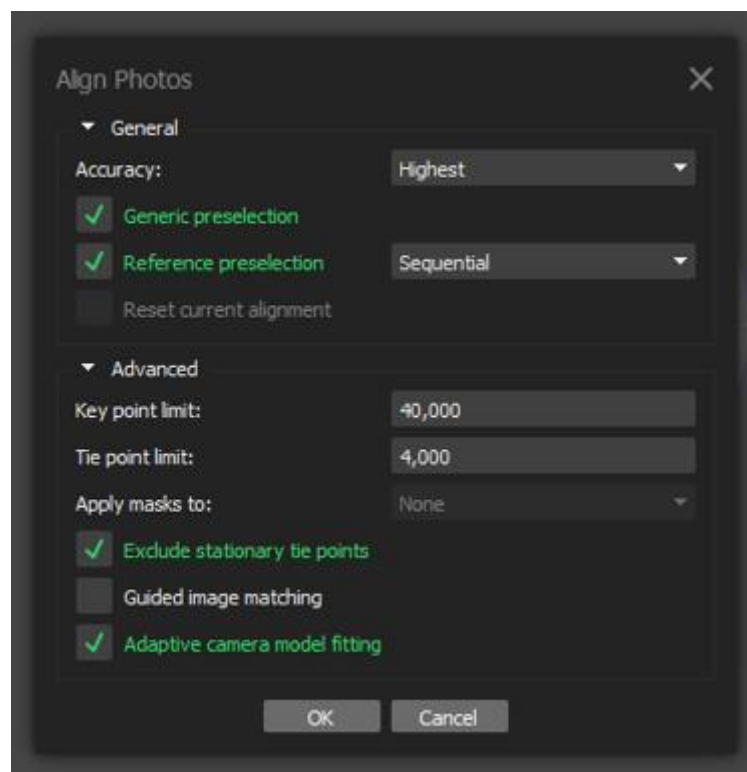
Slijedeći korak, nakon učitavanja željenih fotografija, je poravnanje fotografija. Poravnanjem fotografija, Metashape pronalazi poziciju i orijentaciju kamere za svaku fotografiju i izrađuje rijetki oblak točaka modela. Poravnanje je potrebno provesti iz razloga što se pri snimanju fotografija nije koristilo postolje za kameru i svaka fotografija je snimljena na različitoj visini i pod različitim kutom. Poravnanje fotografija izvodi se naredbom *Align Photos* (hrv. Poravnaj Fotografije) (slika 7.4.1). Postupak poravnanja fotografija prikazan je u videu <https://youtu.be/spRWWBpsOT0?t=102> u vremenu od 1:42 do 2:54.



Slika 7.4.1 Odabir naredbe Poravnaj fotografije

Prije pokretanja poravnanja fotografija otvara se skočni prozor s postavkama poravnanja (slika 7.4.2). Parametri poravnanja fotografija dijele se dvije glavne skupine postavki: generalne postavke i napredne postavke. Pod generalnim postavkama moguće je postaviti preciznost poravnanja, generičku predselekciju i referentnu predselekciju. Viša preciznosti poravnanja omogućuje pronaći precizniju procijenjenu poziciju kamere, dok se

niža preciznost koristi za grubu procjenu pozicije kamere u kraćem vremenskom periodu naspram više preciznosti. Pored odabira preciznosti poravnanja, u generalnim postavkama moguć je odabir predselekcije fotografija. U generičkom načinu predselekcije, preklapajući parovi fotografija odabiru se korištenjem postavki niže preciznosti. U referentnom načinu predselekcije, preklapajući parovi fotografija odabiru se pomoću geo-podataka iz fotografija. Pri odabiru referentnog načina predselekcije potrebno je dodatno odabrati i način predselekcije iz padajućeg izbornika: *source* (hrv. izvor), *estimated* (hrv. procijenjen) ili *sequential* (hrv. sekvencijalno). Proces poravnanja moguće je ubrzati odabirom obje opcije (generičke predselekcije i referentne predselekcije). U naprednim postavkama važno je spomenuti mogućnost postavljanja broja ključnih točaka i točaka vezanja. Broj ključnih točaka označava gornju granicu točaka značajki fotografije koje se dalje koriste pri obradi modela. Broj točaka vezanja označava gornju granicu točaka podudaranja za svaku fotografiju. [22]

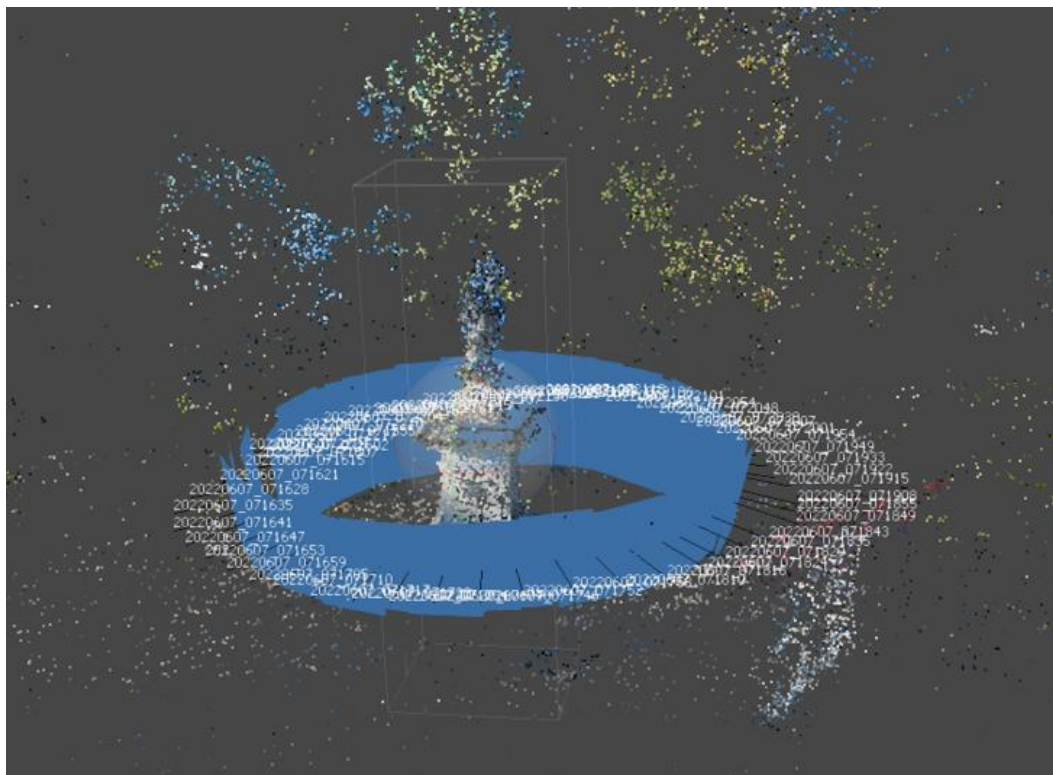


Slika 7.4.2 Skočni prozor s postavkama točnosti poravnanja

Za poravnavanje fotografija pri izradi ovog modela, odabrana je visoka preciznost poravnanja, odabrane su generička i sekvencijalna referentna predselekcija. Limit ključnih točaka postavljen je na 40 000, a limit točaka vezanja na 4000. Naknadno, odabrane su postavke za uklanjanje stacionarnih točaka vezanja i prilagođivanje modela kamere.

7.5 Izrada gustog oblaka točaka

Rezultat poravnanja fotografija je dobivanje rijetkog oblaka točaka (slika 7.5.1) iz kojeg je moguće vidjeti obris modela.



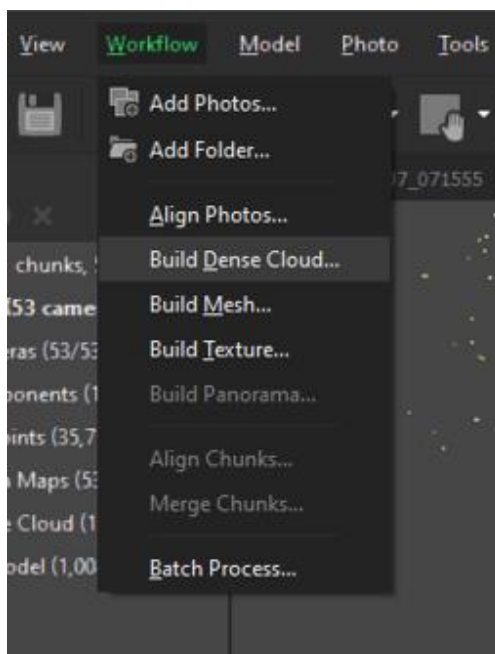
Slika 7.5.1 Rijetki oblak točaka modela

Prilikom snimanja fotografija kamera je zahvatila i okoliš snimanog objekta te je radi ubrzavanja procesa obrade i dobivanja modela samo željenog objekta, potrebno ukloniti višak dobivenog oblaka točaka. Na alatnoj traci programa odabiremo naredbu *Resize region* (hrv. Promjeni veličinu regije) i namještamo rubove regije tako da se podudaraju s rubovima objekta. U slučaju da rubovi regije nisu poravnati s rubovima objekta, odabire se naredba *Rotate region* (hrv. Okretanje regije) radi preciznijeg postavljanja rubova regije. Na slici 7.5.1 moguće je vidjeti postavljenu regiju, čiji su rubovi prikazani bijelom bojom.

Izmjena veličine regije prikazana je u videu <https://youtu.be/spRWWBpsOT0?t=173> u vremenu od 2:53 do 4:10.

Nakon odabiranja regije koja će se u daljnjim koracima obrađivati, izrađuje se gusti oblak točaka. Metashape omogućuje generiranje i vizualizaciju modela gustog oblaka točaka. Izrada gustog oblaka točaka bazira se na dubinskim kartama izračunatim korištenjem gustog stereo usklađivanja. Dubinske karte izračunavaju se iz parova preklapajućih fotografija s obzirom na njihove relativne vanjske i unutarnje orijentacijske parametre. Više uparenih dubinskih karti generiranih za svaku poziciju kamere se spajaju zajedno u jednu zajedničku dubinsku kartu i vrši se filtriranje mogućih pogrešnih mjera u preklapajućim regijama. Za svaku točku u konačnom gustom oblaku točaka spremljen je broj kombiniranih dubinskih karti koje su doprinijele, kao vrijednost pouzdanosti te se točke s malom vrijednosti pouzdanosti mogu kasnije filtrirati.

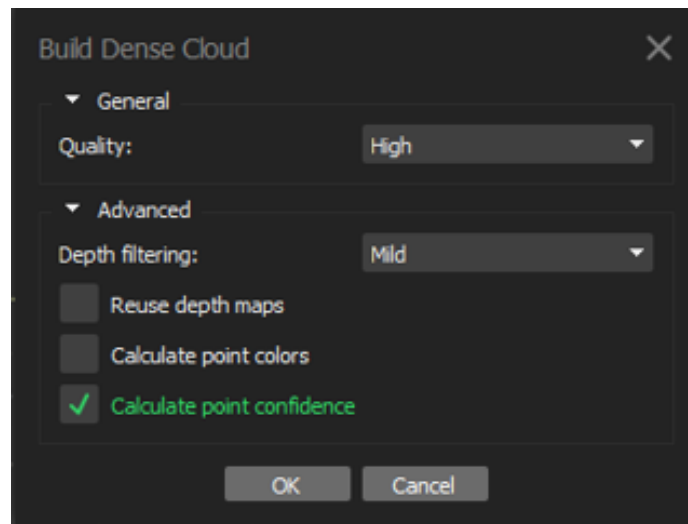
Izrada gustog oblaka točak izvodi se odabirom naredbe *Build Dense Cloud* (hrv. Izradi Gusti Oblak Točaka) (slika 7.5.2). Prije izvođenja samog postupka, otvara se skočni prozor s postavkama parametra izrade gustog oblaka točaka (slika 7.5.3). Postupak izrade gustog oblaka točaka prikazan je u videu <https://youtu.be/spRWWBpsOT0?t=251> u vremenu od 4:11 do 5:22.



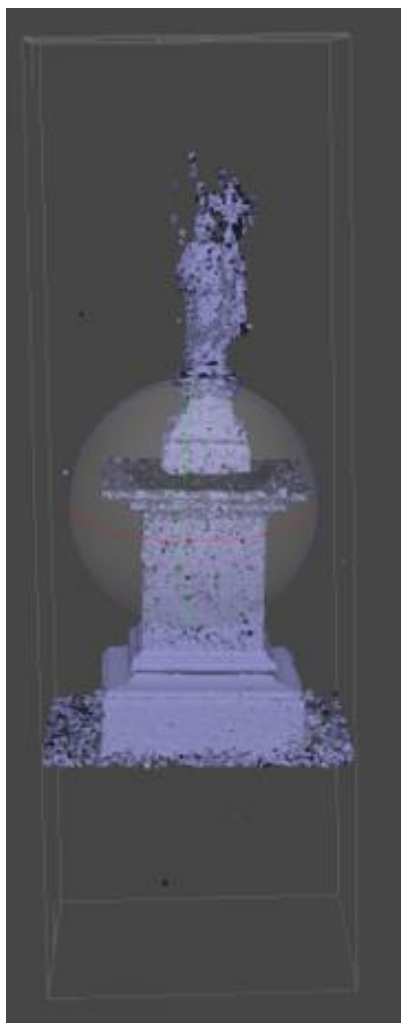
Slika 7.5.2 Odabir naredbe Izradi gusti oblak

Parametri za postavljanje dijele se na generalne i napredne postavke. Pod generalnim postavkama nalazi se kvaliteta izrade gustog oblaka točaka koja specificira željenu

kvalitetu rekonstrukcije modela. Viša kvaliteta koristi se za dobivanje detaljnije i preciznije geometrije, ali zahtijeva i duže vrijeme obrade. Parametar kvalitete vezan je i uz hardverske mogućnosti računala, tako da je prije odabira kvalitete preporučeno provjeriti koja je najviša moguća kvaliteta izrade s obzirom na korišteni hardver. Pod naprednim postavkama nalaze se postavka za dubinsko filtriranje s izborom između *Mild* (hrv. Blago), *Aggressive* (hrv. Agresivno), *Moderate* (hrv. Umjerenost) i *Disabled* (hrv. Isključeno) načina filtriranja smetnji. Osim postavki za filtriranje smetnji, u naprednim postavkama nalaze se još i opcije za ponovno korištenje dubinskih karti, izračun boje pojedinačnih točki i za izračun vrijednosti pouzdanosti. Rezultat izrade gustog oblaka točaka prikazan je na slici 7.5.4. [22]



Slika 7.5.3 Skočni prozor s postavkama kvalitete gustog oblaka točaka

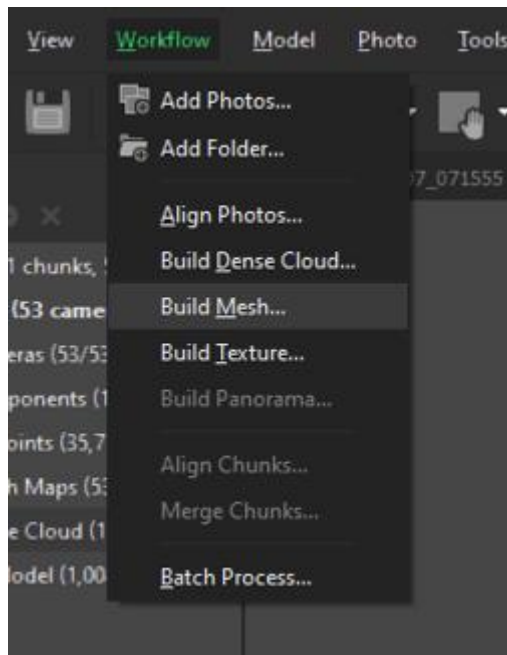


Slika 7.5.4 Izgled gustog oblaka točaka

7.6 Izrada mreže

Nakon izrade gustog oblaka točaka slijedi izrada *mesh* modela, tj. rekonstrukcija 3D modela spajanjem gustog oblaka točaka u poligonalnu mrežu. Postupak izrade gustog oblaka točaka prikazan je u videu <https://youtu.be/spRWWBpsOT0?t=323> u vremenu od 5:23 do 6:30.

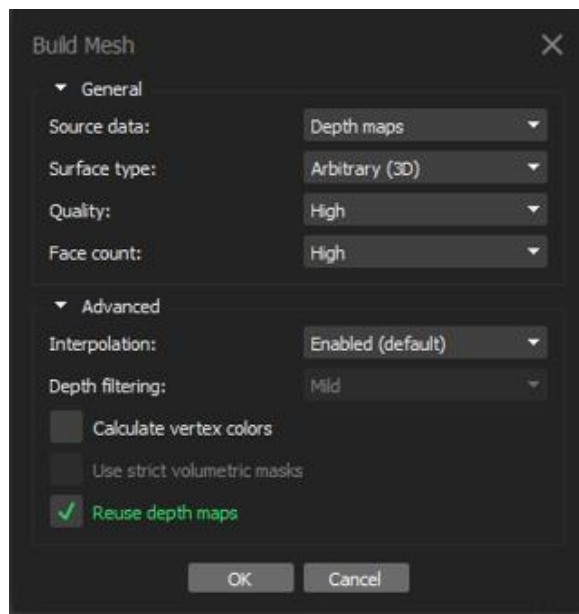
Mesh model izrađuje se odabirom naredbe *Build Mesh* (hrv. Izradi Mrežu) (slika 7.6.1). Prije izvedbe naredbe, u skočnom prozoru odabiru se željene postavke izrade *mesh* modela.



Slika 7.6.1 Odabir naredbe *Build Mesh*

U skočnom prozoru pod generalnim postavkama, nalaze se postavke za izvor podataka, vrsta površine, kvalitete i broja lica. Postavka izvor podataka specificira izvor podataka za generiranje mreže poligona i on može biti iz rijetkog oblaka točaka, gustog oblaka točaka ili dubinskih karti. Vrsta površine odabire se između proizvoljne ili visinskog polja. Proizvoljna vrsta površine može se primjenjivati za modeliranje bilo kojeg objekta i koristi se za zatvorene objekte poput kipova, zgrada, itd., a vrsta površine visinskog polja je optimizirana za modeliranje površina i terena te se koristi za procesiranje aerofotogrametrije. Postavka kvalitete specificira željenu kvalitetu rekonstrukcije modela. Više postavke kvalitete mogu postići detaljniju i precizniju geometriju, ali zahtijevaju duže vrijeme procesiranja. Broj lica specificira najveći mogući broj poligona u konačnom modelu. Ponuđene vrijednosti predstavljaju optimalan broj poligona za odgovarajući nivo detalja.

Dodatno, po potrebi, napredni parametri mogu se podesiti. Pod naprednim postavkama nalaze se parametri interpolacije, izračun boja vrhova, korištenje strogog volumetrijskog maskiranja i opcija za ponovno korištenje dubinskih karti. [22]



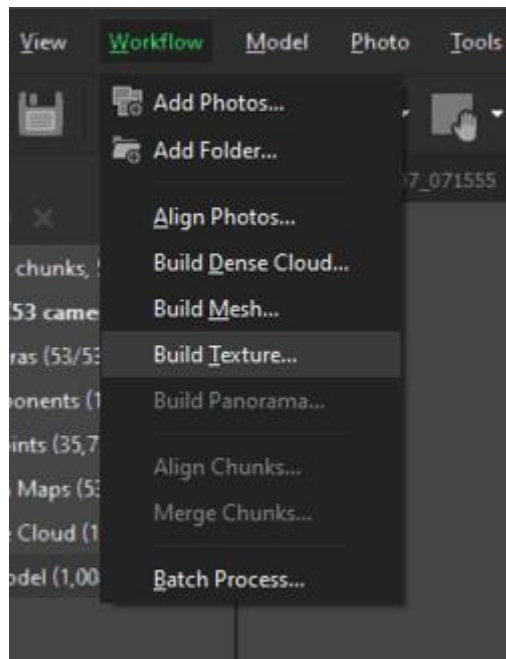
Slika 7.6.2 Skočni prozor s opcijama kvalitete mreže i interpolacije točaka



Slika 7.6.3 Konačni izgled mreže modela

7.7 Izrada teksture

Završna faza generiranja 3D modela objekta je izrada teksture za izrađeni 3D model, čime se popravljiva vizualni dojam modela. Proces izrade teksture pokreće se odabirom naredbe *Build Texture* (hrv. Izradi Teksturu) (slika 7.7.1). Postupak izrade gustog oblaka točaka prikazan je u videu <https://youtu.be/spRWWBpsOT0?t=390> u vremenu od 6:30 do 7:27.

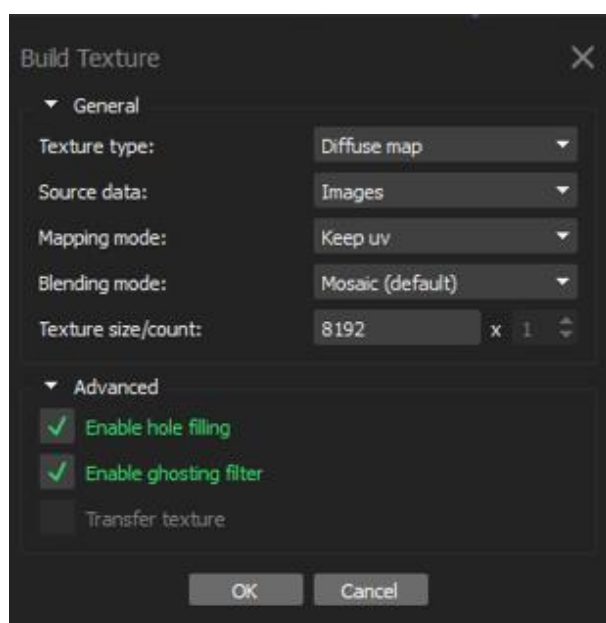


Slika 7.7.1 Odabir opcije Izradi teksturu

U skočnom prozoru nalaze se postavke parametara izrade teksture. Pod vrstom teksture nalazi se padajući izbornik s izborom između difuzne mape, normalne mape ili mapom okluzije. Difuzna mapa je osnovna tekstura koja sadrži boje površine modela. Normalna mapa je teksturna mapa koja omogućuje izračun osvjetljenja dijelova modela iz različitih svjetlosnih izvora. Mapa okluzije je vrsta teksture koja sadrži unaprijed izračunate informacije sjenčanja iz pozadinskog osvjetljenja. Pod postavkom za izvor podataka izabire se između fotografija ili 3D modela. Izvor podataka iz slika omogućuje izradu teksture s bojom baziranoj na poravnatim fotografijama modela ili prenesenim iz drugog modela s već generiranom mapom teksture s bojom, dok izvor podataka iz 3D modela znači da normalne i okluzijske mape teksture mogu biti izrađene bazirano na drugom modelu i da će reljef modela navedenog u izvoru podataka biti prenesen na trenutni model. Postavka načina mapiranja određuje kako će tekstura modela biti upakirana u atlas

teksture. Pravilan odabir načina mapiranja teksture pomaže u postizanju optimalnog pakiranja teksture i bolje kvalitete vizualizacije konačnog modela. [22]

Postavka način miješanja opisuje način na koji će vrijednosti boja piksela, iz različitih kamera, biti kombinirane u konačnoj teksturi. Veličina teksture specificira veličinu (širinu i visinu) atlasa teksture u pikselima i određuje broj datoteka u koje će se izvoziti tekstura. Naknadno, u naprednim postavkama, moguće je omogućiti popunjavanje praznina, filter za tanke strukture ili objekte koji se nisu uspjeli rekonstruirati kao dio modela i opcija za prijenos tekstura. [22]



Slika 7.7.2 Skočni prozor s opcijama mapiranja teksture i načinom miješanja

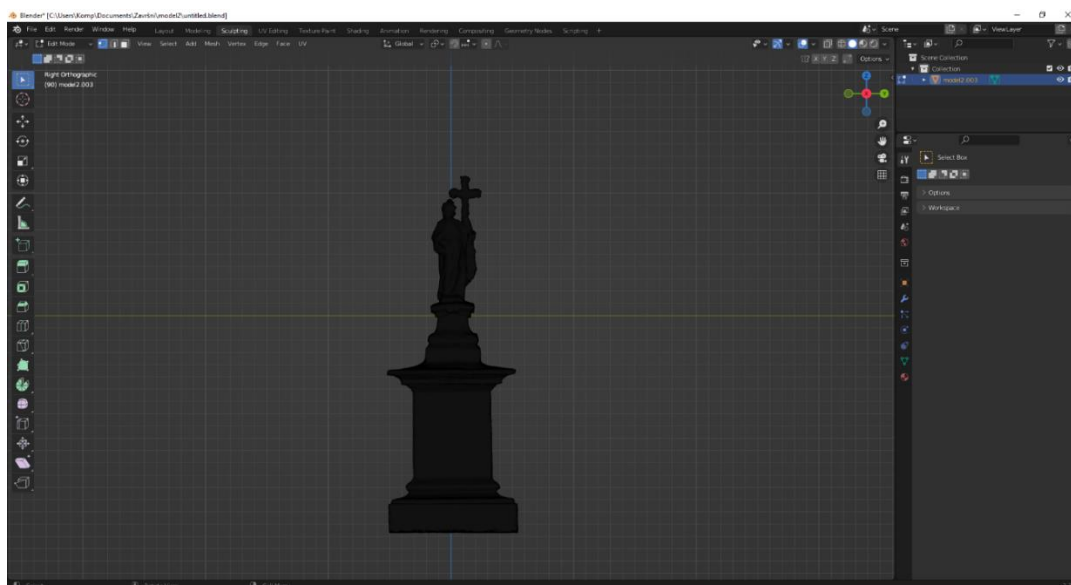


Slika 7.7.3 Konačni izgled teksture modela

7.8 Priprema i ispis 3D modela

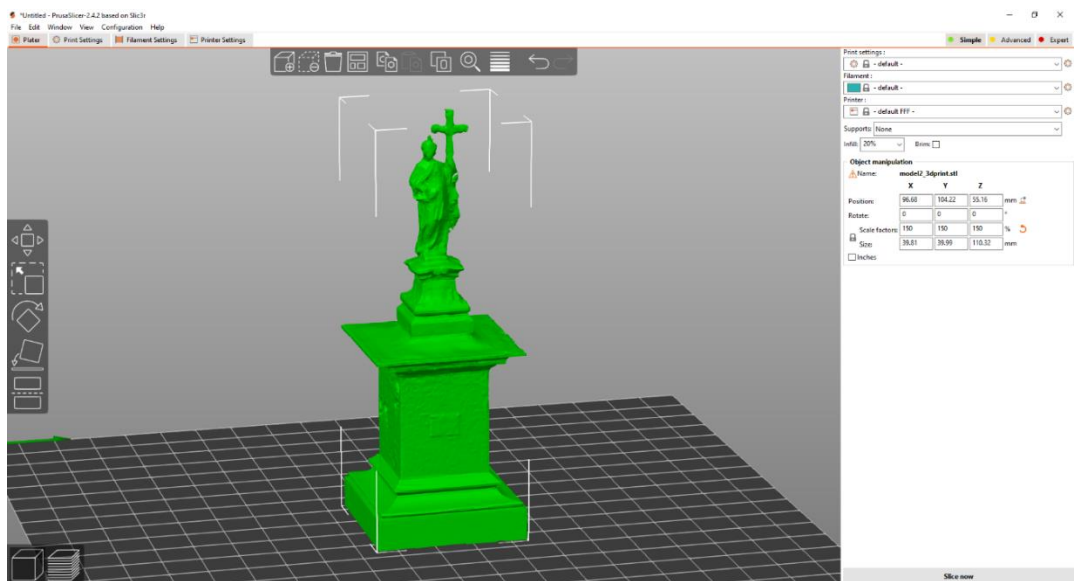
Prije ispisa, potrebno je izvršiti dodatnu pripremu modela kako bi 3D pisač mogao ispisati što precizniji model. Za pripremu modela korišten je računalni program Blender. Blender je besplatan program otvorenog koda za 3D stvaranje i obradu. Podržava sve potrebne 3D radnje kao što su modeliranje, animacija, simulacija, namještanje, video uređivanje, praćenje pokreta i mnoge druge radnje. Instalacija Blender programa i obrada modela prikazana je u videu <https://youtu.be/spRWWBpsOT0?t=490> u vremenu od 8:10 do 13:19.

U program se uvozi izrađeni 3D model u obliku .stl datoteke (slika 7.8.1). Kada je model uvezen, potrebno je izvršiti ispunu modela kako bi se mogao isprintati na 3D pisaču.



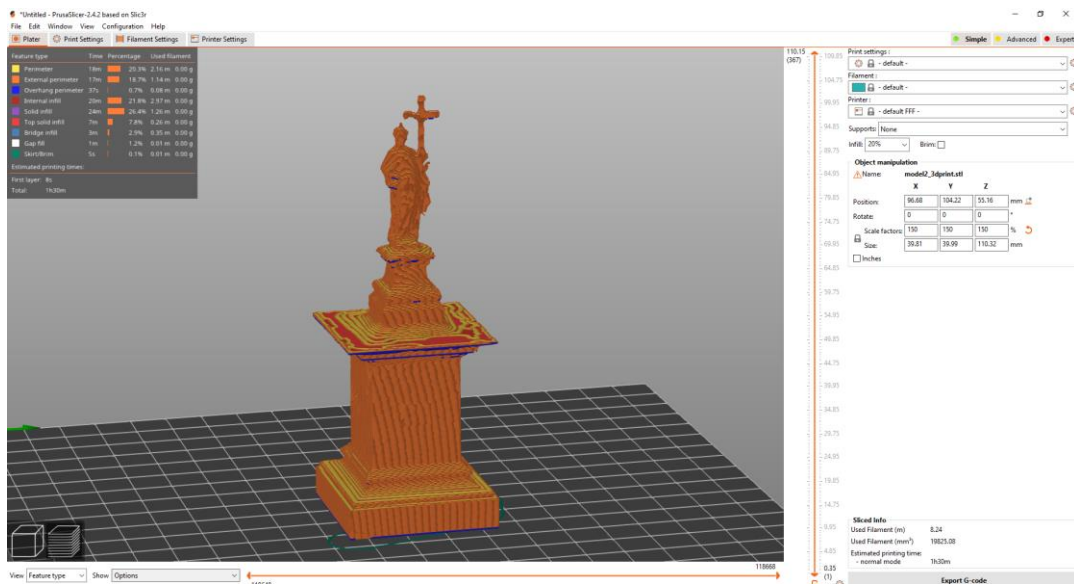
Slika 7.8.1 Prepravljeni model u programu Blender

Nakon obrade u Blenderu, model se sprema i konačna verzija modela uvozi se u program za 3D ispis PrusaSlicer (7.8.2). PrusaSlicer računalni je program korišten za obradu i pretvorbu 3D modela u listu posebnih naredbi za 3D pisač, tj. G-kod. Prije ispisa modela, u PrusaSlicer-u potrebno je postaviti ispunu modela, koja je za ovaj model postavljena na 20% i veličinu modela koja je postavljena na 150%. Osim ispune i veličine modela, potrebno je postaviti i način rada pisača te korišteni filament. Cijeli postupak instalacije PrusaSlicer programa i pripreme za ispis prikazan je u videu <https://youtu.be/spRWWBpsOT0> u vremenu od 13:20 do 16:19.



Slika 7.8.2 Prikaz modela u programu PrusaSlicer

Pritiskom na naredbu *Slice now* (hrv. Reži Sada), dobivamo G-kod kojega se može izvesti na 3D pisač (slika 7.8.3).



Slika 7.8.3 Konačni model spreman za 3D ispis

Za ispis modela korišten je Creality Ender 3-Pro (slika 7.8.4). Nakon što je model doraden i izrađen g-kod, g-kod spremamo na SD karticu i prenosimo u pisač. Ispis modela trajao je 3 sata, a konačni rezultat vidljiv je na slikama 7.8.5.



Slika 7.8.4 Creality Ender 3-Pro [23]



Slika 7.8.5 3D ispisani model

8. ZAKLJUČAK

3D skener je uređaj koji procesom mjerenja i snimanja površine stvarnoga objekta ili okoliša prikuplja podatke o njihovom obliku i obilježjima. Uporaba 3D skenera, zbog svojih mnogih prednosti, može se vidjeti u raznim industrijama kao što su inženjerstvo, zdravstvene industrije, arhitektura, industrija video igara i mnoge druge. Izrada i dizajn 3D skenera može se bazirati na raznim vrstama tehnologija. Svaka od tehnologija izrade ima vlastita ograničenja, ali i prednosti. Zbog toga postoje različite vrste skenera kao što su CT skeneri, skeneri sa okretnim postoljem, PCMM skeneri, ručni skeneri, zemaljski skeneri i mobilni skeneri. Glavna podjela tehnologija je na kontaktne i beskontaktne metode skeniranja. Beskontaktne metode se daljnjom podjelom dijele na aktivne i pasivne metode. U ovom radu izrađeni su 3D modeli korištenjem laserskog skenera i postupka fotogrametrije. Glavne prednosti laserskih 3D skenera je brzina i preciznost skeniranja objekata i okoliša, dok je glavni nedostatak visoka cijena cjelokupnog procesa.

Laserski 3D skener korišten za izradu digitalnog modela je MakerBot Digitizer. Odabrani predmet za skeniranje je, 3D isprintani, svijetlo sivi vijak sa maticom. Kvaliteta konačnog 3D modela vijka sadrži određene nedostatke koji su uzrokovani smetnjama tijekom skeniranja te svijetle boje objekta koje bi bilo moguće popraviti višestrukim ponavljanjem procesa skeniranja i kombiniranjem svih rezultata u konačni model. Digitalna fotogrametrija je vrsta 3D skeniranja koja se temelji na digitalnim fotografijama. Pomoću računalnog programa analiziraju se sličnosti među fotografijama i pomoću tih sličnosti dobivaju se podaci o obliku i boji objekta. Kvaliteta završnog 3D modela ovisi o kvaliteti samih fotografija. Poželjno je snimiti objekt iz više položaja i visina, te uzeti što više fotografija zato što program prepoznaje iste točke na pojedinim fotografijama te tako rekonstruira objekt. Za izradu 3D modela postupkom fotogrametrije korišten je računalni program Agisoft Metashape. U svrhu izrade ovog modela snimljene su 53 fotografije kipa svete Jelene Križarice u Bjelovaru. Nakon obrade računalne obrade fotografija u programu Metashape, model je dodatno pripremljen za 3D ispis u računalnom programu Blender. Konačni model uvezen je u računalni program PrusaSlicer pomoću kojega je model pripremljen za ispis. Izrađeni model je poprilično vjerna replika snimanog kipa te određeni nedostaci u modelu uzrokovani su lošim osvjetljenjem i nedovoljno različitih kutova snimanja. Iz ovoga rada možemo vidjeti mnoge prednosti 3D skeniranja te lakoću i brzinu samog procesa skeniranja.

9. LITERATURA

- [1] Breuckmann B. 25 Years of High Definition 3D Scanning: History, State of the Art, Outlook.
- [2] Škrivnek T. Mobilni postav uređaja za skeniranje strukturiranim svjetlom. Diplomski rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu; 2018.
- [3] <https://weareprintlab.com/index.php?p=blog/the-real-value-of-3d-scanning-and-its-applications> (25.05.2022)
- [4] Ebrahim M. A.-B. 3D Laser scanners: history applications, and future.
- [5] Stojkić Ž., Čuljak E., Šaravanja L. 3D Measurement – Comparison of CMM and 3D Scanner
- [6] <https://www.opensourceimaging.org/project/structured-light-3d-scanner/> (28.08.2022)
- [7] <https://www.nibib.nih.gov/science-education/science-topics/magnetic-resonance-imaging-mri> (28.08.2022)
- [8] <https://www.nibib.nih.gov/science-education/science-topics/computed-tomography-ct> (28.08.2022)
- [9] https://en.wikipedia.org/wiki/CT_scan (28.08.2022)
- [10] Thompson R. B., Finlay W. H. Using MRI to Measure Aerosol Deposition.
- [11] <https://www.fda.gov/radiation-emitting-products/medical-x-ray-imaging/computed-tomography-ct> (28.08.2022)
- [12] <https://www.hexagonmi.com/products/structured-light-scanners/aicon-stereoscan-neo> (28.08.2022)
- [13] <https://www.artec3d.com/learning-center/laser-3d-scanning> (28.08.2022)
- [14] Miljković M. Lasersko skeniranje, 3D modeliranje i vizualizacija Đulinog ponora. Diplomski rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu; 2016.
- [15] Lemmens M. Geo-information: Technologies, Applications and the Environment (Geotechnologies and the Environment, 5).
- [16] <https://www.3dnatives.com/en/freescan-ue-pro-shining3d-multifunctional-scanner-250420224/> (28.08.2022).
- [17] Wolf P. R., Dewitt B. A., Wilkinson B. E. Elements of Photogrammetry with Applications in GIS.
- [18] Kholil M., Ismanto I., Fu'ad M. N. 3D reconstruction using Structure From Motion (SFM) algorithm and Multi View Stereo (MVS) based on computer vision

- [19] <https://thehaskinssociety.wildapricot.org/photogrammetry> (20.06.2022)
- [20] MakerBot Digitizer Desktop top 3D scanner user manual. New York; MakerBot.
- [21] <https://www.3dnatives.com/en/digitizer-3d-scanner190420174/> (28.08.2022)
- [22] AGISOFT LCC. 2020. Agisoft Metashape User Manual. Rusija; Agisoft LCC
- [23] <https://www.3djake.hr/creality-3d-printeri-i-rezervni-dijelovi/ender-3-pro>
(28.08.2022)

10. OZNAKE I KRATICE

ALS - Airborne Laser Scanner (Zračni Laserski Skener)

BMP – Bitmap

CAD – Computer Aided Design (Računalno Potpomognuto projektiranje)

CMM - Coordinate Measuring Machines (Koordinatni Mjerni Strojevi)

CT - Computerised Tomography (Računalna Tomografija)

DMR – Digitalni Model Reljefa

DMV – Digitalni Model Visine

GPS – Global Positioning System (Globalni Sustav Pozicioniranja)

IRS - Inertial Reference System (Inercijalni Referentni Sustav)

JPEG – Joint Photographic Experts Group (Zajednička Skupina Fotografskih Stručnjaka)

JPG – Joint Photographic Group (Zajednička Fotografaska Skupina)

LCD – Liquid Crystal Display (Zaslon s Tekućim Kristalima)

MVS - Multi-View Stereo

PCMM - Portable Coordinate Measuring Machines (Prijenosni Koordinatni Mjerni Strojevi)

PPM – Portable Pixmap (Prijenosna Pixmapa-a)

PNG – Portable Network Graphic (Prijenosna Mrežna Grafika)

RGB – Red, Green, Blue (Crvena, Zelena, Plava)

SfM - Structure-from-Motion (Struktura Iz Kretanja)

STL – Stereolithography (Stereolitografija)

TIFF – Tag Image File Format (Format Oznake Slikovne Datoteke)

TOF - Time Of Flight (Vrijeme Leta)

2D – 2 Dimenzionalno

3D - 3 Dimenzionalno

11. SAŽETAK

Naslov: Izrada računalnog modela uporabom 3D skenera i postupka fotogrametrije

Predmet ovog završnog rada je izrada računalnog 3D modela uporabom laserskog 3D skenera i postupka fotogrametrije. Cilj rada bio je opisati osnove i načine 3D skeniranja, navesti i opisati vrste 3D skenera, opisat pojam i postupak skeniranja fotogrametrijom te izraditi računalne 3D modele korištenjem MakerBot Digitizer laserskog skenera i postupka fotogrametrije pomoću računalnog programa Agisoft Metashape. Prikazan je detaljni proces izrade dvaju računalnih 3D modela prethodno navedenim metodama iz čega je moguće zaključiti razlike u kvaliteti između modela te kako je moguće s malo opreme postići vrlo dobre rezultate.

Ključne riječi: 3D, laser, skener, fotogrametrija, model.

12. ABSTRACT

Title: Making computers models using 3D scanner and photogrammetry procedure

The subject of this thesis is creating 3D computer model using laser 3D scanner and photogrammetry procedure. The aim of this paper was to describe basics and methods of 3D scanning, to list and describe types of 3D scanners, to describe the concept and process of photogrammetry scanning and to create computer 3D models using MakerBot Digitizer laser scanner and photogrammetry procedure using the Agisoft Metashape computer program. Detailed process of making two computer 3D models using the aforementioned methods is shown, from which it is possible to conclude the differences in quality between the models and how it is possible to achieve very good results with little equipment.

Keywords: 3D, laser, scanner, photogrammetry, model.

IZJAVA O AUTORSTVU ZAVRŠNOG RADA

Pod punom odgovornošću izjavljujem da sam ovaj rad izradio/la samostalno, poštujući načela akademske čestitosti, pravila struke te pravila i norme standardnog hrvatskog jezika. Rad je moje autorsko djelo i svi su preuzeti citati i parafraze u njemu primjereno označeni.

Mjesto i datum	Ime i prezime studenta/ice	Potpis studenta/ice
U Bjelovaru, <u>30.08.2022.</u>	LOVRO GRANDVERGER	Lovro Grandverger

Prema Odluci Veleučilišta u Bjelovaru, a u skladu sa Zakonom o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju, elektroničke inačice završnih radova studenata Veleučilišta u Bjelovaru bit će pohranjene i javno dostupne u internetskoj bazi Nacionalne i sveučilišne knjižnice u Zagrebu. Ukoliko ste suglasni da tekst Vašeg završnog rada u cijelosti bude javno objavljen, molimo Vas da to potvrdite potpisom.

Suglasnost za objavljivanje elektroničke inačice završnog rada u javno dostupnom nacionalnom repozitoriju

LOVRO GRANDVEGER

ime i prezime studenta/ice

Dajem suglasnost da se radi promicanja otvorenog i slobodnog pristupa znanju i informacijama cjeloviti tekst mojeg završnog rada pohrani u repozitorij Nacionalne i sveučilišne knjižnice u Zagrebu i time učini javno dostupnim.

Svojim potpisom potvrđujem istovjetnost tiskane i elektroničke inačice završnog rada.

U Bjelovaru, 30.08.2022.

Lorro Grandveger
potpis studenta/ice