

Univerza  
v Ljubljani  
Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*

*Janova 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
telefon (01) 47 68 500  
faks (01) 42 50 681  
fgg@fgg.uni-lj.si*



Univerzitetni program Geodezija,  
smer Geodezija

Kandidatka:

**Mojca Grilc**

# **Analiza karakteristik terestričnega laserskega skenerja domače izdelave**

**Diplomska naloga št.: 720**

**Mentor:**

doc. dr. Mojca Kosmatin Fras

**Somentor:**

Andrej Grilc

Ljubljana, 2. 10. 2007

## **STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA**

<b>Stran z napako</b>	<b>Vrstica z napako</b>	<b>Namesto</b>	<b>Naj bo</b>
-----------------------	-------------------------	----------------	---------------

## **IZJAVA O AVTORSTVU**

Podpisana **MOJCA GRILC** izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom:

**»ANALIZA KARAKTERISTIK TERESTRIČNEGA LASERSKEGA SKENERJA  
DOMAČE IZDELAVE«.**

Izjavljam, da prenašam vse materialne avtorske pravice v zvezi z diplomsko nalogo na UL,  
Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo.

Ljubljana,

Mojca Grilc

## **BIBLIOGRAFSKO - DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

- UDK:** 004:528.5:778.18(043.2)
- Avtor:** Mojca Grilc
- Mentor:** doc. dr. Mojca Kosmatin Fras
- Somentor:** uni. dipl. ing. geod. Andrej Grilc
- Naslov:** Analiza karakteristik terestričnega laserskega skenerja domače izdelave
- Obseg in oprema:** 67 str., 2 pregl., 27 sl., 7 en., 39 pril.
- Ključne besede:** terestrično lasersko skeniranje, triangulacijski laserski skener, domača izdelava, bližnji doseg, analiza karakteristik

### **Izvleček**

Glavna tema diplomske naloge je izdelava ter analiza karakteristik 3D laserskega skenerja. Laserski skener domače izdelave deluje na osnovi triangulacije, zato sodi med triangulacijske laserske skenerje, le-ti pa med terestrične laserske skenerje. V teoretičnem delu diplomske naloge so opisane glavne značilnosti in osnovni elementi laserskega skeniranja ter terestrično lasersko skeniranje. V praktičnem delu so najprej opisane tehnične značilnosti posameznih uporabljenih komponent za sestavo laserskega skenerja, na petih skeniranih predmetih pa so predstavljeni rezultati skeniranja s pomočjo laserskega skenerja domače izdelave. V zadnjem delu diplomske naloge so na osnovi skeniranja analizirane značilnosti 3D laserskega skeniranja.

---

**BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION**

**UDC:** 004:528.5:778.18(043.2)  
**Author:** Mojca Grilc  
**Supervisor:** Assist. Prof. Dr. Mojca Kosmatin Fras, Ph.D.  
**Cosupervisor:** Andrej Grilc, B. Sc. in geodesy  
**Title:** Analysis of the home made terrestrial laser scanner features  
**Notes:** 67 p., 2 tab., 27 fig., 7 eq., 39 ann.  
**Key words:** terrestrial laser scanning, triangulation laser scanner, home made, close range, analysis of features

**Abstract**

This paper describes home made laserscanner. First how it is made (physical characteristics) and then the analysis of scanning procedure. This laser scanner is based on triangulation and it belongs between terrestrial laser scanners. In theoretical part of my work, I described main characteristics, basic elements and princip of laser scanning and terrestrial laser scanning. In practical part, I described technical characteristics of used components and then five practical examples, that I've made with this home made laser. At the end I've analysed results, from typical characteristics of used features, to selected parameters during scanning to the end result (meshes).

## **ZAHVALA**

Najprej bi se iskreno zahvalila mentorici doc. dr. Mojci Kosmatin Fras za pomoč pri izdelavi diplomske naloge ter za vzpodbudne besede, ko je bilo to najbolj potrebno.

Zahvalila bi se tudi staršem za finančno, predvsem pa moralno podporo v času študija ter bratu Andreju in Dariji, ki sta mi pomagala tako v času študija kakor pri izdelavi diplomske naloge.

Nenazadnje hvala tudi vsem sošolcem s fakultete, s katerimi smo večkrat skupaj trepetali pred izpiti ter prijateljem, s katerimi sem preživela vsa študentska leta in ki so mi omogočili, da se bom vseh študentskih let vedno rada spominjala.

## KAZALO VSEBINE

<b>1</b>	<b>UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>3D LASERSKO SKENIRANJE.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1</b>	<b>Opredelitev 3D laserskega skeniranja.....</b>	<b>4</b>
<b>2.2</b>	<b>Delitev 3D laserskih skenerjev .....</b>	<b>6</b>
<b>2.3</b>	<b>Rezultat skeniranja .....</b>	<b>8</b>
<b>2.4</b>	<b>Uporaba 3D laserskega skenerja in oblaka točk .....</b>	<b>9</b>
<b>2.5</b>	<b>Koordinatni sistemi sistema za 3D lasersko skeniranje.....</b>	<b>10</b>
2.5.1	Skenerjev lastni koordinatni sistem (SLKS) .....	10
2.5.2	Projektni koordinatni sistem (PRKS) .....	10
2.5.3	Globalni koordinatni sistem (GLKS) .....	10
2.5.4	Koordinatni sistem fotoaparata (KSF).....	10
<b>2.6</b>	<b>Registracija .....</b>	<b>11</b>
<b>2.7</b>	<b>Georeferenciranje.....</b>	<b>12</b>
<b>2.8</b>	<b>Problemi 3D laserskega skeniranja .....</b>	<b>12</b>
2.8.1	Natančnost .....	12
2.8.2	Rob / Meja .....	12
2.8.3	Vpliv materialov in razsvetljave.....	13
<b>2.9</b>	<b>Prednosti 3D laserskega skeniranja.....</b>	<b>13</b>
<b>2.10</b>	<b>Slabosti 3D laserskega skeniranja.....</b>	<b>15</b>
<b>3</b>	<b>OSNOVNI ELEMENTI 3D LASERSKIH SKENERJEV.....</b>	<b>17</b>
<b>3.1</b>	<b>Natančnost merjenja razdalj .....</b>	<b>17</b>
<b>3.2</b>	<b>Hitrost skeniranja.....</b>	<b>17</b>
<b>3.3</b>	<b>Ločljivost oziroma gostota skeniranja in velikost pike.....</b>	<b>18</b>
<b>3.4</b>	<b>Doseg in vpliv motečega širjenja žarkov .....</b>	<b>18</b>
<b>3.5</b>	<b>Vidno polje .....</b>	<b>19</b>
<b>3.6</b>	<b>Naprave za registracijo .....</b>	<b>19</b>
<b>3.7</b>	<b>Slikovne kamere.....</b>	<b>19</b>
<b>3.8</b>	<b>Transport.....</b>	<b>20</b>
<b>3.9</b>	<b>Napajanje .....</b>	<b>20</b>
<b>3.10</b>	<b>Programska oprema .....</b>	<b>20</b>

<b>4</b>	<b>TERESTRIČNO 3D LASERSKO SKENIRANJE .....</b>	<b>21</b>
<b>4.1</b>	<b>Skenerji z neposrednim merjenjem razdalje (»RANGING« skenerji).....</b>	<b>22</b>
4.1.1	Impulzi skenerji ( <i>angl. Time of flight</i> ) .....	22
4.1.2	Fazni skenerji .....	23
4.1.3	Določitev kartezičnih koordinat.....	23
<b>4.2</b>	<b>Triangulacijski skenerji.....</b>	<b>25</b>
4.2.1	Skener z eno kamero .....	26
4.2.2	Skener z dvema kamerama .....	27
4.2.3	Določitev kartezičnih koordinat.....	28
<b>5</b>	<b>PRAKTIČNA UPORABA DOMAČEGA 3D LASERSKEGA SKENERJA....</b>	<b>31</b>
<b>5.1</b>	<b>Tehnične karakteristike posameznih komponent .....</b>	<b>32</b>
5.1.1	Računalnik .....	34
5.1.2	Kamera – Fuji FinePix S7000.....	35
5.1.3	Laser.....	35
5.1.4	Kalibracijska tabla .....	36
5.1.5	Programska oprema .....	37
<b>5.2</b>	<b>Praktična izvedba.....</b>	<b>37</b>
5.2.1	Predmet skeniranja: ŠKATLA .....	40
5.2.2	Predmet skeniranja: SKULPTURA .....	43
5.2.3	Predmet skeniranja: OKRASNI KOŠ .....	46
5.2.4	Predmet skeniranja: VAZA.....	48
5.2.5	Predmet skeniranja: SADJE.....	49
<b>6</b>	<b>ANALIZA ZNAČILNOSTI 3D LASERSKEGA SKENIRANJA S POMOČJO LASERSKEGA SKENERJA DOMAČE IZDELAVE.....</b>	<b>51</b>
<b>6.1</b>	<b>Laserski žarek .....</b>	<b>51</b>
<b>6.2</b>	<b>Kalibracijska tabla.....</b>	<b>54</b>
<b>6.3</b>	<b>Kalibracija kamera .....</b>	<b>54</b>
<b>6.4</b>	<b>Programski paket David.....</b>	<b>54</b>
<b>6.5</b>	<b>Svetlobni pogoji v prostoru skeniranja.....</b>	<b>57</b>
<b>6.6</b>	<b>Velikost predmeta .....</b>	<b>58</b>
<b>6.7</b>	<b>Barva predmeta.....</b>	<b>58</b>
<b>6.8</b>	<b>Oblika predmeta .....</b>	<b>59</b>
<b>6.9</b>	<b>Skenogrami.....</b>	<b>59</b>
<b>6.10</b>	<b>Metrične in semantične lastnosti skenogramov .....</b>	<b>59</b>
<b>6.11</b>	<b>Povzetek značilnosti s pomočjo 3D laserskega skenerja domače izdelave.....</b>	<b>61</b>



<b>7</b>	<b>ZAKLJUČEK .....</b>	<b>63</b>
----------	------------------------	-----------

<b>VIRI.....</b>	<b>65</b>
------------------	-----------

## **PRILOGE**

- Priloga A: Navodila za uporabo programskega paketa »DAVID« za 3D lasersko skeniranje**
- Priloga B: Vmesni rezultati skeniranja skulpture**
- Priloga C: Vmesni rezultati skeniranja okrasnega koša**
- Priloga D: Uvoz skenogramov v programski paket AutoCad**
- Priloga E: Diagram značilnosti 3D laserskega skeniranja**
- Priloga F: Diagram uporabe programskega paketa DAVID**

**KAZALO DIAGRAMOV**

Diagram 1: 3D lasersko skeniranje .....	3
Diagram 2: Tehnike 3D merjenja, razvrščene glede na stopnjo in velikost objekta.....	4
Diagram 3: Princip delovanja skenerjev z neposrednim merjenjem razdalje.....	23
Diagram 4: Princip določitve kartezičnih koordinat pri laserskem skeniranju z enim zrcalom .....	24
Diagram 5: Princip delovanja triangulacijskega skenerja z eno lečo.....	26
Diagram 6: Princip delovanja triangulacijskega skenerja z dvema lečama .....	27
Diagram 7: Princip določitve kartezičnih koordinat s triangulacijskim skenerjem z eno kamero (pogled od zgoraj).....	28
Diagram 8: Programski paket David.....	31

## KAZALO SLIK

### AVTORSKE SLIKE

Slika 1: Slika uporabljenega digitalnega fotoaparata .....	35
Slika 2: Slika uporabljenega laserja. ....	36
Slika 3: 2D model škatle.....	40
Slika 4: Skenogram dveh stranic.....	41
Slika 5: Skenogram pokrova.....	41
Slika 6: Rezultat interpolacije.....	41
Slika 7: Rezultat glajenja linij. ....	41
Slika 8: Rezultat povprečenja.....	42
Slika 9: Rezultat interpolacije ter glajenja linij. ....	42
Slika 10: Rezultat interpolacije ter povprečenja.....	42
Slika 11: Rezultat 3D laserskega skeniranja.....	43
Slika 12: 2D model skulpture .....	43
Slika 13: 1. del skulpture.....	44
Slika 14: 2. del skulpture. ....	44
Slika 15: Združena skenograma v enoten model.....	45
Slika 16: Izgled okrasnega koša .....	46
Slika 17: Skenogram koša .....	47
Slika 18: 2D izgled vaze.....	48
Slika 19: Skenograma hruške .....	49
Slika 20: Model hruške, pridobljen s pomočjo združevanja dveh skenogramov .....	49
Slika 21: Model ananasa.....	50
Slika 22: Model ananasovega zelenja, pridobljen s pomočjo združevanja dveh skenogramov.....	50
Slika 24: Rezultat skeniranja ob uporabi širšega laserskega žarka .....	52
Slika 25: Rezultat skeniranja ob uporabi tanjšega laserskega žarka .....	53
Slika 26: Rezultat skeniranja v svetlem prostoru .....	57
Slika 27: Rezultat skeniranja v temnem prostoru.....	58

## **KAZALO PREGLEDNIC**

Preglednica 1: Delitev laserskih skenerjev glede na doseg.....	7
Preglednica 2: Značilnosti skeniranja ob uporabi 3D laserskega skenerja domače izdelave ..	62

**OKRAJŠAVE IN SLOVAR**

<b>Okrajšava</b>	<b>Angleški termin</b>	<b>Slovenski prevod - opis pojma</b>
GPS	Global Positioning System	Sistem globalnega določanja položaja
CCD	Charge coupled device	Ime naprave
URSZ		Urad Republike Slovenije za zaščito in reševanje
DAVID	Definetly affordable vision device	Ime programskega paketa
3D	three-dimensional	Tri dimenzionalen
LIDAR	Light Detection And Ranging	Kratice za označevanje sistema, podatkov in izdelkov tehnologije zračnega laserskega skeniranja
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of radiation	Lasersko povečanje s simuliranim izžarevanjem širjenja žarkov
SLKS		Skenerjev lastni koordinatni sistem
PRKS		Projektni koordinatni sistem
GLKS		Globalni koordinatni sistem
KSF		Koordinatni sistem fotoaparata
TIN	triangulated irregular network	Nepravilna trikotniška mreža

# 1 UVOD

Instrumenti in naprave, ki jih uporabljamo v geodeziji so v zadnjih desetletjih doživeli velik razvoj, izpopolnjena je obdelava podatkov ter njihova predstavitev. Danes lahko večino geodetskih instrumentov upravlja vsakdo, potreben je le interes, da si pridobi osnovno znanje o delovanju posameznega instrumenta ter kanček iznajdljivosti.

Podatki, ki jih pridobimo s tehniko 3D laserskega skeniranja, so za geodete zelo uporabni. Reducirane horizontalne razdalje so rezultat dela z elektronskimi razdaljemerji, rezultat GPS opazovanj so bazni vektorji, 3D lasersko skeniranje pa daje popolnoma nov tip podatkov – oblak točk, ki predstavljajo v primerjavi s klasičnimi geodetskimi metodami višjo stopnjo geometrične popolnosti in detajla terena oz. objekta, kar zmanjšuje stroške dodatnih izmer [URSZ, 2007].

3D lasersko skeniranje zagotavlja celovito zajemanje prostorskih podatkov. V kratkem časovnem intervalu pridobimo veliko število prostorskih koordinat točk, ki predstavljajo površino skeniranega objekta. Pri tehniki laserskega skeniranja uporabljamo laserski žarek za potrebe določanja [URSZ, 2007]:

- oblike,
- velikosti in
- položaja objektov v prostoru.

Diplomska naloga temelji na domači izdelavi 3D laserskega skenerja, ki bi lahko bil zaradi praktičnosti, predvsem pa zaradi majhnosti uporaben predvsem za potrebe dokumentiranja artefaktov in najdb v arheologiji.

Ideja izdelave terestričnega 3D laserskega skenerja izvira iz sodelovanja pri arheoloških izkopavanjih, pridobivanju ter dokumentiranju podatkov o najdbah. 3D laserski skenerji, ki so namenjeni skeniranju večjih objektov, so namreč neuporabni za izdelavo 3D modelov

nekaj centimetrov velikih najdb v arheologiji, saj zahtevajo razdaljo 1 metra in več (odvisno od vrste skenerja) med skenerjem in objektom. Za dokumentiranje lastnosti artefaktov in najdb arheologi še vedno uporabljajo svinčnik ter papir, saj vse pomembnejše najdbe rišejo ročno. Za dokumentiranje v arheologiji so uporabni predvsem ročni skenerji oziroma posebni skenerji za kratke razdalje, vendar je cena le teh zelo visoka.

Poleg praktične uporabe skenerja je bila ideja osnovana na podlagi želje po izdelavi diplomske naloge, ki bo temeljila na pridobivanju konkretnih rezultatov in bo poleg teorije vsebovala tudi praktični del.

Diplomska naloga je sistematično razdeljena na 7 poglavij, vključujoč uvod in zaključek. V drugem poglavju sem se osredotočila na teorijo 3D laserskega skeniranja in probleme, ki lahko nastopajo med procesom skeniranja, v tretjem poglavju pa na osnovne elemente 3D laserskih skenerjev. Četrto poglavje opisuje značilnosti terestričnega 3D laserskega skeniranja.

Peto in šesto poglavje predstavljata jedro diplomske naloge. Peto poglavje opisuje karakteristike posameznih elementov skenerja ter praktično izvedbo skeniranja s pomočjo laserskega skenerja domače izdelave. V šestem poglavju je predstavljena analiza značilnosti posameznih komponent ter rezultatov.

V prilogi so opisane značilnosti in uporaba programskega paketa »DAVID«. Predstavljene so komponente za sestavo domačega 3D laserskega skenerja ter postopki uporabe programskega paketa »DAVID«. Opisan je tudi način združevanja skenogramov v celoto ter praktična navodila za uporabo.

## 2 3D LASERSKO SKENIRANJE

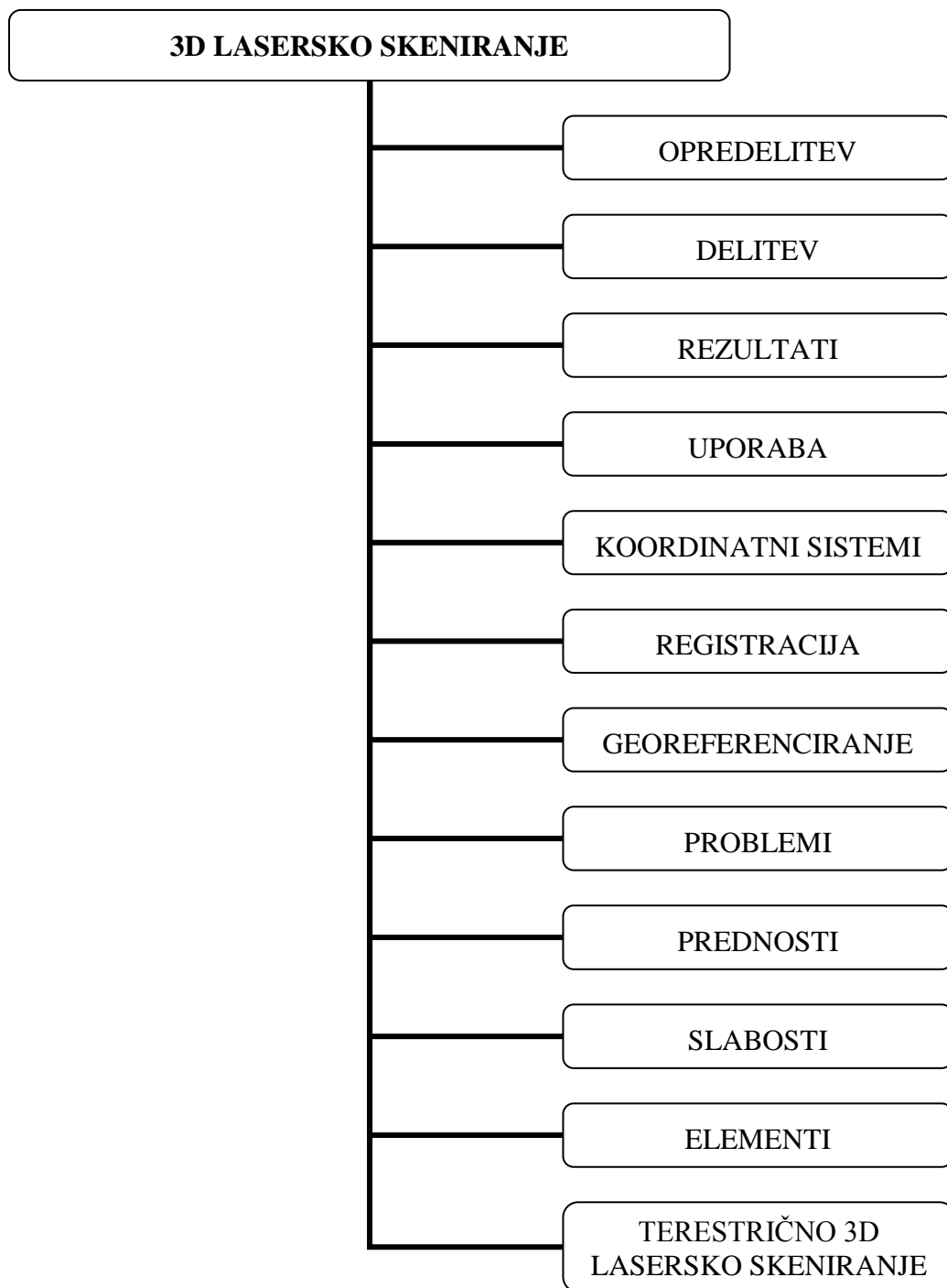


Diagram 1: 3D lasersko skeniranje.



## 2.1 Opredelitev 3D laserskega skeniranja

Na razpolago so različne tehnike in pripomočki za zajem tri-razsežnega prostora. Tehnike so razvrščene glede na njihovo uporabo, ki je povezana z velikostjo merjenega objekta in števila merjenj, ki so potrebna za zajem, kar je povezano z razgibanostjo objekta [Mills et al., 2007].

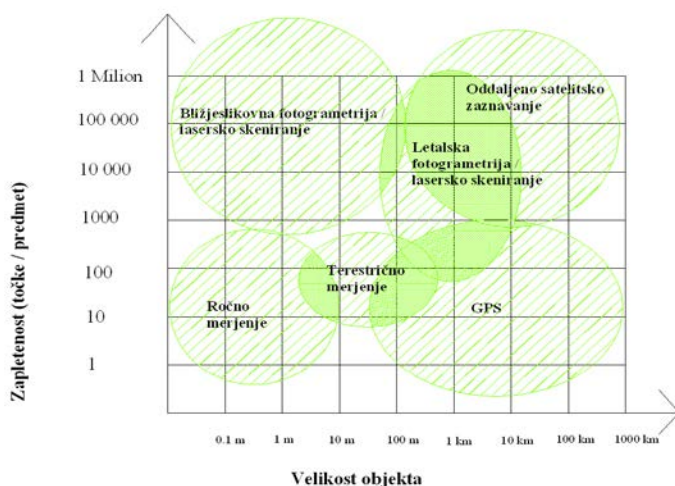


Diagram 2: Tehnike 3D merjenja, razvrščene glede na stopnjo in velikost objekta [Mills et al., 2007].

Iz diagrama je razvidno:

- Klasično geodetsko merjenje omogoča merjenje na oddaljenosti nekaj metrov, vendar je ta način merjenja nepraktičen pri merjenju detajla večjih objektov, zbiranje podatkov (npr. 1000 ali več točk) pa je težavno in zato nezanimivo.
- Fotogrametrija in lasersko skeniranje omogočata merjenje detajla na večjih objektih, primerna sta za kompleksne objekte in velika območja. Obe metodi sta uporabni tudi za zajem in obdelavo podatkov pridobljenih iz zraka.
- Metoda GPS je uporabna za merjenje površinsko omejenih področij. Število točk je omejeno v primerjavi z letalskimi ali celo s satelitskimi tehnikami.

Iz primerjave je razvidno, da je uporaba metode 3D laserskega skeniranja najbolj priporočljiva (glede na oddaljenost od objekta in količino zajetih podatkov).

3D lasersko skeniranje je na področju daljinskega zaznavanja že dlje časa znano pod imenom LIDAR (**L**ight **D**etection **A**nd **R**anging). Ker za določanje položaja uporabljamo laser (Light Amplification by Stimulated Emission of radiation), se za lasersko skeniranje uporablja izraz Laser-Radar (**R**adio **D**etection **A**nd **R**anging) [Kraus, 2004].

Lasersko skeniranje je učinkovita metoda za digitalizacijo večjih objektov ali območij. Pomeni merjenje odklona laserskega žarka pri premikanju zrcal (vrtenje ali rotiranje), odboja laserskega žarka od površine objekta in sprejema odbitega laserskega žarka [Schulz et al., 2007].

Metodo 3D laserskega skeniranja za pridobivanje podatkov uporabljamo za skeniranje površin, od katerih se laserski žarek odbija. Pogoj za uspešno skeniranje je, da skenirana površina zrcalno odbija lasersko svetlobo. Če površina ne odbija laserske svetlobe, ali se žarek razpršeno odbije, nastanejo območja brez točk, t.i. »črne luknje«. Če se laserska svetloba ne odbije le od skeniranega objekta, temveč tudi od okoliških objektov, dobimo t.i. »odvečne točke« v oblaku točk, ki jih odstranimo s posebnimi programi in v skenogramu predstavljajo šume [URSZ, 2007].

3D laserski skener zajame objekt na osnovi odčitkov laserskega žarka v mrežo točk z izbrano gostoto. Pri zasuku smeri laserskega žarka se registrira in shrani njegova prostorska usmerjenost kot horizontalni in vertikalni kot, ter poševna razdalja do želene točke glede na instrumentov koordinatni sistem. Na ta način pridobimo prostorske vektorje z začetkom v instrumentu in koncem v točkah, ki predstavljajo površino skeniranega objekta v obliki 3D koordinat točk mreže.

Lasersko skeniranja povečuje število in kvaliteto informacij ter zaupanje v rezultate topografske izmere. Z uporabniškega vidika je 3D skener naprava, ki zajema 3D koordinate površine objekta danega območja [Boehler et al., 2007]:

- avtomatično in v sistematični model,
- z visokim odstotkom zajetih točk (sto ali tisoč točk na sekundo),
- doseganje rezultatov (t.i. 3D koordinat) v skoraj realnem času.

3D lasersko skeniranje se je uveljavilo kot zanesljiva metoda posebno na področju industrije, oblikovanja in medicine. Metoda je uporabna tudi na področju inženirstva, tako za snemanje zgradb, spomenikov, votlin ter arheoloških predelov, kakor tudi za topografske načrte in izmere v industriji.

Pri laserskem skeniranju ločimo [Kraus, 2004]:

- lasersko skeniranje iz zraka,
- terestrično lasersko skeniranje pri večjih razdaljah,
- terestrično lasersko skeniranje pri kratkih razdaljah.

## 2.2 Delitev 3D laserskih skenerjev

Kljub hitremu razvoju tehnike, programske opreme in metod merjenj na trgu ni univerzalnega laserskega skenerja. Odločitev, kateri 3D laserski skener bomo uporabili, je odvisna od namena naloge. Nekateri 3D laserski skenerji so bolj primerni za notranjo uporabo z dometom največ 100 m, drugi bolj za zunanjo uporabo z dolžino dometa več kakor 100 m.

3D skenerji zabeležijo 3D koordinate številnih točk na površini objekta v relativno kratkem časovnem obdobju. Laserski žarek je projiciran na površino objekta, da lahko izvrši zabeležbo. Učinek skeniranja je dosežen z uporabo enega ali dveh gibljivih zrcal, ki omogočata majhen odklon kota. Za doseganje celotnega tridimenzionalnega točkovnega obsega delovanja, lahko rotira cel instrument ali/in predmet. Pomembna je visoka natančnost registriranega kota določitve, saj koti skupaj z razdaljo merjenja določajo lokacijo odbite točke. Za določitev prostorskih koordinat točk potrebujemo podatek o odklonskem kotu zrcala ter poševni razdalji med 3D laserskim skenerjem in objektom.

Glede na način merjenja razdalje ločimo naslednje skenerje [Boehler et al., 2007]:

- »ranging« skenerji oz. skenerji z neposrednim merjenjem razdalje:
  - fazni skenerji,
  - impulzni skenerji.
- triangulacijski skenerji.

Terestrične 3D laserske skenerje delimo glede na doseg na [Schultz et al., 2007]:

- **Skenerji za večje razdalje:** Delujejo na principu impulznega merjenja (angl. Time-of-flight). Omogočajo merjenje dolžine, večje kakor sto metrov, tudi do enega kilometra (Mensi, Riegl), ter imajo manjšo natančnost merjene dolžine (okoli enega centimetra), kar je odvisno od razdalje med skenerjem in objektom.
- **Skenerji za srednje razdalje:** Delujejo na principu faznega merjenja, omejeni so na merjenje dolžin do sto metrov.
- **Skenerji za kratke razdalje:** Princip merjenja razdalje je optična triangulacija, natančnost merjene razdalje je manjša od milimetra. Uporabni so v industriji in obrnjenem inženirstvu (avtomatsko spremljanje deformacij in v procesu projektiranja). To so t.i. »Close-range« skener.

Preglednica 1: Delitev laserskih skenerjev glede na doseg [Boehler et al., 2007]

VRSTA SKENERJA	DOSEG [m]	NATANČNOST DOLOČITEV POLOŽAJA TOČKE [mm]
Skenerji za kratke razdalje (Close range Scanners)	< 1	± 0.1 mm
Skenerji za srednje razdalje (Mid Range Scanners)	< 10	± 0.5 mm pri 2 m ± 2.0 mm pri 10 m
Skenerji za večje razdalje (Long Range Scanners)	~ 100	od nekaj mm do nekaj cm

Glede na okolje skeniranja delimo 3D lasersko skeniranje na [Santala, 2007]:

- Skeniranje iz zraka ali **aero 3D lasersko skeniranje:** Laserski skenerji so prirejeni za uporabo v letalih, primerni so za določevanje geometrije linijskih objektov. Dosežena natančnost je nekaj centimetrov, delujejo na osnovi impulznega ali faznega načina delovanja.
- Terestrično skeniranje ali **3D lasersko skeniranje s pomočjo stativa:** Natančnost merjenih točk je 1 mm. Omogočajo digitalizacijo razgibanih objektov in območij.

Natančnost podatkov je visoka, detajl skenograma je primeren za uporabo v raziskovalne namene, v inženiringu in arheologiji.

- Ročni skenerji: Natančnost je večja kakor 1 mm. So lahki, prenosni in omogočajo skeniranje objekta v njihovem naravnem okolju. Programska oprema omogoča združevanje skenogramov skoraj istočasno z zajemom, kar omogoča hitro pridobivanje podatkov. Slabo stran predstavlja nezmožnost skeniranja svetlečih objektov, pomanjkanje natančnosti, posebno v primerjavi s terestričnim skeniranjem.

3D laserske skenerje lahko delimo tudi na [Staiger, 2007]:

- Kamera-skener: Maksimalno vidno polje je  $40^\circ \times 40^\circ$ , uporaben je za skeniranje iz zunanosti v notranosti objekta in zato za merjenje razdalj velikega dosega.
- Panoramski skener: Vidno polje je omejeno le z bazo instrumenta (stativ). Ta tip skenerjev je zgrajen za uporabo v notranosti objektov, npr. za skeniranje sob.
- Mešani skener: Ena izmed rotacijskih osi je neomejena (pogosto v horizontalni smeri), druga rotirajoča os je omejena na  $60^\circ$ .

## 2.3 Rezultat skeniranja

Rezultat 3D laserskega skeniranja je oblak točk, ki ga lahko s primernim programskim orodjem predstavimo in obdelamo na računalniku. Med procesom skeniranja se samostojno obnavlja in tako omogoča spremljanje poteka skeniranja. Točke v oblaku točk imajo koordinate v lokalnem ali globalnem koordinatnem sistemu, s čimer zagotovimo visoko stopnjo geometrične popolnosti in detajla terena oziroma objekta ter hkrati zmanjšamo stroške dodatnih izmer.

Vse točke v oblaku točk imajo 3D koordinate  $(x, y, z)$  v skenerjevem koordinatnem sistemu z izhodiščem v skenerjevem centru. Rezultat skeniranja večjih objektov je več skenogramov, ki jih je potrebno v fazi obdelave združiti v enoten 3D model. Skenograme združujemo na osnovi najmanj treh identičnih veznih točk, ki so predhodno označene s posebnimi tarčami. Kadar želimo, da imajo točke v prostorskem oblaku točk podane koordinate v državnem koordinatnem sistemu, uporabimo t.i. oslonilne točke, ki imajo tako koordinate v skenerjevem

lokalnem koordinatnem sistemu, kakor tudi v državnem koordinatnem sistemu. Oslonilne točke določimo s klasičnimi geodetskimi metodami in nam služijo za transformacijo med lokalnim in globalnim referenčnim sistemom.

## **2.4 Uporaba 3D laserskega skenerja in oblaka točk**

3D laserski skenerji se uporabljajo [Boehler et al., 2007]:

- stacionarno na stalnem oziroma nespremenljivem področju (za kontrolo kvalitete v proizvodnih linijah),
- kot mobilni sistem na stativih ali podobnih stojalih za terestrične namene,
- kot letalski sistemi za topografsko uporabo.

Možnosti uporabe oblaka točk:

- točke lahko poljubno obdelamo, tvorimo najboljše prilegajoče se elemente, izdelamo trikotniške mreže ter izrišemo 2D prikaze objektov,
- med skeniranjem lahko oblak točk obračamo in gledamo z različnih perspektiv in oddaljenosti,
- točke, ki smo jih zajeli na motečih objektih, lahko enostavno odstranimo,
- med različnimi točkami v oblaku točk lahko izvajamo meritve.

3D laserski skenerji so uporabni tudi v povezavi z digitalnimi kamerami. S kombinacijo laserja in visoko ločljivega digitalnega fotoaparata lahko pridobivamo informacije za najrazličnejše namene. Fotoaparat, katerega pozicija in orientacija sta glede na koordinatni sistem skenerja dobro definirana, pritrdimo nad 3D laserski skener in fotografiramo celotno območje, ki ga zajame senzor laserskega skenerja. Rezultat so posnetki, ki jih lahko uporabljamo kot teksturo 3D modelov, za izdelavo fotorealističnih prikazov ter ostalih vizualizacij skeniranih objektov.

## **2.5 Koordinatni sistemi sistema za 3D lasersko skeniranje**

Sistem 3D laserskega skeniranja uporablja več različnih koordinatnih sistemov, s katerimi lahko združujemo posamezne skenograme iz različnih stojišč v celoto ter umeščamo skenirane objekte v prostor [Jansa et al., 2007].

### **2.5.1 Skenerjev lastni koordinatni sistem (SLKS)**

Je koordinatni sistem, v katerem skener pridobi surove podatke in temelji na merjenju s polarnimi koordinatami. Definiran je z rotacijo skenerjeve osi (izhodišče za merjenje kotov) in referenčne osi (npr. azimut = 0).

### **2.5.2 Projektni koordinatni sistem (PRKS)**

Je lokalni, pomožni koordinatni sistem, ki ga definira uporabnik. PRKS navadno predstavlja obstoječi koordinatni sistem skenerja prvega skenograma. Glede na prvi skenogram se nato vsi ostali SLKS transformirajo v skupni PRKS. Je lokalni koordinatni sistem, katerega področje ne presega 10 km.

### **2.5.3 Globalni koordinatni sistem (GLKS)**

Znotraj globalnega koordinatnega sistema je umeščen projektni koordinatni sistem, ponavadi je to državni referenčni koordinatni sistem.

### **2.5.4 Koordinatni sistem fotoaparata (KSF)**

Koordinatni sistem se nanaša na fotoaparat, ki je pritrjen vrh naprave za skeniranje ter zagotavlja visoko ločljive posnetke.

## 2.6 Registracija

Za skeniranje večjih objektov je potrebno skenirati z različnih stojišč in iz različnih smeri (spreminjamo smer skeniranja ali rotiramo sam objekt). Pri združevanju posameznih skenogramov v celoto je zato pomemben proces registracije.

**Registracija** je proces spajanja več delnih skenogramov v pravilen in relativen 3D geometrijski položaj, znotraj enega koordinatnega sistema. Redko namreč zadošča zajem predela terena ali strukture z enim skenogramom (ali so predeli preveč pomembni, da bi bili zajeti le z enim skenogramom ali pa so ključni deli objekta oz. strukture skriti s skenerjeve prve postavitve).

Za zajem mora biti skener ali glava skenerja fizično premaknjena na drugo lokacijo ali orientirana proti površini objekta, ki ga na prvem skenogramu ne moremo zajeti. Ta proces je ponavljajoč, dokler niso vsi predeli oziroma strukture, ki morajo biti skenirani, zajeti [Jacobs, 2007].

Pri zajemanju podatkov so skenogrami v poljubnem koordinatnem sistemu. Za potrebe združevanja različnih skenogramov je potrebno njihov položaj in orientacijo spremeniti tako, da so vsi skenogrami združeni v skupen koordinatni sistem. Ta proces je poznan pod imenom vklop oblaka točk ali registracija.

Če želimo zbrane podatke referencirati v svetovni koordinatni sistem, je potrebno izvesti še dodatna geodetska merjenja. V primeru aero laserskega skeniranja je ta pogoj izpolnjen direktno z uporabo položaja in orientacije opazovanja (GPS metoda). Pri uporabi laserskega skenerja, pritrjenega na roki, so koordinate merjenja določene v znanem koordinatnem sistemu in zato registracija ni nujno potrebna [Mills et al., 2007].



## 2.7 Georeferenciranje

Georeferenciranje je standardni proces združevanja skeniranih ali drugih izmerjenih podatkov v ustrezen koordinatni sistem. Koordinatni sistemi so lahko: položajna ravnina, lokalna ploskev, določen položaj, določena tovarniška oprema, itd. Registracija in georeferenciranje se lahko izvajata hkrati, skenogrami se povezujejo med seboj na območjih, kjer je registriran referenčni skenogram povezava za kontrolo. Je skupen, celo s ponovno določeno mejo skenerja okoli predela oziroma strukture, dodatek visoko definirani izmeri z drugimi metodami merjenja [Jacobs, 2007].

## 2.8 Problemi 3D laserskega skeniranja

### 2.8.1 Natančnost

Natančnost sistema je določena z natančnostjo kota  $\varphi$ , ki je izpeljan iz slike laserske pike na CCD. Kot (rotacija zrcala) je natančno določen iz kodiranega kroga in baze pri kalibraciji (če ni določen pravilno, bo nepravilna lokacija točke izračunana poljubno, nekje na oddajniku izvora žarka). Če je kot  $\varphi$  edina izvorna napaka, je natančnost točke določena le z natančnostjo razdalje med laserskim oddajnikom in se manjša s kvadratom te razdalje. S skeniranjem površin ob kotu približno  $45^\circ$  so lahko doseženi boljši rezultati (gostota oblaka točk je manjša, ker smer komponente največje napake ni več navpična na površino). Pri skeniranju izumetničenih objektov, kot so npr. skulpture, je nujno potrebno zmanjšati raven gostote oblaka točk in izdelati ugodnejše površine za triangulacijo [Boehler et al., 2007].

### 2.8.2 Rob / Meja

Pri premiku laserskega žarka preko roba, se ne odbije celoten, temveč le majhen del žarka. Kamera pri tem registrira del žarka in ga interpretira kot celega. Rezultat je izdelava napačnih

točk, ki se premikajo v smeri laserja. Po skeniranju morajo biti te točke odstranjene iz oblaka točk s pomočjo filtracije, ki je lahko precej zamudna [Boehler et al., 2007].

### **2.8.3 Vpliv materialov in razsvetljave**

Lasersko skeniranje je optična metoda, zato je potrebno upoštevati vpliv, ki ga imajo razsvetljava in material na odboj laserske pike in na rezultat kvalitete merjenih točk. Pomembni so: jakost svetlobe v okolici skeniranega objekta ter barva in površina objekta. Najboljši odboj laserske svetlobe dosežemo na gladki rdeči površini, kot npr. rdeča krogla. Pri temnih in hrapavih objektih se absorbira veliko laserske svetlobe, zaznati je mogoče veliko izgubljenih točk [Boehler et al., 2007].

## **2.9 Prednosti 3D laserskega skeniranja**

Splošne prednosti 3D terestričnega laserskega skeniranja so [URSZ, 2007]:

- hiter zajem podatkov t.j. velika hitrost delovanja (100 ali 1.000 točk/sekundo),
- cenejši zajem podatkov o objektih in topografiji glede na ostale metode,
- zajem podatkov brez dotikanja (uporabno za skeniranje nevarnih objektov),
- pridobitev koordinat poteka samodejno in v sistematičnem vzorcu,
- do-meritve niso potrebne, saj so vsi objekti v vidnem polju 3D laserskega skenerja,
- oblake točk lahko uporabimo večkrat in za različne namene,
- zmožnost delovanja v popolni temi,
- večja varnost pri zajemu podatkov,
- skener upravlja en sam operater.

V primerjavi s tradicionalnimi metodami izmere objektov so lastnosti 3D laserskega skeniranja naslednje [Jacobs, 2007]:

- čas terenskega skeniranja in delovni stroški skeniranja so manjši,
- čas pisarniške obdelave in delovni stroški so enaki ali višji,

- stroški amortizacije opreme skeniranja so višji,
- pomožni stroški skeniranja so manjši,
- povečano zaupanje za mnoga oddaljena merjenja.

Laserski skenerji ponujajo veliko možnosti za zajem podatkov na osnovi načel daljinskega zaznavanja [Remote measurement et al., 2007]:

- različen položaj za zajem objektov, ki so težko dostopni (vertikalne skalne stene, različni radioaktivni objekti, industrijske napeljave in proizvodne linije),
- različen položaj za zajem objektov, ki so zaradi svoje narave nevarni (nestabilni objekti, zelo prometne ceste, reaktorji, vroči materiali...),
- različen položaj za zajem objektov, ki so občutljivi na dotik (objekti naravne in kulturne dediščine, ostanki struktur, objekti, ki so povezani z najrazličnejšimi kriminalnimi dejanji...).

Prednosti laserskega načina merjenja so tudi [Jansa et al., 2007]:

- z laserskim skenerjem dobimo veliko gostoto točk na podlagi polarnega načina merjenja, točke imajo visoko natančnost, ne glede na obliko merjenega objekta,
- z enega samega stojišča lahko pridobimo informacije za celotni zorni kot kamere,
- laserski žarek prodre skozi vegetacijo, kar pomeni, da s skeniranjem dobimo podatke tako z vrha vegetacije kot tudi pod njo (skenerji zaznajo tako prvi, kot tudi zadnji odboj laserskega žarka),
- lasersko skeniranje je t.i. aktivna tehnologija, zato pomanjkanje dnevne svetlobe ni moteče, je skoraj neodvisno od senc ali barvnih odstopanj na objektu, do napak lahko pride le ob uporabi bliskavice pri vgrajeni kameri,
- pri laserskem skeniranju dobimo rezultate skoraj v realnem času, pri čemer se za razliko od klasične fotogrametrije izognemo počasnemu obdelovanju slik.

Prednosti laserskega skeniranja v povezavi s fotografskimi slikami so [Jansa et al., 2007]:

- fotogrametrija vsebuje pomembne in zelo detajlne informacije o radiometričnih karakteristikah objekta,
- informacije, ki jih zaradi najrazličnejših vplivov pri merjenju nismo mogli zajeti, lahko naknadno pridobimo tudi z obdelavo slik, ki so nastale med skeniranjem,
- s slikami si lahko pomagamo tudi pri obdelavi skeniranih podatkov oziroma lahko z njimi kvalitativno ovrednotimo pridobljene podatke,
- v primerih, ko so za določanje oblike objektov zadostni le podatki skeniranja, lahko posnete slike uporabimo za izdelavo foto-realističnih objektov,
- glavna prednost laserskega skeniranja v primerjavi s fotogrametrijo je hitro in direktno zajemanje velikega števila točk (proces merjenja ne potrebuje dolgotrajnega pripravljanja, razen za vzpostavitev novega stojišča).

## **2.10 Slabosti 3D laserskega skeniranja**

Lasersko skeniranje ima naslednje slabosti [Boehler et al., 2007]:

- merjenje brez uporabe tarč lahko zavzame katerokoli drugo točko strukture (t.i. nepravi kot, skener lahko zajame kakšen drug detajl, ki se nahaja med instrumentom in želeno strukturo),
- natančnost laserskega skeniranja ne more doseči natančnosti geodetskih instrumentov, ne omogoča možnosti povečanja natančnosti z nadštevilnimi meritvami, kakor je to pri fotogrametriji,
- ne omogoča neomejene geometrijske natančnosti in popolnosti objektov in pokrajin vseh velikosti pri nizkih stroških,
- skeniranje lahko vzame veliko časa, da doseženo rezultate zahtevane natančnosti,
- lasersko skeniranje ni tako prilagodljivo, kakor kamera in zahteva več časa za skeniranje objekta (kamera lahko zabeleži podatke v nekaj sekundah),
- lasersko skeniranje ne prodre skozi objekte in okrogle kote,
- sistem ima minimum in maksimum delovanja oziroma dometa, v katerem deluje,
- problemi z določenim tipom materiala, kot sta marmorna ali pozlačena površina,

- oblak točk, pridobljen z laserskim skeniranjem, je lahko uporaben samostojno, vendar je mnogo bolj verjetno, da bo oblak točk prej sredstvo za doseganje cilja kakor končni produkt,
- lasersko skeniranje je bolj primerno za pridobivanje informacij o površinah, kakor robov in uničenih točk.

Slabosti so tudi [URSZ, 2007]:

- razmerje med porabljenim časom za skeniranje in pisarniško obdelavo je 1:3 ali 1:5,
- zahteva kakovostno programsko opremo,
- skenirana površina ne zagotavlja zadostnega odboja laserske svetlobe,
- skenogram vključuje šume zaradi odboja od drugih objektov.

### **3 OSNOVNI ELEMENTI 3D LASERSKIH SKENERJEV**

#### **3.1 Natančnost merjenja razdalj**

Kot je objavljeno v Boehler et al. (2007), je natančnost merjenja razdalje odvisna predvsem od intenzivnosti odbite laserske svetlobe, torej od odsevnosti površine objekta, ki je odvisna od vpadnega kota in lastnosti površine. Posredno vpliva na natančnost tudi občutljivost laserskega skenerja na stanje atmosfere in difuzno svetlobo.

Skeniranje bi morali izvajati s primernim skenerjem (glede na velikost in domet posameznega objekta) za določitev položaja točk, velikosti objekta in oddaljenost od posameznega objekta. Standardna deviacija nekaj milimetrov za posamezno točko skenirane površine ni tako očitna, če je ta točka del elementa, ki ima pravilno geometrijo (ravnina, cilindar ali podobno) in če se uporablja za določitev parametrov, ki opisujejo element v grafični predstavitvi. Če je potrebno modelirati nepravilno površino (ponavadi s TIN mrežo), so lahko oblaki razpršenih točk problematični pri obdelavi, posebno kadar prisotnost robov ne dovoli uporabe glajenja celotne površine.

V splošnem uporabljamo za potrebe terestričnih meritev tri tipe skenerjev, ki imajo različne natančnosti. Njihova delitev je prikazana v Preglednici 1.

#### **3.2 Hitrost skeniranja**

Kljub veliki hitrosti zajemanja podatkov lahko skeniranje postane časovno potraten proces, kadar je potrebna velika gostota točk za doseganje visoke ločljivosti zajetega objekta. Hitrost zajemanja 100 točk na sekundo lahko obravnavamo kot počasno skeniranje, medtem ko je hitrost okoli 1000 točk na sekundo v večini primerov zadovoljiva [Boehler et al., 2007].

Pri skeniranju je pomemben tudi čas, ki ga porabimo za transport na teren, za pripravo procesa skeniranja, za meritve kontrolnih točk, za pisarniško obdelavo podatkov, pripravo opreme, itd.

### **3.3 Ločljivost oziroma gostota skeniranja in velikost pike**

Teoretično je ločljivost objekta funkcija velikosti kotnega zasuka zrcala, ki usmerja laserski žarek in ga je še mogoče izvesti. Če je potrebna večja ločljivost, je potrebno preveriti, kako dobro je žarek izostren in ali je zagotovljeno avtomatsko ostrenje za variirajoče razdalje.

Gostota skeniranja 3D laserskih skenerjev z enim zrcalom je odvisna od kotnega zasuka zrcala, ki omogoča navpično odklanjanje laserskega žarka in od kotnega zasuka merilne glave, ki omogoča vodoravne premike laserskega žarka. Pri 3D laserskih skenerjih z dvema zrcaloma je gostota skeniranja odvisna le od kotnega zasuka zrcal [URSZ, 2007].

Velikost laserske svetlobne pike je lokalna ločljivost in je odvisna od natančnosti fokusiranja.

### **3.4 Doseg in vpliv motečega širjenja žarkov**

Doseg 3D skenerjev je odvisen od odbojnosti materialov, stanja atmosfere (čistost atmosfere in dodatnega sevanja, ki ga povzroča sonce ter sevanja, ki ga povzročajo merjeni objekti ali objekti, ki so v bližini poti skenerjevega žarka) ter difuzne svetlobe. Na splošno so impulzni skenerji vzdržljivejši, medtem ko so fazni instrumenti in triangulacijski instrumenti zelo občutljivi in velikokrat zahtevajo nočno merjenje [Boehler et al., 2007].

### **3.5 Vidno polje**

Velikost vidnega polja, ki ga razdelimo na vodoravno in navpično sestavino, je odvisna od izvedbe 3D laserskega skeniranja. Fiksni skenerji, ki nimajo možnosti samodejne rotacije okoli osi med skeniranjem, imajo manjše vidno polje (omejeno z zgradbo snemalne glave). Običajno lahko skenirajo vidno polje okoli  $40^\circ \times 40^\circ$ . Skenerji z eno rotacijsko osjo pokrijejo okoli  $45^\circ \times 320^\circ$ , medtem ko lahko instrumenti z dvema rotacijskima osema (panoramski skenerji) skenirajo kjerkoli, razen na površini stožca okoli  $30^\circ$  okoli nadirja. Velikost vidnega polja je lahko zelo pomembna v zaprtih prostorih, kjer lahko skenerji zbirajo vrednosti podatkov iz enega stojišča brez posredovanja operaterja [URSZ, 2007].

### **3.6 Naprave za registracijo**

V kolikor morajo biti posamezni skenogrami iz različnih opazovanih stojišč združeni in/ali transformirani v skupni koordinatni sistem, je priporočljiva uporaba posebne tarče na območju objekta, ki se lahko preprosto zaznajo s skenerjevim programom. Nekateri proizvajalci ponujajo posebne tarče (krogle, ravne tarče z visoko odbojnostjo), ki so prirejene njihovi strojni in programski opremi in so primerne tudi kot tarče za tahimetrijo in fotogrametrične meritve [Boehler et al., 2007].

### **3.7 Slikovne kamere**

Mnogo aplikacij poizveduje o informacijah o sestavi objekta v dodatku geometrijske definicije objekta. Če so strukture narisane na 3D model, je lahko foto-realističen efekt dosežen. Nekateri skenerji registrirajo intenzivnost vrnjenega signala. Ponavadi to ni dovolj primerno za pridobivanje informacije o sestavi za »lepljenje« tekstur na objekt (enako pri kamerah za triangulacijsko skeniranje, ki so prirejene za zaznavo žarka in ne za pridobivanje slik). Nekateri uporabniki zahtevajo vključitev visoko kvalitetnih (barvnih) kamer v opremo za skeniranje. Rešitev so lahko vmesniki za prilagoditev kamere skenerja. V tem primeru so



lahko relativni položaji skenerja in kamere kalibrirani, ker olajšajo obdelavo rezultatov skeniranja in pripadajočih slik [Boehler et al., 2007].

### **3.8 Transport**

Idealno bi bilo, da bi bila oprema za skeniranje majhna in lahka. Večina skenerjev srednjega in daljšega dometa je še vedno obsežnih, posebna pozornost mora biti posvečena tudi načinu shranjevanja skenerja in opremi za transport [Boehler et al., 2007].

### **3.9 Napajanje**

Skenerji, ki delujejo na baterije, so bolj vsestranski za uporabo kakor tisti, ki potrebujejo oskrbo iz električnega omrežja. Prenosni generatorji so v večini primerov primerni, toda skoraj nujna je uporaba dolgih kablov pri delu v notranjosti ali v jami [Boehler et al., 2007].

### **3.10 Programska oprema**

Uporabljena programska oprema mora omogočati hitro in preprosto obdelavo skeniranih podatkov. Možnost opazovanja procesa skeniranja in ocenjevanje preostalega časa skeniranja je lahko v nekaterih primerih zelo uporabna. Zaželjene so lastnosti kot npr. avtomatsko odkrivanje tarč za povezave skenogramov in kontrolnih točk ter dinamična ureditev ločljivosti. Prav tako je priporočljivo, da imamo pri skeniranju razgibanih objektov vsaj grob vpogled v rezultate skeniranja (le tako dobimo vtis, kako delo poteka, kakšni bodo predvidoma rezultati in ali je celoten objekt sploh zajet) [Boehler et al., 2007].

## 4 TERESTRIČNO 3D LASERSKO SKENIRANJE

Terestrično 3D lasersko skeniranje je novejša geodetska metoda, omogoča brezdottično merjenje prostorskih predmetov, njihovo modeliranje in vizualizacijo. Večina skenerjev uporablja za določanje prostorskega položaja detajlnih točk prostorsko polarno metodo, kjer je dolžina merjena na osnovi faznega ali impulznega načina merjenja razdalje, koti so določeni na osnovi čitanja položaja ravnih zrcal oscilatorja, prizem ali iz rotiranja glave skenerja. Med merjenjem skener razvršča objekt z zelo gosto mrežo detajlnih točk v navaden interval kotov, t.i. oblak točk. Posamezna merjenja lahko dosežejo od deset do več tisoč detajlnih točk [Kremen et al., 2007].

Definicija terestričnega 3D laserskega skeniranja [Pfeifer, 2007]:

- je tehnika,
- uporablja lasersko svetlobo,
- za merjenje,
- z visoko hitrostjo,
- v vzorec pravilne gostote,
- direktno,
- 3D koordinate točk,
- na površini predmeta,
- z zemeljskega površja.

Preglednica 1 prikazuje delitev terestričnih 3D laserskih skenerjev glede na doseg, glede na način merjenja razdalje pa ločimo [Boehler et al., 2007]:

- »ranging« skenerji oz. skenerji z neposrednim merjenjem razdalje:
  - fazni skenerji,
  - impulzni skenerji.
- triangulacijski skenerji.

## 4.1 Skenerji z neposrednim merjenjem razdalje (»RANGING« skenerji)

Različne tehnične rešitve omogočajo različne načine merjenja dolžin. Terestrično 3D lasersko skeniranje pozna dva načina merjenja dolžin od instrumenta do objekta:

- impulzno,
- fazno.

Ločimo torej impulzne in fazne 3D laserske skenerje.

### 4.1.1 Impulzni skenerji (*angl. Time of flight*)

Pri impulznih skenerjih izvor svetlobe v instrumentu generira svetlobno valovanje v obliki svetlobnih impulzov.

Impulzni skenerji imajo lasersko diodo, ki pošilja impulzni laserski žarek na skeniran objekt. Signal se razpršeno odbije od površine in del svetlobe se vrne v sprejemnik. Merjen je čas, ki je potreben za potovanje žarka od laserske diode do površine objekta in nazaj, dolžina do objekta je izračunana s pomočjo hitrosti svetlobe. Ta princip je dobro poznan pri elektronskih tahimetrih.

Skenerji uporabljajo majhne rotirajoče naprave za kodno odklanjanje žarka (najmanj eno ali dve zrcali), za izračun razdalje pa uporabljajo preproste algoritme, kar lahko vodi do slabše natančnosti. Tipični standardni odklon za merjenje razdalje znaša nekaj milimetrov. Ker so razdalje majhne, je ta natančnost enaka za vso površino skeniranega objekta. Na natančnost določitve prostorskih koordinat vpliva tudi natančnost določitve kotnega odklona laserskega žarka [Boehler et al., 2007].

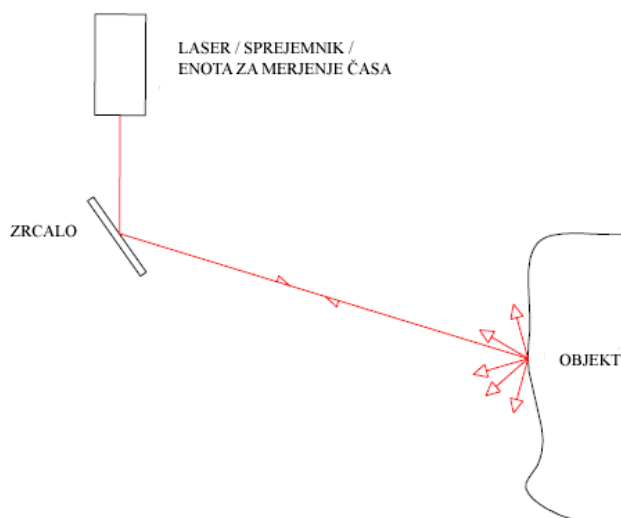


Diagram 3: Princip delovanja skenerjev z neposrednim merjenjem razdalje [Boehler et al., 2007].

#### 4.1.2 Fazni skenerji

Pri faznih skenerjih je oddani žarek moduliran s harmoničnim valovanjem, razdalja se računa na podlagi fazne razlike med oddanim in sprejetim valovanjem. Rezultati določitve razdalje so natančnejši zaradi podrobnejše analize signala. Ker je zahtevana visoka jakost odbitega valovanja se lahko zgodi, da imajo takšni skenerji zmanjšan doseg delovanja [Boehler et al., 2007]. Ta metoda je znana pri faznih elektronskih razdaljemerih.

#### 4.1.3 Določitev kartezičnih koordinat

Način določitve koordinat posameznih točk je enak tako za lasersko skeniranje z enim zrcalom kakor tudi z dvema zrcaloma. Opisani način določitve koordinat je prikazan na primeru 3D laserskega skeniranja z enim zrcalom.

Laserski žarek, ki se širi iz izvora svetlobe, potuje do zrcala, ki se vrti. Žarek se na zrcalu odbije ter pod kotom  $\xi$  zapusti skener. Ko zajame celotni vertikalni profil, se skener zasuka za majhen kot  $\Delta\alpha$  ter začne z zajemom naslednjega vertikalnega profila. Na ta način pridobimo za vsako točko polarne koordinate  $\alpha$ ,  $\xi$  in  $s$ .

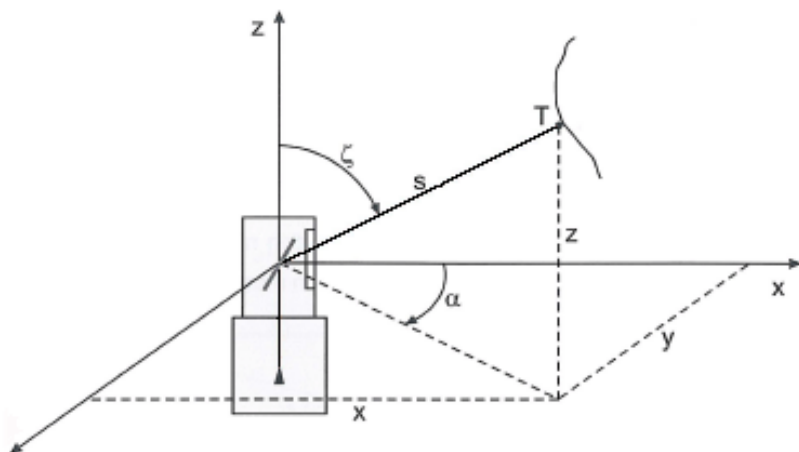


Diagram 4: Princip določitve kartezičnih koordinat pri laserskem skeniranju z enim zrcalom [Kraus, 2004].

**Lokalne kartezične koordinate posamezne točke so [Kraus, 2004]:**

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s \cdot \sin \xi \cdot \sin \alpha \\ s \cdot \sin \xi \cdot \cos \alpha \\ s \cdot \cos \xi \end{bmatrix}$$

kjer je:

- $\xi$  ... zenitna razdalje točke T,
- $\alpha$  ... horizontalni kot zasuka glave skenerja,
- $s$  ... razdalja do točke T.

## 4.2 Triangulacijski skenerji

Triangulacijski 3D laserski skenerji postajajo vedno bolj običajno sredstvo za pridobivanje tridimenzionalne geometrije objektov. Je tehnika pridobivanja podatkov, kjer je razdalja do objekta izračunana na podlagi izvora svetlobe in video kamere. Dosegljiva sta relativna čvrstost in točnost.

Izdelava skenerja je zelo enostavna, uporablja preprosto geometrijo ter splošno primerne dele. Natančnost, ki jo laserski skener lahko doseže, je odvisna od cene komponent (izboljšanje natančnosti je mogoče doseči z uporabo dražjih komponent).

Triangulacijski skenerji računajo 3D koordinate merjenja s triangulacijo položaja pike ali črte laserske svetlobe. Nekateri sistemi triangulacije zahtevajo postavitve skeniranega objekta na premično vrtljivo ploščo, ki rotira objekt pred skenerjem, ki je postavljen statično. Triangulacijski sistem je lahko pritrjen (montiran) tudi na mehanično roko, vendar so bolj uporabni v posebnih specializiranih študijih ali laboratorijih. Razdalja skeniranja je manjša kakor 0.5 m, natančnost merjenja je povprečno 0.1 mm. Obstajajo tudi triangulacijski sistemi, ki skenirajo merjeni žarek avtomatično z uporabo mehaničnih prizem ali zrcal. Ti sistemi se lahko primerjajo s kamero na stativu, ki se uporablja za zbiranje prekrivanja tridimenzionalnih podob predmeta oddaljenosti do 2 m. Primerni so za registriranje majhnih arhitekturnih značilnosti, kot npr. detajlna izklesanost ali izrezano znamenje. Nekateri sistemi, ki delujejo na osnovi triangulaciji, dovoljujejo merjenja na razdalji do 25 m, vendar lahko pri tej razdalji pričakujemo dodatno zmanjšanje učinkovitosti in natančnosti. Triangulacijski skenerji naredijo nezadostno oziroma slabo žarečo svetlobo, zato je pogosto zahtevano začasno senčenje. [Mills et al., 2007].

Triangulacijski skenerji temeljijo na osnovi triangulacije. Svetlobni žarek, ki ga odda izvor laserske svetlobe, se projicira na površino skeniranega objekta, položaj točke laserskega žarka pa se registrira s CCD kamero. Laserski žarek je proti objektu usmerjen pod določenim kotom, dolžina baze je znana iz postopka kalibracije 3D laserskega skenerja, razdalja med izvorom laserske svetlobe in objektom je izračunana iz kota in dolžine baze. Na ta način

uporabljena preprosta geometrija je lahko uporabljena za določitev 3D prostorskih (XYZ) koordinat. Obstajata dve rešitvi določitve s pomočjo ene ali dveh CCD kamer.

Pika je lahko skenirana dvodimenzionalno, ali pa je laserska črta skenirana enodimenzionalno poševno na sliko. Nizka moč laserskega žarka je transformirana s pomočjo cilindričnih leč v vertikalno ravnino, za razsvetlitev objekta v vidnem polju. Video kamera opazuje objekt, kjer je premik črte od sredine položaja sorazmerno linearen na globino objekta [Fundamentals: Laser ranging using triangulation, 2007].

#### 4.2.1 Skener z eno kamero

Skener z eno kamero sestavljata [Boehler et al., 2007]:

- oddajnik laserskega signala, ki pošilja laserski žarek pod določenim kotom z enega dela mehanične baze proti objektu,
- CCD kamera, fiksirana na drugi strani baze (CCD kamera zaznava lasersko piko oziroma linijo na objektu).

Natančnost razdalje med instrumentom in objektom se manjša s kvadratom razdalje, vendar dolžine baze zaradi praktičnih razlogov ne moremo povečati po lastni presoji. Pomembni so za merjenje kratkih razdalj in majhnih objektov, ker so mnogo bolj natančni kakor »ranging« skenerji.

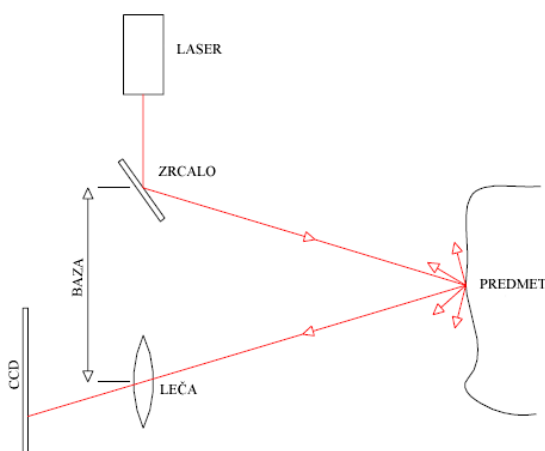


Diagram 5: Princip delovanja triangulacijskega skenerja z eno lečo [Boehler et al., 2007].

#### 4.2.2 Skener z dvema kamerama

Tu gre za uporabo dveh CCD kamer, ki sta nameščeni vsaka na svoji strani baze. Pika ali vzorec, ki je proizveden z oddaljenimi projektorji, nima funkcije merjenja. Imamo lahko več različnih rešitev.

Projekcija je lahko sestavljena iz premikajoče pike ali linije premikajoče plasti vzorca ali pa po statičnem poljubnem nepremičnem vzorcu. Geometrijska rešitev je enaka kakor v principu z eno kamero, zato so tudi rezultati enake natančnosti.

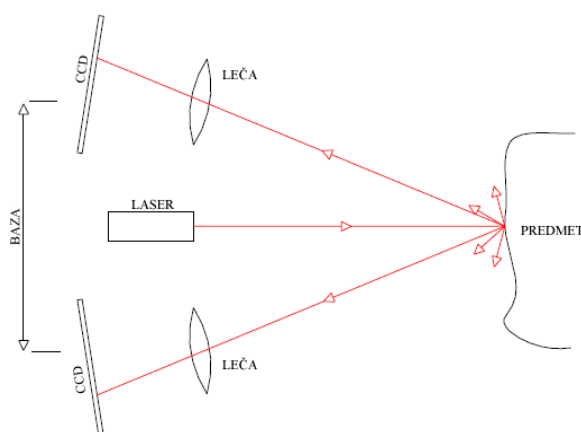


Diagram 6: Princip delovanja triangulacijskega skenerja z dvema lečama [Boehler et al., 2007].

Vse naprave, ki uporabljajo dvojno kamero, ne omogočajo visoke gostote točk, vse tudi ne dosežejo 3D koordinat v realnem času. Če je zagotovljena visoka gostota točk ter obdelava v realnem času, so ti instrumenti alternativa za več, kakor le naprave za skeniranje ter utegnejo biti cenjeni tudi za praktične zahteve.



### 4.2.3 Določitev kartezičnih koordinat

Laserski skener pošilja laserski žarek iz središča  $O_1$ . Žarek »otipa« točke v horizontalnem profilu. Žarek se v horizontalni smeri spreminja z vrednostjo kota  $\alpha$ . Na drugi strani baze je nameščena CCD kamera, ki je usmerjena tako, da je vzporedna z osjo  $y$ . Pot laserskega žarka po profilu zajame CCD kamera, ki mora omogočiti visoko frekvenco obnavljanja slike. Slikovna ravnina kamere sovpada z osjo  $\zeta$ . Za vsak profil dobimo svojo podobo [Kraus, 2004].

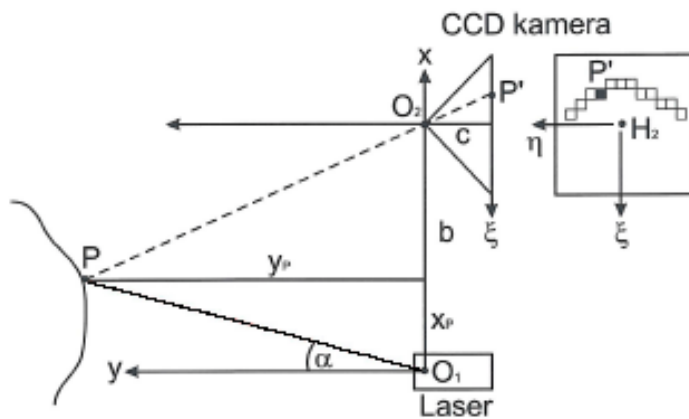


Diagram 7: Princip določitve kartezičnih koordinat s triangulacijskim skenerjem z eno kamero (pogled od zgoraj) [Kraus, 2004].

Veljajo zveze [Kraus, 2004]:

$$\frac{x_P}{y_P} = \tan \alpha \dots (1)$$

$$\frac{b - x_P}{y_P} = \frac{-\zeta}{c} \dots (2)$$

$$\frac{z_P}{y_P} = \frac{\eta}{c} \dots (3)$$

Iz zvez (1) in (2) sledi enačba za izračun  $y_P$ . Iz enačbe (2) pa pridobimo enačbo za izračun  $x_P$ . Tretjo koordinato  $z_P$  pa dobimo iz zveze (3). Kartezične koordinate točke P v lokalnem koordinatnem sistemu dobimo kot [ Kraus, 2004]:

$$y_P = \frac{b}{\tan \alpha - \frac{\zeta}{c}} \dots (4)$$

$$x_P = y_P \cdot \frac{\zeta}{c} - b \dots (5)$$

$$z_P = y_P \cdot \frac{\eta}{c} \dots (6)$$

kjer je:

- $\zeta, \eta$  ... slikovne koordinate točk P',
- $c$  ... konstanta kamere,
- $b$  ... dolžina baze,
- ... kot zasuka laserskega žarka.



## 5 PRAKTIČNA UPORABA DOMAČEGA 3D LASERSKEGA SKENERJA



Diagram 8: Programski paket David.

Izbira komponent za sestavo 3D laserskega skenerja je bila odvisna od ponudbe na tržišču. Tržišče nudi za nekatere sestavne dele domačega 3D laserskega skenerja večjo ponudbo, za nekatere manjšo. Ker je lasersko skeniranje relativno nova metoda pridobivanja podatkov, je manjše tudi predhodno znanje o značilnostih, prednostih in slabostih posameznih delov skenerja, s tem pa tudi vpliv posameznih komponent oziroma njihovo obnašanje med samim procesom skeniranja.

V prilogi A so napisana navodila za uporabo programskega paketa DAVID. Celoten postopek uporabe programskega paketa DAVID je prikazan tudi na diagramu v prilogi E.

## 5.1 Tehnične karakteristike posameznih komponent

Domača izdelava 3D terestričnega laserskega skenerja temelji na uporabi preprostih komponent, ki so dostopne na tržišču. Za izdelavo skenerja so bile uporabljene komponente:

- prenosni računalnik z USB priključkom,
- digitalni fotoaparati, ki omogoča snemanje video posnetkov,
- laser,
- kalibracijska tabla,
- programski paket.

Pred samo izdelavo laserskega skenerja je bilo potrebno pridobiti vse komponente, ki so bile zahtevane za izdelavo. Potrebno je bilo narediti analizo značilnosti posameznih komponent, s čimer je bil olajšan nakup. Ker so nekatere komponente v vsakdanji rabi neobičajne, je bila potrebna njihova temeljitejša analiza, predvsem analiza delovanja.

Veliko raziskovanja o delovanju, predvsem pri priključitvi na računalnik, je bilo narejenega pri izbiri in nabavi kamere. Za uspešno delovanje 3D laserskega skenerja mora imeti kamera možnost zajemanja video slike, s kar se da visoko ločljivostjo. Najlažji izbor za uporabo pri 3D laserskem skeniranju bi bil nakup in uporaba kamere, kakršno se uporablja za komunikacijo preko spleta t.i. spletna kamera (angl. Web-camera). Spletna kamera je cenovno

zelo ugodna, njena priključitev preprosta, pomanjkljivost pa je v njeni ločljivosti. V splošnem so vse spletne kamere slabše ločljivosti – trenutno je največja ločljivost spletne kamere 1.3 mega pikslov. Med samim procesom skeniranja sem ugotovila, da so rezultati bistveno boljši, če je uporabljena kamera večje ločljivosti. Ugodna bi bila tudi uporaba navadne kamere, ki pa ni bila uporabljena zaradi večjih stroškov nakupa.

Nekaj težav je bilo tudi pri nakupu laserja, ker laserji, ki so v prosti prodaji ob nizki ceni, večinoma proizvajajo lasersko piko in ne laserske črte, kakor jo zahteva izdelava domačega laserskega skenerja. Poleg tega ti laserji proizvajajo širši laserski žarek, za skeniranje pa je zaželjena uporaba laserja, ki ima čim tanjši laserski žarek.

Mogoča bi bila tudi uporaba navadnega laserja, ki proizvede lasersko piko, pri čemer bi bilo potrebno kupiti še leče, ki bi lasersko piko razpršile, rezultat pa bi bila laserska črta, ki je za skeniranje nujno potrebna. To so cilindrične leče, ki niso dostopne na prostem tržišču oziroma prodajalci, ki prodajajo klasične leče, ne vedo, kje in kako se lahko takšne leče nabavi. Ne samo, da bi bila leča uporabna pri uporabi laserske pike, temveč bi jo lahko uporabila tudi v primeru laserske črte, kjer naj bi leča laserski žarek izostrila ter ga tudi naredila ožjega.

Najmanj težav pri izboru opreme je bilo pri izbiri računalnika, saj je bil uporabljen prenosni računalnik, ki je namenjen vsakdanji uporabi.

Cenovno je bila izdelava 3D terestričnega laserskega skenerja zelo ugodna, saj so bile komponente, ki jih je bilo potrebno kupiti, na tržišču dostopne ob ugodni ceni. Največji strošek, ki ga ima uporabnik pri izdelavi skenerja sta računalnik in digitalni fotoaparati, vendar sta v današnjem času oba že nepogrešljivi napravi za vsakdanjo uporabo. Poleg kamere, laserja ter računalnika je za izdelavo skenerja zahtevana še izdelava kalibracijske table, katerega princip izdelave je opisan v prilogi A. Za delovanje 3D terestričnega laserskega skenerja je bila poleg zgoraj navedene strojne opreme potrebna tudi programska oprema. Programski paket DAVID sem našla na spletnih straneh in ga brezplačno prenesla na pomnilnik računalnika.

Poleg vseh tehničnih zahtev, domača izdelava 3D laserskega skenerja zahteva tudi posebne pogoje za delo. Laserski skener deluje tako ob svetlobi kakor tudi v popolni temi, vendar so rezultati skeniranja boljši, če skeniranje izvedemo v temi, ker kamera bolje zazna lasersko črto na skeniranem objektu. Pomembno je tudi, da je laserski žarek dobro viden na predmetu ter da je jakost laserskega žarka precej visoka, v nasprotnem primeru program javi, da ne zazna laserskega žarka. Program zazna tudi, če laserskega žarka ne premikamo pod določenim kotom (približno  $30^\circ$ ) ter če laserski žarek ni viden na obeh delih kalibracijske table. Za uspešno skeniranje je nujno, da se laserski žarek odbije od predmeta in da je viden v objektivu kamere. V primeru, da se svetloba laserskega žarka ne odbije od predmeta, skeniranja ni možno izvajati, ker laserki žarek ni viden na kameri, s tem tudi ne v pogovornem oknu programskega paketa, kjer lahko med procesom skeniranja opazujemo, kje in kako smo predmet skenirali.

### **5.1.1 Računalnik**

Izbor računalnika je odvisen od želja uporabnika. Če uporaba laserskega skenerja domače izdelave poteka na enem mestu, je možna uporaba klasičnega računalnika, če pa želimo laserski skener uporabljati na več mestih, je praktična uporaba prenosnega računalnika. Edina zahteva, ki mora biti izpolnjena pri izbiri računalnika je, da ima računalnik USB priključek ali pa dodatni vmesnik med računalnikom in USB kamero.

### 5.1.2 Kamera – Fuji FinePix S7000



Slika 1: Slika uporabljenega digitalnega fotoaparata

Tržišče nudi širok izbor digitalnih kamer, vendar mora imeti digitalni fotoaparat za uporabo pri skeniranju možnost snemanja filmov pri interaktivnem krmiljenju z računalnikom.

Značilnosti:

- 6.3-mega pkslov
- 6x optični povečava
- Audio / Video izhod

Pred samo uporabo kamere je bilo potrebno namestiti še gonilnike, ki omogočajo komunikacijo med kamero in računalnikom.

### 5.1.3 Laser

Uporabljen je bil navaden laser, ki se v osnovi uporablja za gradbene namene. Edina zahteva, ki jo je potrebno upoštevati pri izbiri laserja je, da mora laser proizvajati lasersko črto in ne laserske pike, katero laserji največkrat proizvajajo. Zaželen je čimbolj tanek laserski žarek,



ker so rezultati, pridobljeni na osnovi bolj tankega žarka, boljši. Težava, ki lahko nastopi pri uporabi laserja je, da je laserski žarek pri večji oddaljenosti širši.



Slika 2: Slika uporabljenega laserja.

Uporabljeni laser proizvaja relativno širok laserski žarek, ki za skeniranje ni najbolj primeren. Da bi bil laserski žarek čim bolj tanek, je bila na laserju narejena domača dodelava (pritrjen v rolo zviti papir, ki omogoča tanek izhod laserskega žarka ter krajšo lasersko črto), s čimer je postal laserski žarek tanjši ter krajši. Med samim procesom skeniranja sem ugotovila, da so rezultati skeniranja boljši, če je laserski žarek tanjši.

#### 5.1.4 Kalibracijska tabla

Za izvedbo terestričnega laserskega skeniranja je potrebno izdelati kalibracijsko tablo, ki služi kot ozadje in kot osnova za kalibracijo kamere. Izdelava kalibracijske table oziroma ozadja je opisana v prilogi A.

Kalibracijska tabla mora biti postavljena tako, da je v celoti vidna v objektivu kamere ter da so vidne vse markice, ki so pomembne pri kalibraciji kamere. Priporočljivo je, da je v objektivu kamere vidna le kalibracijska tabla brez ozadja, ker se s tem zmanjša število šumov. V primeru, da je v objektivu kamere poleg kalibracijske table vidno tudi ozadje, se laserski

žarek odbija tudi od okolice, s tem kamera zazna večje število točk, ki v oblaku točk predstavljajo odvečne točke, t.i. šume. Šume je med procesom obdelave mogoče obdelati oziroma odstraniti, vendar lahko nastopi težava ločevanja, katere točke so točke na objektu in katere izven objekta.

### **5.1.5 Programska oprema**

Programska oprema, ki je uporabljena pri praktični izvedbi diplomske naloge je brezplačno dostopna preko spletne strani [www.david-laserscanner.com](http://www.david-laserscanner.com). Programski paket DAVID je enostaven tako za namestitev kakor tudi za uporabo. Preko spletni strani je poleg programa mogoče pridobiti tudi navodila za uporabo.

## **5.2 Praktična izvedba**

V prilogi A so opisana splošna navodila za izvedbo skeniranja, pridobljena s spletne strani, v tem poglavju pa je opisan praktično izveden proces skeniranja. Vsi predmeti, ki so bili skenirani za proučitev značilnosti 3D domačega laserskega skenerja, so bili skenirani po spodaj navedenih korakih.

Ob priključitvi kamere na računalnik, postavitvi ozadja oziroma kalibracijske table, je v programu David potrebno najprej izbrati kamero, spremeniti format in značilnosti kamere. Če se za skeniranje ves čas uporablja ena kamera, ni potrebno vsakokratno spreminjanje nastavitve kamere. Pri enkratni uporabi je potrebno nastaviti parametre kamere ter zapisati vrednost kalibracijskih točk, ki smo jo predhodno izmerili na tabli.

Med procesom skeniranja sem ugotovila, da so rezultati skeniranja boljši v primeru, ko tako kamera, kakor tudi predmet skeniranja nista na enaki višini, kot kalibracijska tabla. Ugodna je postavitve kamere in predmeta približno 5cm višje od kalibracijske table. Tako je predmet skeniranja lepše viden v objektivu kamere, lažji je tudi postopek skeniranja predmeta (predmet lahko skeniramo tudi s spodnje strani).

Naslednji korak je kalibracija kamere. Kalibracijo kamere je potrebno izvesti ob svetlobi, v nasprotnem primeru ni mogoče zagotovo trditi, da je bila le ta izvedena pravilno. Program omogoča kalibracijo kamere avtomatično, z brisanjem odvečnih markic ali pa ročno. Po pridobljenih izkušnjah med procesom skeniranja in izdelave 3D modela je to najtežji del procesa skeniranja. Težava je, da program včasih omogoči izvedbo kalibracije kamere avtomatično, včasih ne in je kalibracijo potrebno izvesti ročno. Večkrat se je zgodilo, da program v določenem trenutku ni dovolil avtomatske kalibracije, pri naslednjem koraku pa je kalibracija izvedena uspešno. V primeru, da kalibracija kamere ni izvedena uspešno, program javi vzrok, zakaj kalibracija ni izvedena. Mogoča je tudi ročna kalibracija, ki jo izvedemo na osnovi ročnega postavljanja markic. Po uspešno izvedeni kalibraciji program s klikom »Next« vodi v naslednji korak.

Da se izognemo težavam oziroma ne izvedeni kalibraciji kamere, je najboljša rešitev ročna kalibracija, kjer je potrebno markice ročno postaviti na oslonilne točke, ki se nahajajo na kalibracijski tabli ter izbrati gumb »Calibrate camera«. Ko je kalibracija kamere izvedena uspešno, program izpiše sporočilo »Calibration successful«.

Na zaslonu kamere ter na pogovornem oknu programa je potrebno skozi celoten postopek skeniranja »videti« vse markice. Kadar je kalibracija kamere izvedena uspešno, poleg kalibracijskega kota in markic, z rdečimi križi označene tudi sredine markic. Tako je skener pripravljen za skeniranje.

Po vseh predhodnih nastavitvah, lahko predmet, ki ga želimo skenirati, postavimo pred kalibracijsko tablo. Pred začetkom skeniranja je potrebno v prostoru, v katerem bo izvedeno skeniranje, zagotoviti čim manj svetlobe, najbolj primerno je, če zagotovimo popolno temo. Skeniranje je teoretično mogoče tudi ob svetlobi, vendar so rezultati boljši pri skeniranju v temi. Prižgati je potrebno laser, ki pa pred pritiskom na gumb »Start« ne sme bi viden na predmetu skeniranja. Laserski žarek enakomerno in počasi premikamo preko predmeta, na zaslonu računalnika pa opazujemo, kako se izrisuje model predmeta. Laser lahko premikamo tudi hitreje, vendar je izris lepši ter popolnejši ob počasnem premikanju laserja. Poleg tega, da je laserski žarek viden na predmetu, mora biti viden tudi na obeh delih kalibracijske table, sicer program javi, da na nekem delu laserski žarek ni viden. V tem primeru se proces

skeniranja ne izvaja, kakor se tudi ne izvaja, če laserski žarek ne preide predmeta ob primernem kotu. Tudi v tem primeru program javi napako.

Proces skeniranja izvajamo toliko časa, dokler z rezultatom izrisa, ki ga vseskozi opazujemo na zaslonu računalnika, nismo zadovoljni. Proces lahko prekinemo s klikom na gumb »Pause« ter tudi kadarkoli nadaljujemo s klikom na gumb »Start«. Ko je proces skeniranja začasno prekinjen, je mogoče izrisati 3D model predmeta, kjer lahko vidimo, katere dele smo že in katere dele še moramo skenirati. Prikaz 3D modela dobimo s klikom na gumb »Show 3D«.

Po končanem skeniranju lahko s klikom na gumb »Smooth Average«, »Smooth Median« zgladimo linije, gumb »Interpolate« pa omogoča določitev točk na območjih, kjer s skeniranjem nismo pridobili podatkov, če razdalja med točkami, med katerimi bo izvedena interpolacija, ni prevelika.

Skenogram lahko shranimo s klikom na »Save« ter ga lahko kasneje uporabimo pri združevanju modelov, ki je naslednji korak, ki ga omogoča program. Skenograme lahko uporabljamo tudi brez združevanja, kadar nas ne zanima 3D model celotnega predmeta, temveč le njegov del. S klikom na gumb »Load« se lahko uvozi predhodno pridobljene skenograme.

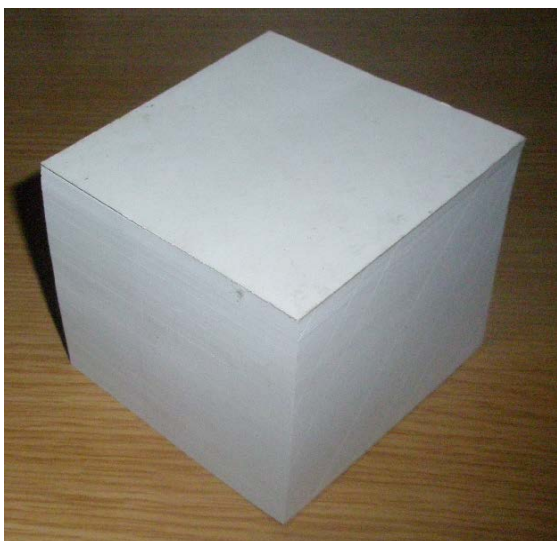
Program poleg skeniranja omogoča tudi združevanje skenogramov v celoto. Za združevanje je potrebno predmet skenirati iz različnih delov, skenograme shraniti in jih v programu združiti. Zelo primerno je, da imata dva sosednja skenograma skenirane vsaj 3 identične točke, ker je v tem primeru združevanje enostavnejše. Pri združevanju modelov v celoto program ne dovoli shranjevanje končnega modela oziroma shranitev modela je omogočena ob nakupu licenčnega programa David.

Izvedba skeniranja, analiza značilnosti predmeta skeniranja ter tudi vseh značilnosti skeniranja so opisani na petih primerih.

### 5.2.1 Predmet skeniranja: ŠKATLA

Izbira predmeta, katerega želimo skenirati, je odvisna od želja uporabnika skenerja. Skener domače izdelave, ki je bil sestavljen, je primeren za skeniranje predmeta do višine približno 25 cm in širine približno 15 cm. V primeru, da je želja skeniranja večjega predmeta, je potrebno povečati velikost ozadja oziroma kalibracijske table, pri čemer je potrebno izmeriti in si zabeležiti mero dolžine na natisnjenemu papirju, ker je podatek pomemben med postopkom kalibracije.

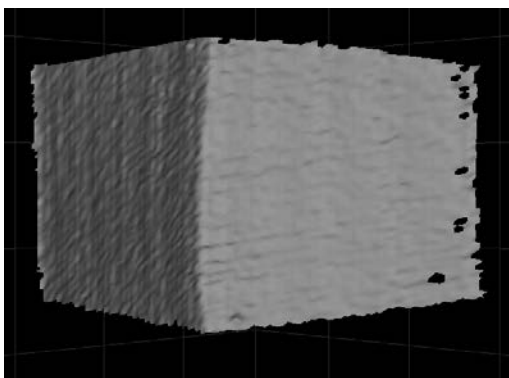
Kot prvi predmet skeniranja je bila izbrana škatlica svetle barve ter dimenzije 9.5 cm x 12.5 cm x 7.5 cm, katere 2D izgled prikazuje spodnja slika:



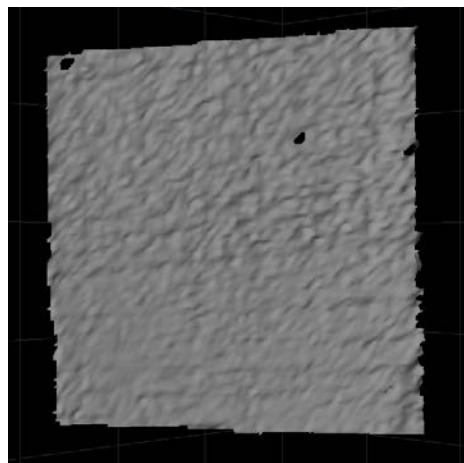
Slika 3: 2D model škatle.

Škatla ima obliko kvadra, z zelo izraziti robovi, brez razgibanih delov. Predmet je bil izbran, ker je pravilnih oblik, z izrazitimi robovi na stikih posameznih stranic ter gladkimi površinami. Predmet je svetle, bele barve, laserski žarek se na površini odbija. Ker ima predmet izrazite robove, na predmet ni bilo dodanih oslonilnih točk, ki bi omogočale lažje združevanje posameznih modelov oziroma skenogramov v celoto.

Škatla je bila skenirana iz štirih zornih kotov. Najprej sta bili skenirani dve robi stranici, nato njuni nasprotni stranici, naslednji skenogram je bil narejen na pokrovu škatle, na koncu še dno škatle. Pokrov škatlice in dno škatle sta enake velikosti, enaka sta tudi skenograma stranic. Skenogrami posameznih delov prikazujeta sliki 4 in 5:



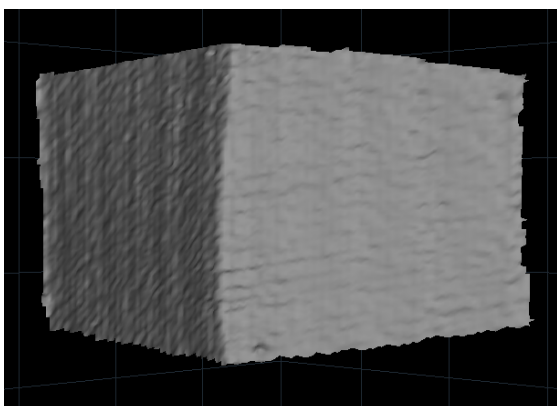
Slika 4: Skenogram dveh stranic.



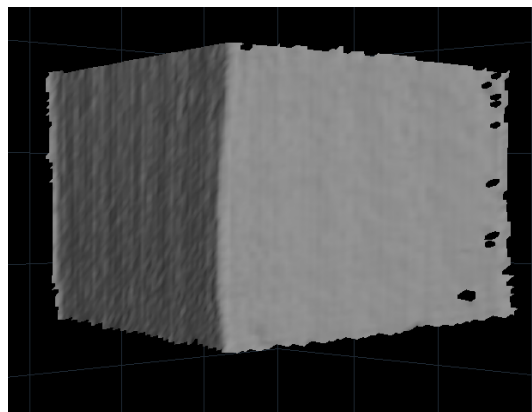
Slika 5: Skenogram pokrova.

Programski paket David poleg skeniranja omogoča združevanje posameznih skenogramov v celoto, omogoča tudi izvedbo interpolacije posameznega skenograma, povprečenje ter glajenje površine. Na primeru robov škatle so prikazani rezultati posameznih obdelav točk.

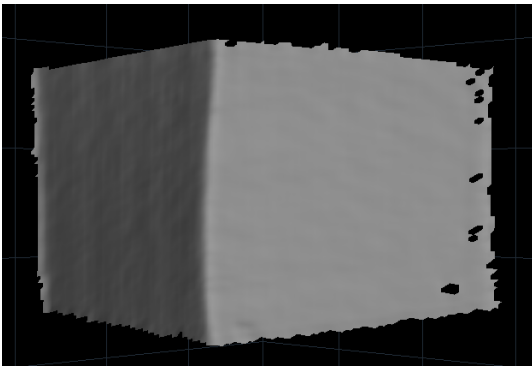
Slike 6, 7, 8, 9 in 10 prikazujejo rezultate interpolacije, interpolacije in glajenje ter interpolacije ter povprečenje.



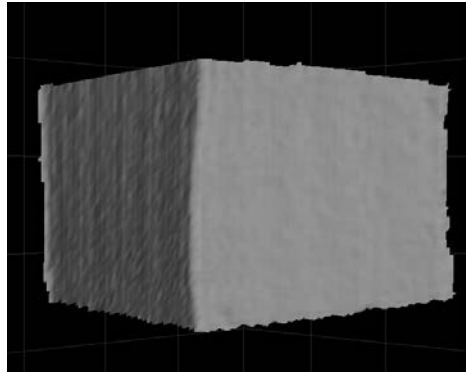
Slika 6: Rezultat interpolacije.



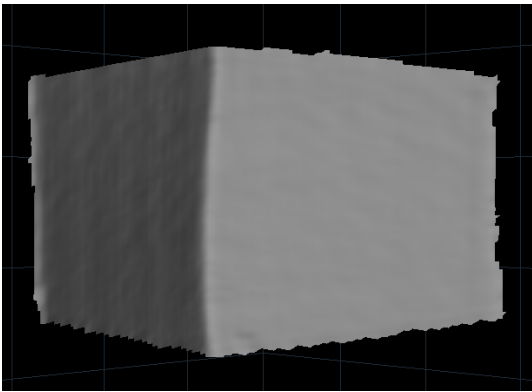
Slika 7: Rezultat glajenja linij.



Slika 8: Rezultat povprečenja.

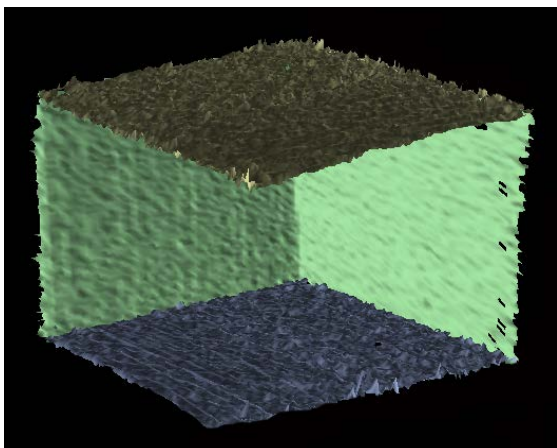


Slika 9: Rezultat interpolacije ter glajenja linij.



Slika 10: Rezultat interpolacije ter povprečenja.

Kot rezultat skeniranja sem pridobila tudi model škatle, ki sem ga naredila na osnovi združevanja posameznih skenogramov v celoto na osnovi identičnih točk predmeta. Združeni so bili skenogrami, na katerih ni bila narejena niti interpolacija niti glajenja linij oziroma povprečenje. Skenogrami so bili združeni s pomočjo programskega paketa David. Zaradi lažje predstavitve ni dodan en skenogram škatle. Slika 11 je rezultat skeniranja.



Slika 11: Rezultat 3D laserskega skeniranja

Združitev bi bilo mogoče izvesti tudi v programu AutoCad, pri čemer je potrebno za uvoz skenogramov uvoziti dodatek AutoCad –u, ki omogoča uvoz formata \*.obj. Uvoz je možen le za posamezne skenograme, ki jih je potrebno prehodno shraniti v programu David. Dodatek je mogoče brezplačno pridobiti preko spletne strani.

### 5.2.2 Predmet skeniranja: SKULPTURA

Kot drugi predmet skeniranja je bila izbrana 9 cm visoka ter 18 cm dolga skulptura svetle barve. 2D izgled skulpture prikazuje slika 12:



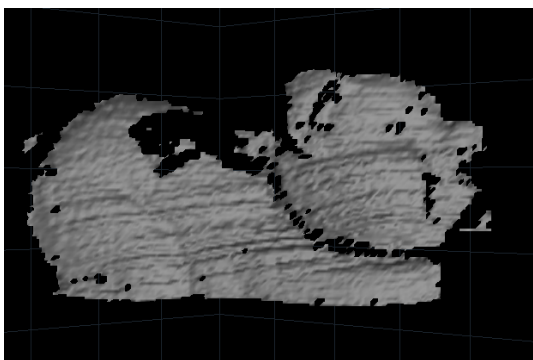
Slika 12: 2D model skulpture.



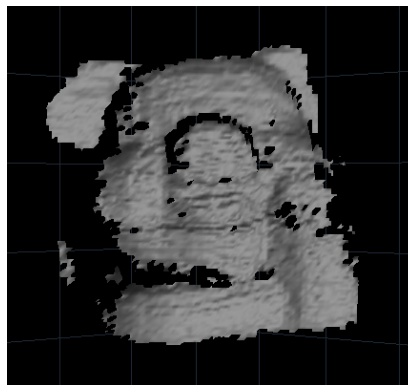
Predmet, ki je bil izbran za skeniranje, je svetle, na nekaterih delih temnejše barve. Površina je gladka, laserska svetloba se na površini predmeta odbija. Površina predmeta je razgibana, na nekaterih delih z večjimi, na nekaterih z manjšimi vboklinami in izboklinami. Za lažje združevanje skenogramov je mogoče na skulpturo pritrčiti oslonilne točke, ki omogočajo, da lahko skenograme, ki so skenirani iz različnih zornih kotov, združimo v celoto in dobimo 3D model celotnega predmeta. Oslonilne točke morajo biti za združevanje vidne na vseh skenogramih. Praktično je mogoče izvesti združevanje tudi na osnovi identičnih točk, ki se nahajajo na površini predmeta, vendar se točke večkrat ne vidijo dobro, s tem pa je oteženo njihovo določevanje. Skenograme sem združevala na osnovi tako identičnih točk kakor tudi na osnovi oslonilne točke.

Rezultat, pridobljen na osnovi združevanja s pomočjo oslonilnih točk je prikazan v prilogi A. Skulptura je bila skenirana iz dveh zornih kotov, s čimer sem pridobili 2 skenograma. Posamezen skenogram je bilo potrebno shraniti. Program shranjuje skenograme v datoteko s končnico \*.obj, ki je nestandardni format za zapis slike.

Sliki 13 in 14 prikazujeta oba skenograma:

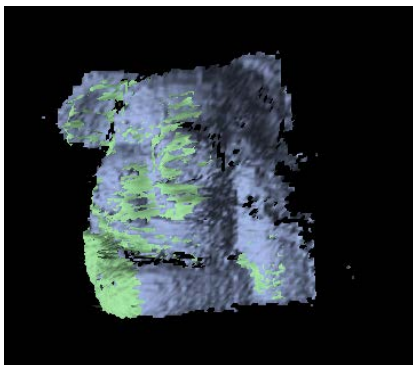


Slika 13: 1. del skulpture



Slika 14: 2. del skulpture.

Slika 15 prikazuje združen model obeh zgoraj navedenih skenogramov (sliki 13 in 14):



Slika 15: Združena skenograma v enoten model.

Združitev skenogramov je bila izvedena v programu David na osnovi treh identičnih točk. Teoretično bi bilo mogoče skenograma združiti v programu AutoCad, ker program David ne dovoljuje shranjevanja združenih skenogramov v model oziroma je za to potrebna pridobitev licence.

Oba skenograma (sliki 13 in 14) sta »surova«, brez izvedene interpolacije in glajenja linij. Iz zgornjih skenogramov (slike 13,14 in 15) je razvidno, da so bili nekateri predeli zelo dobro skenirani, drugi slabše. Razlog je v laserju, ki je bil na predelih, kjer je skenogram dobro izrisan, dobro viden tako na predmetu kakor tudi na zaslonu računalnika. Predeli, kjer se laserski žarek ni dobro odbijal oziroma ni bil dobro viden, so brez točk oziroma na izrisu prikazujejo črne luknje. Črne luknje so bile vidne že med samim procesom skeniranja, vendar jih kljub želji in poskušanju njihovega izboljšanja ni bilo mogoče zapolniti. Razlog je, da mora biti laserski žarek na predmetu viden pod določenim kotom, v nasprotnem primeru program zazna in javi napako spremembe položaja laserja oziroma vpadni kot žarka.

Skenogrami prikazujejo tudi vse odvečne točke, ki so bile skenirane t.i. šume. Do njih pride zaradi nekontroliranega odboja laserske svetlobe, ki ga kamera zazna, program pa interpretira. Združeni model prikazuje 3D model skulpture, ki je bila skenirana. Iz njega so vidne značilnosti skulpture, predvsem obrazne značilnosti. S posameznimi izboljšavami, predvsem z uporabo laserja, ki proizvaja še tanjšo laserski žarek, bodo rezultati skeniranja boljši.

V prilogi B so prikazane slike skenogramov, na katerih so bile narejene interpolacija, glajenje ter povprečenje. Prikazani so tudi rezultati ob spremembi ločljivosti, gladkosti ter odstranjevanju šumov ob združevanju skenogramov.

### 5.2.3 Predmet skeniranja: OKRASNI KOŠ

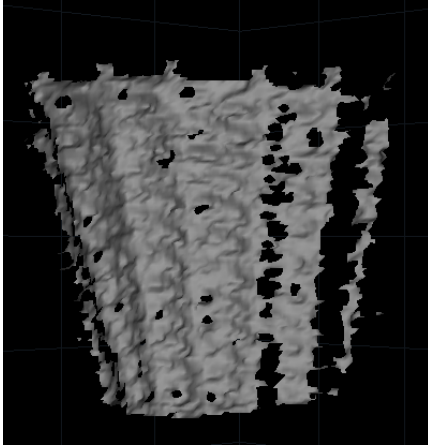
Tretji predmet, na katerem sem izvedla skeniranje, je 9 cm visok ter v najširšem delu 10 cm širok okrasni pleteni koš. Njegova površina ni gladka, zgrajena je iz vboklin in izboklin, ob pogledu nanj pod kotom je mogoče videti, da se gradniki med seboj ne prilegajo popolnoma oziroma je med njimi prazen prostor. Če predmet gledamo vzporedno z očmi, praznega prostora ne bomo zaznali. 2D izgled predmeta prikazuje slika 16:



Slika 16: Izgled okrasnega koša.

Predmet je svetlejše rjave barve, laserska svetloba se na njegovi površini odbija. Ker je postopek skeniranja podoben kakor v prejšnjih primerih, sem predmet skenirala le iz enega zornega kota z namenom, da prikažem, da za skeniranje s pomočjo 3D laserskega skenerja domače izdelave ni nujno potrebno, da je površina predmeta popolnoma gladka.

Skenogram predmeta prikazuje slika 17:



Slika 17: Skenogram koša

Skenogram lepo prikazuje zgradbo predmeta. Vidni so tako vzdolžno kakor tudi prečno pleteni gradniki, žal so nekatera območja brez točk, kar je lahko posledica, da se žarek na nekaterih delih predmeta ni dobro odbil ali pa žarek na teh mestih ni bil dobro viden v objektivu kamere.

V prilogi C so prikazani skenogrami, na katerih so bile izvedene interpolacija, glajenje ter povprečenje, ki omogočajo izboljššan videz skeniranega predmeta. Na njih je mogoče še izraziteje določiti zgradbo predmeta.

## 5.2.4 Predmet skeniranja: VAZA

Skeniranje sem izvedla tudi na 12 cm visoki ter na najširših delih 7cm široki črni vazi, katere 2D model prikazuje slika 18:

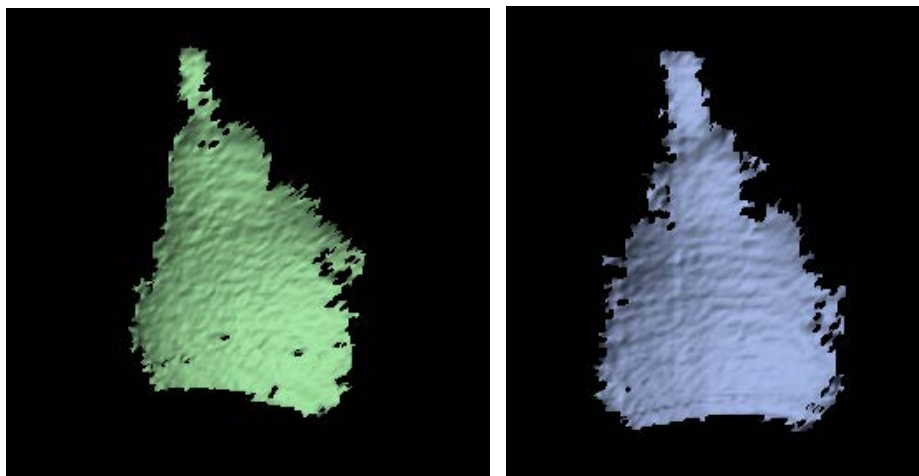


Slika 18: 2D izgled vaze.

Vaza je izrazito črne barve, premazana s zaščitnim lakom, ki je za vsakdanjo uporabo vaze primerna, ker vazi doda sijaj. Ker je premazana, je svetleča in zato neuporabna za 3D lasersko skeniranje s pomočjo domačega laserskega skenerja, ker se laserska svetloba na površini objekta ne odbije, pri čemer kamera ne zazna položaja laserja, program pa ne izriše modela oziroma je skenogram tako slabo narejen, da ne omogoča predstavitve predmeta. Predmet je bil izbran zato, da sem videla, kakšen je rezultat skeniranja na svetlikajoči površini.

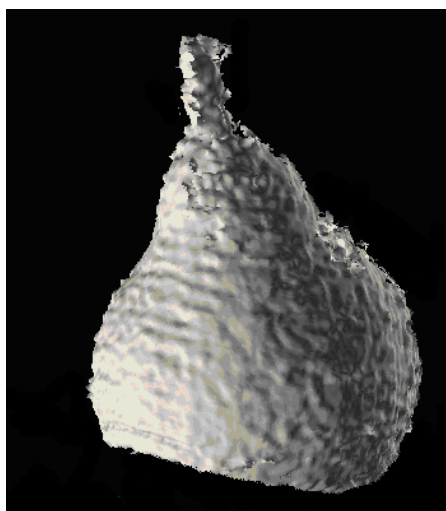
### 5.2.5 Predmet skeniranja: SADJE

Med predmeti, ki so se mi zdeli primerni za skeniranje sem izbrala tudi sadje, med katerimi sem si izbrala hruško ter zelenje ananasa. Oba sadeža sem skenirala iz dveh zornih kotov:



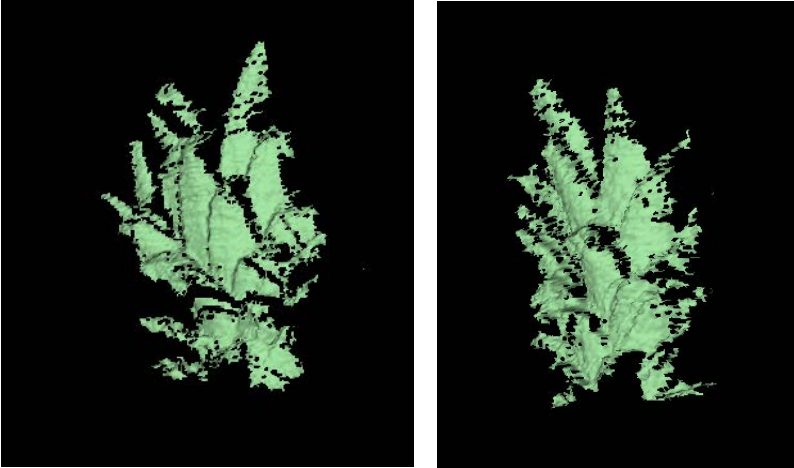
Slika 19: Skenograma hruške.

Pridobljene skenograme sem združila v model in pridobila rezultat, ki ga prikazuje Slika 20:



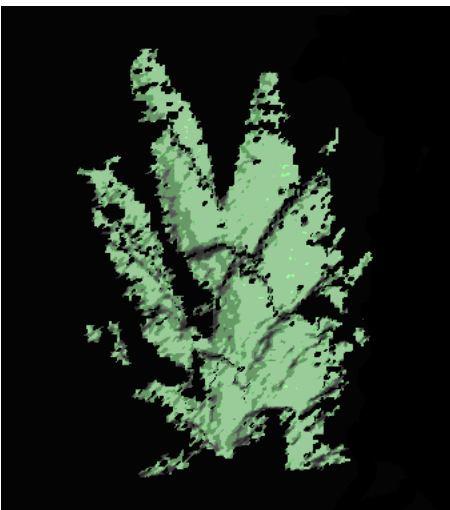
Slika 20: Model hruške, pridobljen s pomočjo združevanja dveh skenogramov.

Sliki dveh skenogram zelenja ananasa:



Slika 21: Model ananasa.

Model združitve prikazuje slika 22:



Slika 22: Model ananasovega zelenja, pridobljen s pomočjo združevanja dveh skenogramov.

## **6 ANALIZA ZNAČILNOSTI 3D LASERSKEGA SKENIRANJA S POMOČJO LASERSKEGA SKENERJA DOMAČE IZDELAVE**

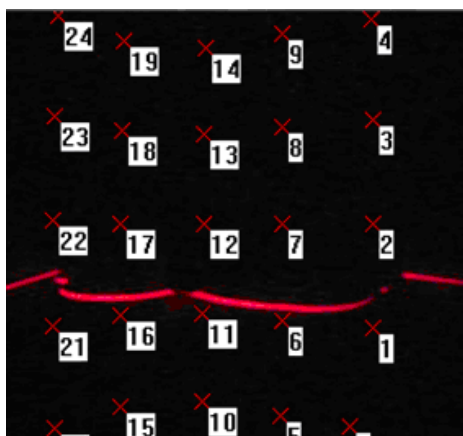
Predmete za 3D lasersko skeniranje sem izbirala na osnovi njihovih značilnostih, predvsem glede njihove oblike, velikosti, barve in materiala, iz katerega so zgrajeni. Ti dejavniki namreč najbolj vplivajo na rezultat skeniranja. Med samim procesom skeniranja sem ugotovila tudi posamezne značilnosti komponent, ki sestavljajo 3D laserski skener domače izdelave ter njihovo delovanje pri skeniranju.

### **6.1 Laserski žarek**

Uporabljeni laser mora proizvajati čimbolj tanek laserski žarek, ker so rezultati, pridobljeni s pomočjo tanjšega laserskega žarka boljši oziroma je skeniranje natančnejše in točnejše. Tanek laserski žarek namreč zazna vse vbokline ter izbokline skeniranega predmeta, medtem ko jih širši laserski žarek zazna le malo, večkrat se tudi zgodi, da laserski žarek preide površino, ki je skenirana, ne da bi zaznal spremembe na površini skeniranega predmeta. S tem so rezultati skeniranja manj točni, skenogrami tudi ne prikazujejo dejanskega 3D modela predmeta.

Laserski žarek uporabljenega laserja proizvaja širine 2 mm, z domačo izdelavo je širina laserskega žarka manjša od 1 mm, približno 0.5 mm. Dolžina laserskega žarka je različna, odvisna od položaja laserja. Če je laser bližje kalibracijski tabli, je laserski žarek krajši, kadar je laserski žarek na večji oddaljenosti od kalibracijske table, je laserski žarek daljši. Majhno razliko je glede na različen položaj laserja mogoče opaziti tudi v širini laserskega žarka.

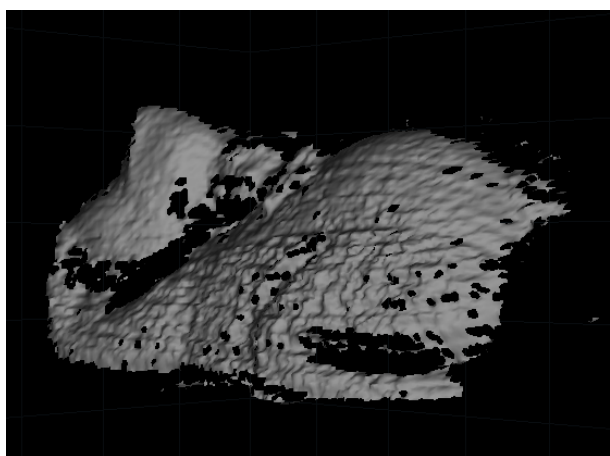




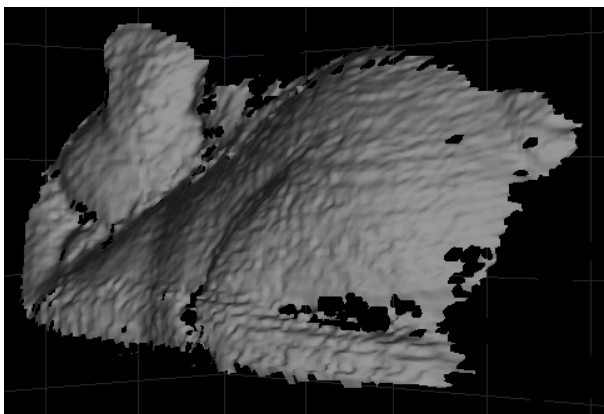
Slika 23: Pogovorno okno programskega paketa David, ki prikazuje prehod laserskega žarka skozi skulpturo.

Na sliki 23 je lepo viden laserski žarek, ki je temelj skeniranja s pomočjo 3D laserskega skenerja domače izdelave. Poleg laserja so na sliki vidne tudi markice ter vrstni red postavljanja markic, ki so potrebne za uspešno izvedbo kalibracije kamere.

Spodnji sliki 24 in 25 prikazujeta skenograme skeniranih predmetov. Slika 24 prikazuje skenogram predmeta, kjer je bilo skeniranje izvedeno z širšim laserskim žarkom, slika 25 pa prikazuje skenogram istega predmeta ob skeniranju s tanjšim laserskim žarkom. V obeh primerih je bil uporabljen isti laser, le da je bila na laserju narejena dodelava za tanjši laserski žarek.



Slika 24: Rezultat skeniranja ob uporabi širšega laserskega žarka.



Slika 25: Rezultat skeniranja ob uporabi tanjšega laserskega žarka.

Sliki 24 in 25 nazorno prikazujeta razliko rezultatov ob uporabi različno širšega laserskega žarka. Laser je bil v obeh primerih postavljen na istem mestu, laserski žarek je skozi predmet prehajal počasi, ob enakem ter dovoljenem kotu (program ni javil napake, da se laserski žarek na skenirani površini ne odbije pod premajhnim kotom). Pri skeniranju predmeta z širšim laserskim žarkom je na skenogramu mogoče videti večje število šumov, več je tudi delov predmeta, kje se laser ni dobro odbil od površine, rezultat tega je večje število lukenj. Površina drugega skenograma je tudi bolj gladka, vbokline in izbokline predmeta so bolj izrazite. Ob uporabi še tanjšega laserskega žarka bi bili rezultati še boljši.

Poleg uporabe čim tanjšega laserskega žarka je pomembno tudi to, da med procesom skeniranja laserski žarek zelo počasi prehaja skozi predmet ter da površin, ki so že bile skenirane, ni potrebno ponovno skenirati. Če laserski žarek ne prehaja površine počasi, lahko v pogovornem oknu programa, ki se prikaže ob začetku skeniranja vidimo, kje se laserski žarek ni dobro odbil od površine oziroma je bila jakost laserskega žarka nizka ali pa položaj laserja kamera ni zaznala. Rezultat je skenogram, ki vsebuje luknje. Da se izognemo zgoraj navedenemu problemu je potrebno proces skeniranja vseskozi opazovati v pogovornem oknu programa.

Luknje na skenogramu lahko nastanejo tudi v primeru ponovnega skeniranja že skenirane površine. V tem primeru na mestih dvakratnega skeniranja nastanejo luknje, ki so še izrazitejše kakor v primeru, da skeniranje predmeta ni izvedeno počasi ter s tankim laserskim žarkom.

## 6.2 Kalibracijska tabla

Kalibracijska tabla je narejena iz dveh med seboj pravokotnih ravnih plošč. Je osnova za izvedbo kalibracije kamere ter je uporabljena kot ozadje med procesom skeniranja. Na tabli so natisnjene »orientacijske markice« z znanimi medsebojnimi razdaljami, kar služi za absolutno orientacijo predmeta v prostoru. Če plošči med seboj nista pravokotni, se razmerja med markicami spremenijo in program napačno izvede kalibracije kamere. Med procesom skeniranja se mora od table laserski žarek odbijati.

## 6.3 Kalibracija kamera

Pod pojmom »kalibracija« razumemo »umeritev« sistema oziroma določitev njegovih lastnosti. V fotogrametriji s kalibracijo določamo goriščno razdaljo, distorzijo in format senzorja. Vse te lastnosti upoštevamo pri nadaljnjem delu, od notranje orientacije in triangulacije naprej.

V mojem primeru sem s kalibracijo določila razmerje med kamero, kalibracijsko tablo in predmetom. S pridobitvijo teh podatkov s skeniranjem dobim predmet, ki je v svoji naravni (pravi) velikosti, tudi njegove fizične lastnosti so v pravem razmerju. Kalibracija je v mojem primeru najbolj odvisna o pravokotnosti plošč kalibracijske table in natančnega pozicioniranja »oslonilnih« markic v primeru ročne kalibracije. Po izkušnjah pri delu s tem sistemom je natančnost avtomatskega pozicioniranja markic zelo velika.

## 6.4 Programski paket David

Programski paket David je idealen za vse uporabnike, ki želijo izdelavo 3D modela predmetov majhne velikosti, rezultate 3D laserskega skeniranja pa želijo uporabiti za ne preveč zahtevne naloge.

Programski paket se na medmrežju lahko dobi brezplačno, vendar je njegova slabost ta, da zahteva uporabo kamere z relativno visoko ločljivostjo (vsaj 5.0 mega pikslov). Uporaba kamere višje ločljivosti nudi veliko boljše rezultate skeniranja kakor so rezultati skeniranja z uporabo spletne kamere ločljivosti 1.3 mega pikslov. Pri uporabi spletne kamere pridobimo skenograme, ki podajajo neko splošno obliko skeniranega predmeta, vendar ne podajajo njegovih posameznih značilnosti kot so npr. vbokline in izbokline oziroma je njihova predstavitev slabša. Rezultati so tudi slabši na predmetih, ki niso enobarvni.

Programski paket zahteva, da se na pomnilnik računalnika pred samim procesom skeniranja namesti gonilnike kamere, ki omogočajo komunikacijo med kamero in računalnikom. Namestitev programa je preprosta, enostavna je tudi njegova uporaba. Ko programski paket uporabljamo prvič, je najprej potrebno izbrati kamero, ki jo bomo uporabili, določiti je potrebno značilnosti kamere, format senzorja, numerično vrednost točk na kalibracijski tabli ter izvesti kalibracijo. Najbolj priporočljiva je izvedba avtomatske kalibracije, ki pa ni vedno uspešno izvedena. Večkrat je težava, da program ne zazna zadostnega števila markic. Program omogoča tudi ročno dodajanje ali odstranjevanje markic ter ročno izvedbo kalibracije. Pri ročni kalibraciji je potrebno ob prvi izvedbi postaviti markice na točke, ki se nahajajo na kalibracijski tabli, pri vsaki naslednji uporabi pa je potrebno le spremeniti njihov položaj. Vseskozi program omogoča klik na gumb, ki nam služi kot pomoč pri uporabi programa.

Za prehod v drugo pogovorno okno mora biti med računalnikom in prižgano kamera vzpostavljena povezava. V primeru, da kamera ni povezana ali prižgana, program ne dovoljuje prehoda v drugo pogovorno okno oziroma ne omogoča njegovega delovanja. To je lahko v primeru, da želimo v program le uvoziti in nato obdelovati ali pa le analizirati že pridobljene skenograme (format \*.obj) moteče. Večkrat se namreč lahko zgodi, da želimo v program uvoziti in združevati ali le analizirati skenograme, računalnik pa nima povezave s kamero ali kamera nima dovolj energije za vklop.

Drugo pogovorno okno omogoča tudi izvedbo skeniranja ter interpolacijo, povprečenje ter glajenje pridobljenih skenogramov. Omogoča izbor barve laserja, s čimer skeniranje ni vezano le na rdeč laserski žarek, temveč je mogoče skenirati tudi z laserskim žarkom zelene barve. Proces skeniranja lahko kadarkoli prekinemo, shranimo ali pa rezultat skeniranja

izbrišemo. S tem lahko večkrat skeniramo iste predmete, ne da bi nam bilo potrebno vsak skenogram shraniti. Program posamezne skenograme shranjuje v format \*.obj, ki ga lahko v programski paket David uvažamo kadarkoli, težave lahko nastopijo, če želimo skenograme uvoziti v kateri drugi program. Geodetom najbližji program, v katerega je mogoče uvoziti format \*.obj je program AutoCad, vendar je za uvoz potreben dodatek k AutoCad-u, ki ga je mogoče pridobiti na spletu. V programu AutoCad je nato mogoče združevanje skenogramov, odstranjevanje šumov ter druge dodelave.

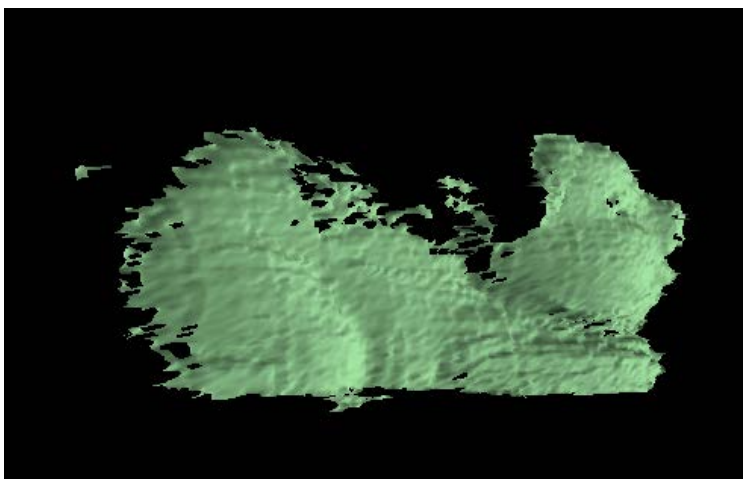
Tretje pogovorno okno omogoča združevanje posameznih skenogramov v celoto oziroma v model. Najprej je potrebno dodati skenograme, ki jih želimo združiti, v primeru, da smo dodali nepravilni skenogram, ga je mogoče odstraniti. Med procesom dodajanja skenogramov lahko tudi nekoliko zmanjšamo število šumov, ki so nastali med procesom skeniranja, s tem pa v model uvozimo boljši skenogram. Pri uvozi skenogramov se le-ti prekrivajo, vendar jih je mogoče ločiti s klikom na gumb »Arrange«. Za združevanje skenogramov je mogoče izbrati med šestimi registracijami, med samim skeniranjem sem ugotovila, da je najbolj primeren izbor Ročne registracije, kjer je potrebno na skenogramih, ki jih želimo družiti, poiskati tri identične točke. Če smo izbrali pravilne točke, bo združitev dobro narejena, v primeru, da so točke različne, bo rezultat združevanja nepravilen. Postopek lahko ponavljamo dokler z rezultatom nismo zadovoljni. Uporabna je tudi fina registracija, ki jo lahko izvedemo, ko smo že naredili ročno registracijo z željo majhnih korekcij. Po združitvi lahko modelu spreminjamo ločljivost, gladkost ter odstranjujemo šume. Pri spremembi vrednosti ločljivosti, je v primeru višje vrednosti ločljivosti na modelu opaziti manjše število točk. Če povečamo vrednost gladkosti, bo na modelu mogoče opaziti bolj gladko površino, če pa bomo vrednost zmanjšali, bo na površini modela večje število območij brez točk. Kadar želimo, da je vrednost števila šumov manjša, je potrebno povečati število, v nasprotnem primeru bo model vseboval večje število šumov. Vsi ukazi se bodo izvršili šele s klikom na gumb »Fuse«. V primeru, da z rezultati nismo zadovoljni, lahko pridobimo osnovno stanje s klikom na gumb »Reset«.

Program omogoča tudi shranjevanje združenih skenogramov v model, vendar je za shranitev potrebna pridobitev licence.

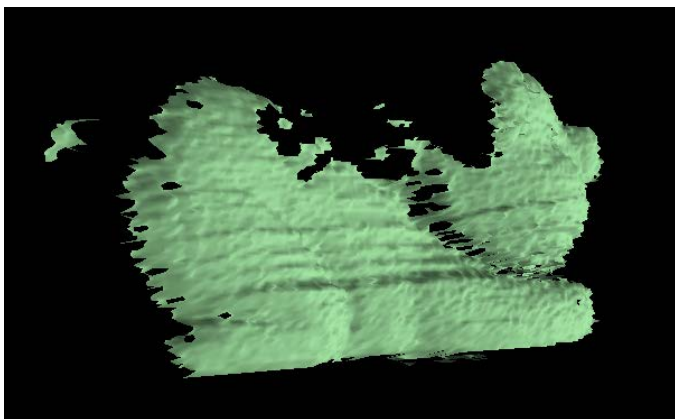
V prilogi B so prikazane slike, ki prikazujejo rezultate ob različnih vrednosti ločljivosti, gladkosti ter vrednosti za dodajanje oziroma odstranjevanje šumov.

## 6.5 Svetlobni pogoji v prostoru skeniranja

Za skeniranje s pomočjo 3D laserskega skenerja domače izdelave je priporočljivo, da se svetlobni pogoji v prostoru, v katerem izvajamo skeniranje, med procesom skeniranja ne spreminjajo. Rezultati skeniranja so najboljši, če je v prostoru, kjer skeniramo, tema. Skeniranje je mogoče tudi v svetlem prostoru, vendar so rezultati skeniranja slabši, ker kamera slabše zazna položaja laserskega žarka. Kakor je za skeniranje priporočljivo, da se ga izvaja v temi, je za kalibracijo kamere priporočljivo, da se jo izvede ob svetlobi. Program lahko javi, da je kalibracija kamere, izvedena v temnem prostoru, narejena uspešno, vendar ni nujno, da so parametri kalibracije kamere res pravilno določeni. Ker rezultati kalibracije niso nikjer vidni uporabniku programa, mora le-ta verjeti programu, zato je najbolj priporočljivo, da se kalibracija kamere izvaja pri svetlobi.



Slika 26: Rezultat skeniranja v svetlem prostoru.



Slika 27: Rezultat skeniranja v temnem prostoru.

## 6.6 Velikost predmeta

Skeniranje je pri velikosti kalibracijskega ozadja dimenzije formata A3, mogoče izvajati na predmetih, ki so manjši kakor 25 cm. Rezultati skeniranja so zadovoljivi tako pri skeniranju večjih, kakor pri skeniranju manjših predmetov. Pri velikosti kalibracijskega ozadja velikosti formata A3 je bolj priporočljivo skeniranje manjših predmetov, ker se lahko zgodi, da laserski žarek ni viden na obeh delih kalibracijskega table, kar je nujno za proces skeniranja. Poleg višine in širine predmeta je pomembna tudi debelina, ker se mora predmet nahajati znotraj prostora, če med seboj povežemo desno in levo stranico kalibracijskega table. V primeru, da želimo skenirati predmete, ki so višji, širši in debelejši, je potrebno povečati velikost ozadja.

## 6.7 Barva predmeta

Barva ni najpomembnejši dejavnik izbora predmeta, ki ga želimo skenirati. Laserski skener omogoča skeniranje tako svetlejših (tudi belih), kakor temnih predmetov. Bolj pomembno pri izboru je, da predmet, ki je namenjen skeniranju, ni svetleč. Laserski žarek se na svetleči površini namreč ne odbija (žarek prehaja skozi predmet), rezultat skeniranja je skenogram, ki ne nudi modela predmeta. Predmeta prozorne barve nisem izbrala, ker se laserska svetloba na prozornih predmetih ne odbija, temveč prehaja skozi predmet.

## 6.8 Oblika predmeta

Ob uporabi tankega laserskega žarka je vseeno, kakšne oblike je predmet skeniranja. Ob počasnem prehodu laserskega žarka kamera dobro zazna položaj žarka, s čimer je rezultat skeniranja skenogram, ki lepo prikazuje površino predmeta. Na predmetu so vidne tako vbokline kakor tudi izbokline. Najbolj izrazite značilnosti predmeta je možno opazovati znotraj programa, kjer je pri prikazu 3D modela ter s klikanjem na miško, ki omogoča rotiranje in spreminjanje oddaljenosti, mogoče opazovati značilnosti.

Pri uporabi širšega laserskega žarka nam še tako počasen prehod žarka ne bo podal vseh značilnosti. Nekatere značilnosti, ki so izrazite, bodo vidne, vendar bodo manj izraziti ostale skrite, s čimer bo rezultat skeniranja slabši.

## 6.9 Skenogrami

Skenogrami, ki so rezultat skeniranja, prikazujejo lastnosti skeniranega predmeta. Nekateri skenogrami bolj, drugi manj izrazito poudarjajo lastnosti. Med procesom skeniranja je mogoče skenograme opazovati, jih rotirati. Pridobljene skenograme lahko shranjujemo ter jih kasneje ponovno uvažati v program. Na njih lahko izvajamo operacije interpolacije, glajenja ter povprečenja. Ker so skenogrami formata \*.obj, jih ni mogoče direktno uvažati v druge programe oziroma je potrebno za njihov uvoz pridobiti dodatke raznim programov. Tako lahko npr. z dodatkom uvozimo skenogram v AutoCad, kjer lahko skenograme še dodatno obdelamo. Primeri uvoza datoteke \*.obj so podani v prilogi D.

## 6.10 Metrične in semantične lastnosti skenogramov

Metrične lastnosti dobljenih skenogramov so odvisne od načina in natančnosti kalibracije. Če le to pazljivo opravimo (tako v smislu izdelave kalibracijske plošče, razmerja med oslonilnimi markicami, kot tudi pri njihovi registraciji), potem bo skenogram v pravi velikosti oziroma v pravem razmerju z naravno velikostjo. V nasprotnem primeru lahko pride do popačenj tako



celotnega modela, kakor tudi njegovega dela. Problem metričnosti objekta pri našem načinu dela je tudi gostota točk in s tem gostota trikotniške mreže, ki lahko precej odstopa pri predmetih ovalnih oblik zaradi svojih »ravninskih« lastnosti. Tovrstne težave lahko kasneje rešujemo z uporabo parametričnih krivulj.

O semantičnih podatkih bi pri tem načinu skeniranja težko govorili, ker v bistvu zajemamo le oblak točk. Semantika bi bila pomembna v primerih, ko imamo predmet različnih barv in odbojnosti, kajti tam pride do različnih odbojev laserskega žarka in s tem do različne gostote zajetih točk ali pa da bi pri skeniranju naredili še fotografije, ki bi jih uporabili pri naknadni obdelavi oblakov točk.

Za določitev metričnih lastnosti dobljenih skenogramov sem izbrala škatlo, ker je pravilnih oblik, s tem je določitev metričnih lastnosti lažja v primerjavi z ostalimi skeniranimi predmeti. Škatla je v naravni velikosti dimenzije 9.5 cm x 12.5 cm x 7.5 cm, dimenzije njenega skenograma po uvozu v program AutoCad so iste, iz česar je razvidno, da je razmerje med vhodnimi ter izhodnimi podatki 1: 1.

Ker sem želela preveriti, ali je dobljeno razmerje med škatlo v naravni velikosti in njenim skenogramom pravilno, sem metrične lastnosti določila tudi na primeru skulpture ter ugotovila, da je razmerje pravilno. Za določitev dimenzij sem izbrala čimbolj identične točke na skulpturi v naravni velikosti ter na njenem skenogramu (najbolj primeren del skulpture za določitev dimenzij je najnižji del, ki je raven). Določitev identičnih točk na ostalih delih skulpturi, ki ima razgibano površino ter na njenem skenogramu je težavna, zato razmerje ni točno in vedno 1:1, kljub temu pa lahko rečem, da je to razmerje približno 1:1. Podrobnejša analiza metrične natančnosti izdelkov bi zahtevala več kontrolnih meritev in podrobnejšo obravnavo, kar pa presega okvir moje naloge, ostaja pa kot izziv za nadaljevanje raziskav."

## **6.11 Povzetek značilnosti s pomočjo 3D laserskega skenerja domače izdelave**

Ob izdelavi skenerja in procesu skeniranja s pomočjo domačega 3D laserskega skenerja sem ugotovila tako prednosti kakor slabosti, ki ju nudita. Prednosti 3D laserskega skenerja domače izdelave so:

- relativno ugodna cena izdelave,
- preprosta uporaba,
- rezultati skeniranja so za splošno uporabo zadovoljivi,
- velikost in barva predmeta ne omejujeta uporabe skenerja,
- znotraj programa je mogoče skenogramne na osnovi identičnih točk združevati, s čimer za njihovo združitve ne potrebujemo dodatnega programa,
- program omogoča interpolacijo, glajenje ter povprečenje pridobljenega skenograma, omogoča tudi odstranjevanje šumov na modelu.

Slabosti 3D laserskega skenerja domače izdelave so:

- zahtevana uporaba tankega laserskega žarka, ki na tržišču ni lahko dostopen,
- za delovanje programskega paketa je potrebno, da je kamera prižgana ter priključena na računalnik, tudi takrat, ko želimo program uporabljati le za analizo pridobljenih skenogramov,
- boljši rezultati so odvisni od boljše kakovosti komponent, ki sestavljajo skener,
- v primeru, ko želimo predmet, ki smo ga že skenirali, ponovno skenirati kot dopolnitev, se lahko zgodi, da laserski žarek ob prehodu skozi že skenirane površine, na skenogramu naredi luknje.

Preglednica 2 prikazuje vse ugotovljene značilnosti skeniranja ob uporabi 3D laserskega skenerja domače izdelave, pri čemer je velikost izdelane kalibracijske table dimenzije formata A3. Značilnosti so določene na osnovi skeniranja.

Preglednica 2: Značilnosti skeniranja ob uporabi 3D laserskega skenerja domače izdelave.

LASTNOST	MOŽNOSTI SKENIRANJA ( DA / NE )
Cenovno ugoden način skeniranja	DA
Preprosta uporaba	DA
Možnost nad graditve sistema	DA
Ali so metrične lastnosti skeniranja zadovoljive	DA
Skenirana površina predmeta je črne barve	DA
Skenirana površina predmeta je bele barve	DA
Skenirana površina predmeta je prozorna	NE
Skenirana površina predmeta je svetleče barve	NE
Predmet skeniranja je manjši kakor 25 cm	DA
Predmet skeniranja je večji kakor 25 cm	NE
Predmet skeniranja je ožji kakor 15 cm	DA
Predmet skeniranja je širši kakor 15 cm	NE
Za skeniranje je uporabljen laser, ki proizvede lasersko črto	DA
Za skeniranje je uporabljen laser, ki proizvede lasersko piko	NE
Za skeniranje je uporabljena kamera, ki omogoča snemanja filmov pri interaktivnem krmiljenju z računalnikom	DA
Za skeniranje je uporabljena kamera, ki ne omogoča snemanja filmov pri interaktivnem krmiljenju z računalnikom	NE
Združevanje skenogramov znotraj programskega paketa	DA
Rezultat skeniranja je odvisen od kvalitete uporabljenih komponent	DA
Relativno velika poraba energije	DA
Možnost izboljšanja pridobljenih skenogramov znotraj programskega paketa	DA
Možen uvoz skenograma v drug programski paket	DA
Možnost uporabe rezultatov ter njihova predstavitev	DA

## 7 ZAKLJUČEK

Pred začetkom izdelave diplomske naloge sem veliko razmišljala o naslovu, predvsem pa o tematiki, s katero bi se ukvarjala za uspešen zaključek študija. Ker sem imela željo izdelati diplomsko nalogo s praktičnim delom, je bil izbor še toliko težji.

Metoda terestričnega 3D laserskega skenerja se je v zadnjih letih uveljavila kot ena izmed bodočih temeljnih metod za pridobivanje podatkov o prostoru, predvsem kompleksnejših in večjih območij. Čeprav je nakup instrumenta za izvajanje meritev še vedno visok strošek, le-ta ni »previsok« za podjetja, katerih cilj je pridobivanje podatkov s pomočjo tehnologije, ki je »v koraku s časom«.

Cenovno zelo ugoden način pridobivanja podatkov omogoča v diplomski nalogi sestavljen ter predstavljen 3D laserski skener. Za njegovo sestavo je primerna uporaba komponent, ki so dostopne na tržišču bo ugodni ceni, vendar je priporočljivejša uporaba nekoliko dražjih komponent, ker so v večini primerov tudi rezultati skeniranja boljši. Predvsem je to pomembno pri izboru kamere, saj so rezultati boljši pri skeniranju s kamero višje ločljivosti.

Rezultati skeniranja s pomočjo 3D laserskega skenerja domače izdelave so za uporabnike, ki želijo preprost 3D model predmeta zadovoljivi, medtem ko so za uporabnike, katerih želja je pridobivanje podatkov na osnovi skenogramov, verjetno manj uporabni. Manjša uporabnost je predvsem v slabši natančnosti pridobljenih podatkov, ki je posledica uporabe laserja slabše kakovosti.

Iz analize pridobljenih rezultatov skeniranja je mogoče ugotoviti, da je laserski skener domače izdelave uporaben za skeniranje predmetov, ki so preprostih oblik, čimbolj enobarvni, predvsem je pomembno, da so ne svetleči. Velikost predmeta ni pomembna, ker je mogoče izdelati kalibracijsko ozadje za predmeta različnih dimenzij. Pri predmetih preprostih predmetih so rezultati dobri, nekoliko slabši, ko je predmet različnih barv, slabi in precej neuporabni pa v primerih, ko je površina predmeta svetleča.

---

Laserski skener domače izdelave ne omogoča le izdelave 3D modela predmetov, z njim je mogoče tudi pridobivanje metričnih podatkov predmeta. Razmerje predmeta v naravni velikosti ter njegovega 3D modela je 1:1.

Skozi celotno diplomsko nalogo sem se veliko ukvarjala s vprašanjem, kako izboljšati rezultate skeniranja. Prvi rezultati oziroma skenogrami, katere sem pridobila, so bili veliko slabši v primerjavi z rezultati, predstavljenimi v okviru diplomske naloge, vendar tudi le-ti še vedno niso optimalni oziroma niso takšni, s katerimi bi bila zelo zadovoljna. S ciljem njihovega izboljšanja zrem v prihodnost. Ena izmed nalog v prihodnosti je njegova nadgradnja oziroma izdelava 3D laserskega skenerja, ki bo omogočal skeniranje predmetov in izdelavo modela brez fizičnega premikanja tako predmeta, kakor laserja. Za uresničitev teh želja bi bilo potrebno izdelati podstavek za predmet, ki bi se s pomočjo elektromotorja vrtel, s tem bi se obračal tudi predmet, laser pa bi bil montiran na stojalo, pri čemer bi se laserski žarek vertikalno projiciral na predmet. Seveda pa je prvi korak k uresnitvi vseh idej nakup kvalitetnega laserja.

## VIRI

Boehler, W., Heinz, G., Marbs, A. 2001. The potential of non – contact close range laser scanners for cultural heritage recording. CIPA International Symposium, Proceedings - Potsdam. CIPA Working Group VI. Mainz, Germany.

<http://www.i3mainz.fh-mainz.de/publicat/cipa2001/cipa2001.pdf> (13.12.2006)

Boehler, Marbs, A. 2002. 3D scanning instruments. CIPA, Heritage Documentation - International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording – Corfu. Greece.

[http://www.i3mainz.fh-mainz.de/publicat/korfu/p05\\_Boehler.pdf](http://www.i3mainz.fh-mainz.de/publicat/korfu/p05_Boehler.pdf) (8.01.2007)

Boehler, W., Heinz, G., Marbs, A. 2002. 3D scanning software: An introduction. CIPA, Heritage Documentation - International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording – Corfu. Greece.

[http://www.i3mainz.fh-mainz.de/publicat/korfu/p11\\_Boehler.pdf](http://www.i3mainz.fh-mainz.de/publicat/korfu/p11_Boehler.pdf) (8.01.2007)

Froehlich, C., Mettenleiter, M. 2004. Terrestrial Laser Scanning – New perspectives in 3D surveying. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVI - 8/W2. Freiburg, Germany, 3.10.-6.10.2004.

[http://ispr.org/commission8/workshop\\_laser\\_forest/FROEHLICH.pdf](http://ispr.org/commission8/workshop_laser_forest/FROEHLICH.pdf) (9.02.2007)

Fundamentals: Laser ranging using triangulation, 4.07.1996.

[http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/LOCAL\\_COPIES/MARBLE/low/fundamentals/triang.htm](http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/LOCAL_COPIES/MARBLE/low/fundamentals/triang.htm) (9.02.2007)

Holmes R., Mcguigan D. 2003. Long Range – THREE DIMENSIONAL SCANNING. 3D Vizualization and Rapid Prototyping, Past VizProto Courses, Data Acquisition, Reports. Arizona State University, Spring 2003.

[http://vizproto.prism.asu.edu/classes/sp03/holmes\\_r/teamproject1/](http://vizproto.prism.asu.edu/classes/sp03/holmes_r/teamproject1/) (8.02.2007)

Jacobs, G. 2005. Registration and Geo-referencing. Leica News, HDS in the Press, Article Archive, Professional Surveyor Magazine, July 2005.

[http://www.leica-geosystems.com/hds/en/ProfSurv\\_Registration\\_July05.pdf](http://www.leica-geosystems.com/hds/en/ProfSurv_Registration_July05.pdf) (19.12.2006)

Jacobs, G. 2004. 3D laser scanning: An »Ultra-fast, High-Definition, Reflectorless Topographic Survey. Leica News, HDS in the Press, 2004 Article Archive, Professional Surveyor Magazine, May 2004.

[http://www.leica-geosystems.com/hds/en/ProfSurv\\_3D\\_Laser\\_Scanning.pdf](http://www.leica-geosystems.com/hds/en/ProfSurv_3D_Laser_Scanning.pdf) (19.12.2007)

Jansa, J., Studnicka, N., Forkert, G., Haring, A., Kager, H. 2004. Terrestrial Laserscanning and photogrammetry – Acquisition techniques complementing one another. Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Publications 2004. Istanbul, 31.08.2004.

[http://www.ipf.tuwien.ac.at/publications/ISPRS\\_2004\\_Istanbul/Terr\\_Laserscanning\\_jj\\_ah\\_hk.pdf](http://www.ipf.tuwien.ac.at/publications/ISPRS_2004_Istanbul/Terr_Laserscanning_jj_ah_hk.pdf) (20.01.2007).

Kraus, K. 2004. Photogrammetrie, Band 1, Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen. Technische Universität Wien, 483 - 485 str.

Mills, J., Barber, D. 2005. Development professional guidance: laser scanning in archaeology and architecture. Newcastle University, UK, 20.05.2005.

<http://www.ceg.ncl.ac.uk/heritage3d/downloads/Heritage3D-Visits1.pdf> (8.02.2007)

Pfeifer, N. 2007. Overview of terrestrial laser scanning systems, overall processing and applications. ISPRS Summer School 2007. Ljubljana, Slovenia, 1.07. – 7.07.2007 (4.07.2007)

Santala, J., Joala, V. 2003. On the Calibration of a Ground - based Laser scanning. International Federation of Surveyors, Fig Publications, FIG Working Week 2003. Paris, France, 13.04. - 17.04.2003.

[http://www.fig.net/pub/fig\\_2003/TS\\_12/TS12\\_4\\_Santala\\_Joala.pdf](http://www.fig.net/pub/fig_2003/TS_12/TS12_4_Santala_Joala.pdf) (13.12.2006)

Schultz, T., Ingensand, H. 2007. Terrestrial Laser Scanning – Investigations and Applications for High Precision Scanning. International Federation of Surveyors, Fig Publications, Fig Working Week 2004. Greece, Athens, 22.05. - 27.05.2007.

[http://www.fig.net/pub/athens/papers/ts26/TS26\\_1\\_Schulz\\_Ingensand.pdf](http://www.fig.net/pub/athens/papers/ts26/TS26_1_Schulz_Ingensand.pdf) (16.01.3007)

Staiger, R. 2007. The Geometrical Quality of Terrestrial Laser Scanning (TLS). International Federation of Surveyors, Fig Publications, Fig Working Week 2005 and GSDI-8. Cairo, Eygipt, 16.04. – 21.04.2007.

[http://www.fig.net/pub/cairo/abstracts/ts\\_38/ts38\\_05\\_staiger\\_abs.pdf](http://www.fig.net/pub/cairo/abstracts/ts_38/ts38_05_staiger_abs.pdf) (7.03.2007)

Staiger, R. 2003. Terrestrial Laser Scanning – Tehnology, Systems and Applications. 2<sup>nd</sup> FIG Regional Conference. Marrakech, Morocco, 2.12-5.12.2003.

[http://www.fig.net/pub/morocco/proceedings/TS12/TS12\\_3\\_staiger.pdf](http://www.fig.net/pub/morocco/proceedings/TS12/TS12_3_staiger.pdf) (7.03.2007)

Uprava republike Slovenije za zaščito in reševanje (URSZ). 2005. Ciljni razvojni projekt, Novelacija in nadgradnja informacijskega sistema o zemeljskih plazovih in vključitev v bazo GIS UJME, Priloga III: Merske metode za spremljanje premikov zemeljskih plazov, št. projekta: V2-0857, številka pogodbe 3311-03-828857; 2511-03-20054, 30.10.2005.

[www.sos112.si/slo/tloc.si/merske\\_metode.pdf](http://www.sos112.si/slo/tloc.si/merske_metode.pdf) (4.05.2007)

#### **URL naslovi:**

rbytes reviews:

<http://rbytes.net/software/obj-import-for-autocad-review> (9.02.2007)

3D Laser scanning:

[http://www.inition.co.uk/inition/guide\\_digiscan\\_laserscanning.htm](http://www.inition.co.uk/inition/guide_digiscan_laserscanning.htm) (15.02.2007)

Institute for Robotics and Process control:

<http://www.david-laserscanner.com> (9.11.2006)





## **PRILOGE**

### **Priloga A: Navodila za uporabo programskega paketa »DAVID« za 3D lasersko skeniranje [ Institute for Robotics and Process control ]**

V praksi je v uporabi veliko načinov brezdotičnega merjenja površin predmetov in njihovih 3D rekonstrukcij, vendar večina načinov pogosto zahteva kompleksno in drago opremo. Prav zato se na tržišču pojavljajo novi načini pridobivanja vsaj približno enakovrednih podatkov, ki so cenovno precej dostopnejši.

Programski paket DAVID sodi med nizko cenovni sistem za pridobivanje 3D podatkov. Edina zadeva, ki jo zahteva strojna oprema so preprosti komercialni ročni laser in spletna ali standardna video kamera ali digitalni fotoaparati, ki ima možnost snemanja videoposnetkov.

### **Kaj je DAVID**

DAVID pomeni:

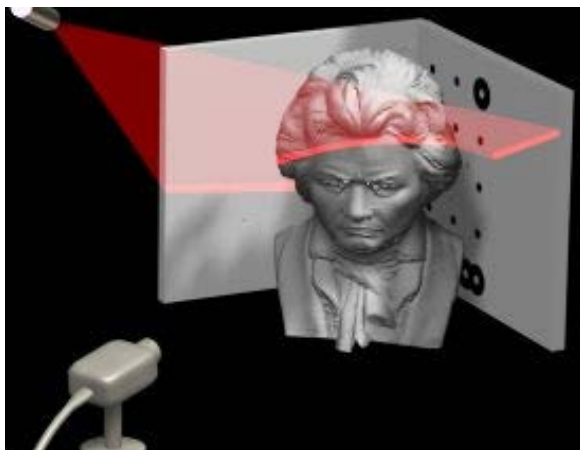
- Definitely Affordable Vision Device
- Depth Acquisition with a Versatile Illumination Device

DAVID je brezplačna programska oprema za lasersko skeniranje bližnjih predmetov. Komponente, ki jih potrebuje so osebni računalnik, kamera (lahko tudi digitalni fotoaparati ali spletna - kamera), kalibracijska tabla v ozadju ter laser, ki projicira črto na objekt, katerega želimo skenirati. Velika prednost pred komercialnimi rešitvami je, da ga lahko uporablja vsak, brez visokih stroškov.

Programski paket DAVID sta razvila računalniška znanstvenika dr. Simon Winkelbach in Sven Molkenstruck iz Inštituta za robotiko Tehnične Univerze v Braunschweig-u v Nemčiji. Koncept je bil objavljen v German Association for Pattern Recognition (DAGM, Deutsche Arbeitsgemeinschaft für Mustererkennung).

Objekt, katerega želimo skenirati, postavimo pred ozadje, katerega tvorita dve plošči, ki med seboj tvorita kot  $90^\circ$ . Kamera mora biti postavljena v smeri objekta. Posebnost v izdelavi 3D modela je, da se laser prosto drži v roki, laserski žarek pa je potrebno premikati čez objekt. Medtem računalnik avtomatično računa 3D koordinate skenirane površine objekta.

Spodnja slika prikazuje princip skeniranja.



Natančnost rezultata skeniranja je za nezahtevne predmete zadovoljiva, najbolj je odvisna od strojne opreme, ki je uporabljena ter nastavitvev (razdalja kamere, velikost objekta, svetlobni pogoji, triangulacijski kot,...). Z laserskim skenerjem, sestavljenim iz cenovno ugodne kamere, objektom velikosti okoli 50 mm, kamere, ki je na razdalji okoli 600 mm in zmernim triangulacijskim kotom okoli  $30^\circ$ , je mogoče doseči napako, ki je manjša kot 0.4 mm. Splošno je napaka manjša kakor 1% razdalje med kamero in objektom.

Če je kalibracija kamere narejena pravilno, 3D učinek ne bo obsegal le obliko objekta temveč bo imel pravilno absolutno vrednost.

Programski paket David omogoča skeniranje večjih ali manjših objektov, velikost je odvisna od velikosti izdelanega kalibracijskega ozadja (pri velikosti formata A3 kalibracijskega ozadja je mogoče skeniranje predmetov do velikosti približno 25 cm ). Za zelo velike objekte se uporablja sistem z zelo velikim kalibracijskim ozadjem, s tem pa večji kalibracijski vzorec in večji laser. Za zelo majhen sistem mora biti laserski žarek kolikor se le da tanka.

## Komponente

Komponente, ki so potrebne za sestavo 3D laserskega skenerja:

- **PC:** Windows 2000/XP ali Microsoft.NET Framework 1.1
- **Laser:** katerikoli izvor svetlobe, ki ustvari zelo tanek, toda jasen laserski žarek. V mnogih primerih je primeren cenovno zelo ugoden laser z domačo izboljšavo (opremljenost laserske diode s cilindričnimi lečami). Dražji laser je primeren v primeru, da ni mogoče ustvariti dovolj temne sobe ali je potrebno skenirati zelo temne objekte. Uporabni so tudi v primeru prevelikega števila šumov, katere ni mogoče odpraviti z izboljšavo prestavljanja kamere (čas osvetlitve, velikost odprtine,..). Pomembno je tudi, da ni večjih razlik v svetlosti med objektom in ozadjem. V primeru, da ni mogoče zagotoviti svetlejšega objekta, je potrebno uporabiti temnejše ozadje.
- **Kamera:** Čeprav skener deluje tudi s kamerami slabše ločljivosti, je mogoče boljše rezultate doseči s kamerami višje kvalitete. Potrebna ločljivost kamere je odvisna od oblike objekta. Le zelo majhni detajli objekta zahtevajo višjo ločljivost. Pomembno je le, da ima kamera WDM gonilnike.
- **Kalibracijski tabla:** Za proces skeniranja se potrebuje kalibracijsko tablo za kalibracijo kamere ter kot ozadje strukture med skeniranjem. Sestavljen mora biti iz dveh ravnih plošč, ki sta med seboj popolnoma pravokotni. Za kalibracijo kamere je uporaben kalibracijski vzorec, ki ga je potrebno prilepiti na ploščo.

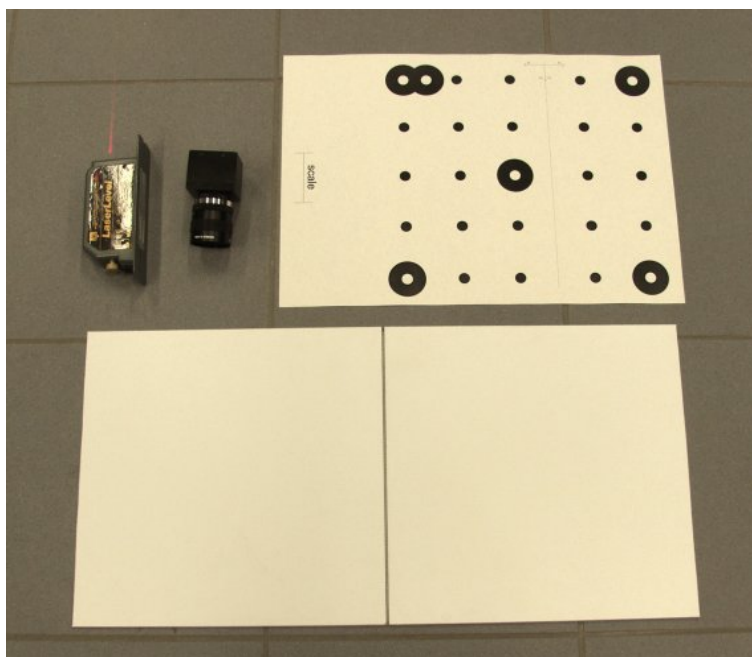
- **Leče:** Kalibrirana kamera lahko nadomesti linearno in nelinearno popačenje leče, dobre leče pa bodo povečale natančnost/preciznost/točnost.

## Izdelava

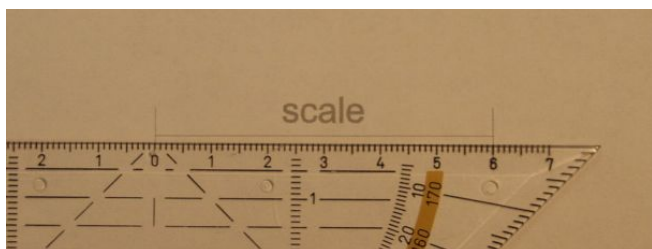
### Kalibracijsko ozadje oziroma kalibracijska tabla

V nadaljevanju so opisani koraki, ki prikazujejo primer izdelave kalibracijskega ozadja. Za izdelavo kalibracijskega ozadja je potrebno pridobiti dve ravni plošči, lepljivi trak in natisnjeni vzorec kalibracije, ki se ga lahko dobi s programsko opremo. Teoretično je mogoče natisniti vzorec v večji ali manjši dimenziji.

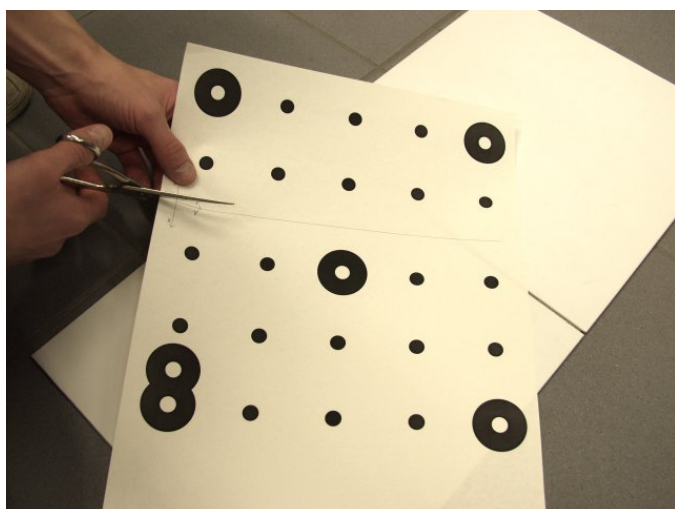
Spodnja slika prikazuje pripomočke, ki so potrebni za sestavo 3D laserskega.



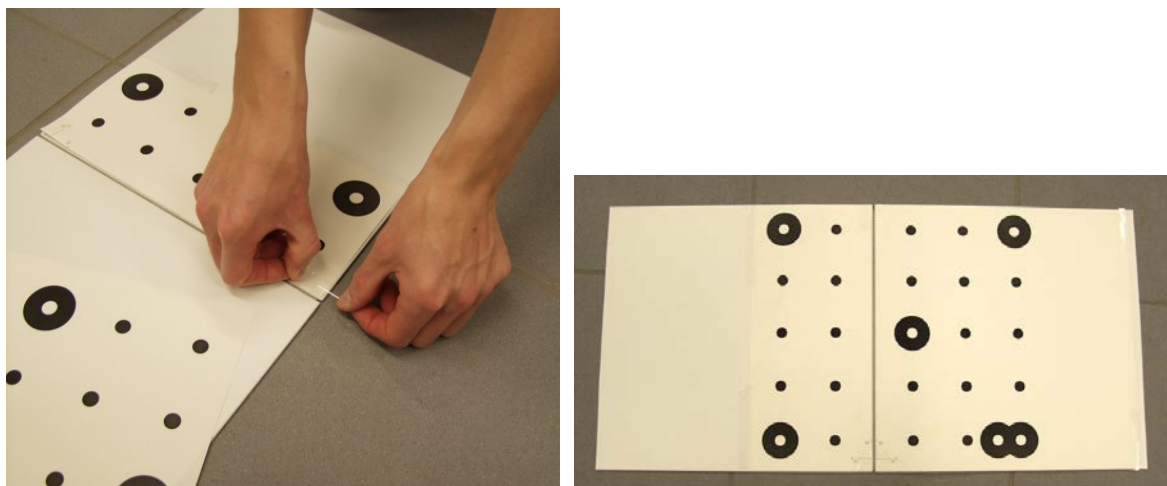
Izmeriti in zapomniti si je potrebno, koliko znaša mera dolžine na natisnjenu papirju, ker je podatek potreben med postopkom kalibracije kamere:



Izrezati je potrebno natisnjeno ozadje:



Oba dela kalibracijskega ozadja je potrebno združiti na plošči tako, da je plošča postavljena pod kotom  $90^\circ$  in da so izrezani robovi med seboj združeni zelo natančno.



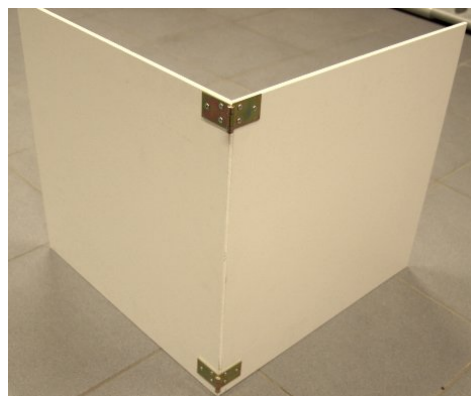
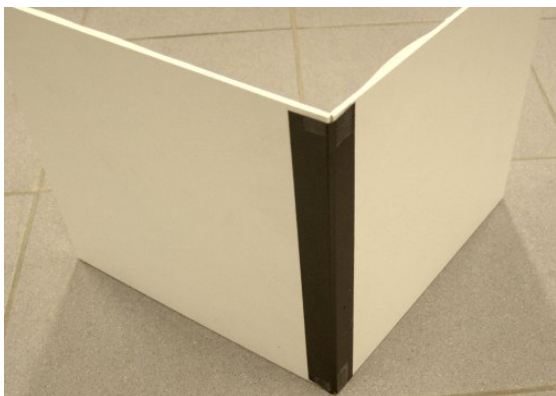
Za sestavo dveh plošč se lahko uporabi katerikoli natančni pravokotni predmet, pomembno je le, da sta stranici med seboj pravokotni in da sta dela sivega koordinatnega sistema med seboj zelo natančno združena. Dvojne točke kalibracijske table morajo biti v najnižjem desnem kotu vzorca (če gledamo skozi objektiv kamere).

Vsi koraki morajo biti izpolnjeni pred kalibracijo kamere in skeniranjem, ker je le na ta način mogoče pridobiti pravilne vrednosti za »absolutno« orientacijo predmeta ter njegovo pravo velikost in obliko.

Spodnja slika prikazuje pritrjeno natisnjeno ozadje na plošči, ki sta med seboj pravokotni.



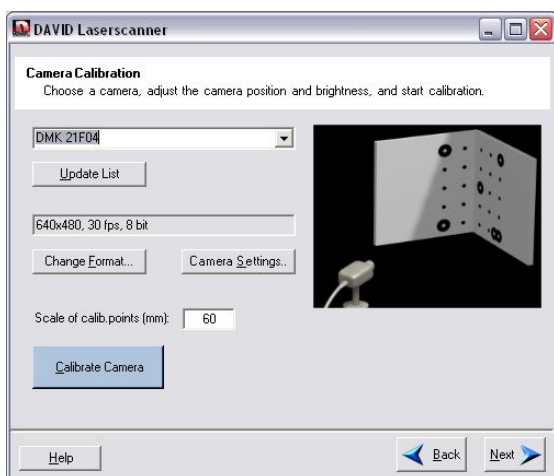
Za združitev plošč se lahko uporabi ozek lepljivi trak ali kotni nosilec in privijanje. Izgled prikazujeta spodnji sliki:



Kot ozadje se lahko uporabi tudi kot sobe (kot je lahko velik, kolikor je velika stena brez okraskov), če ima natančni 90-stopinjski kot in dovoli pritrditev natisnjene vzorca kalibracije, tako da so izrezani robovi med seboj združeni zelo natančno. Paziti je potrebno le, da je dvojna točka v vzorcu kalibracije spuščena v desni kot (pri gledanju skozi objektiv kamere).

## Kalibracija kamere

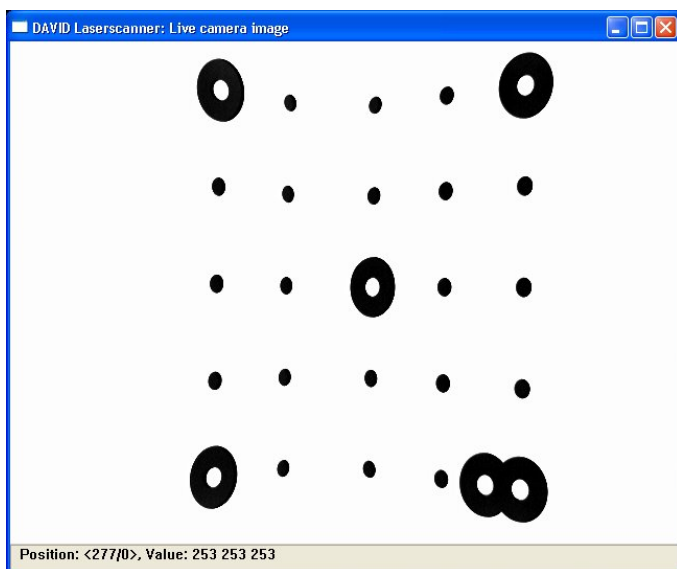
Na spodnji sliki je prikazano osnovno pogovorno okno za kalibracijo kamere:





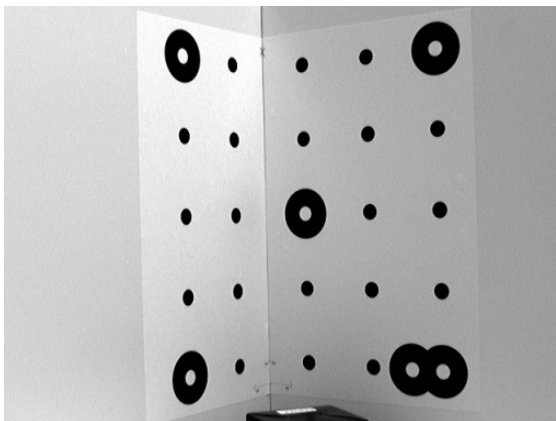
Pred skeniranjem objekta je potrebno kalibrirati kamero. Naslednji koraki opisujejo korake za izvedbo kalibracije kamere v pogovornem oknu:

1. Kamera mora biti priključena na računalnik, podpirati mora WDM Video Capture Driver za Windows ter naloženi morajo biti gonilniki kamere.
2. Najprej je potrebno klikniti na zgornji gumb in izbrati kamero. Če kamera ni navedena, je potrebno vzpostaviti povezavo in pritisnite gumb »Update List«. Ob izbiri ustrezne kamere se prikaže novo pogovorno okno z aktivno kamero.
3. Če standardni format podobe (ločljivost ali število slik zajetih v eni sekundi ne izpolnjujeta vse zahteve) se lahko spremeni format s pritiskom na gumb »Change format«.
4. Kamero je potrebno postaviti pred kalibracijsko ozadje tako, da je celoten kalibracijski vzorec viden v objektivu kamere.
5. Avtomatična kalibracija kamere potrebuje zelo kontrastno podobo (črne točke kalibracije ali belo ozadje), zato je potrebno prilagoditi nastavitve kamere (s pritiskom na gumb »Camera Setting« in/ali preklopitev na izvor svetlobe). Spodnja slika prikazuje podobo, ki jo vidimo skozi objektiv kamere (prikazuje točke kalibracije, s pomočjo katerih lahko izvedemo kalibracijo kamere):

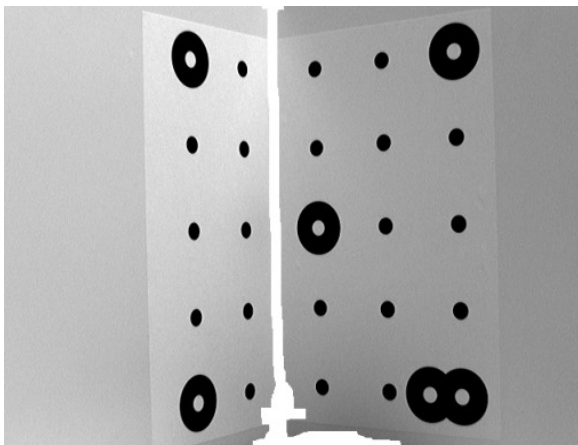


Poleg 25-ih kalibracijskih markic, v podobi kamere ne sme biti viden noben temen objekt.

Če je avtomatska metoda kalibracije neuspešna, je potrebno natančno pogledati sporočilo napake. Velikokrat programski paket DAVID najde preveliko število markic. Brez težav je mogoče programskemu paketu DAVID pomagati z izborom metode za brisanja kalibracijskih markic. Nato se uporabi levi gumb miške za očiščenje napačnih markic v podobi kamere (površine temnih podob). Na sliki je prikazana optimalna podoba kalibracije:



Če izbris ni željen, ga je mogoče opraviti z desnim gumb miške. Spodnja slika prikazuje izbris temnih površin:

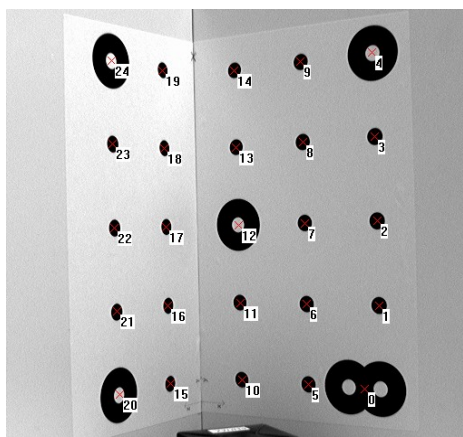


Programski paket DAVID omogoča za zelo različno okolje, kjer metoda brisanja ne pomaga, ročno določevanje položaja markice. Izvede se ga tako, da se izbere ročni način postavljanja markic. Pri tem je pomembna natančna postavitev križcev v sredino vsake markice.

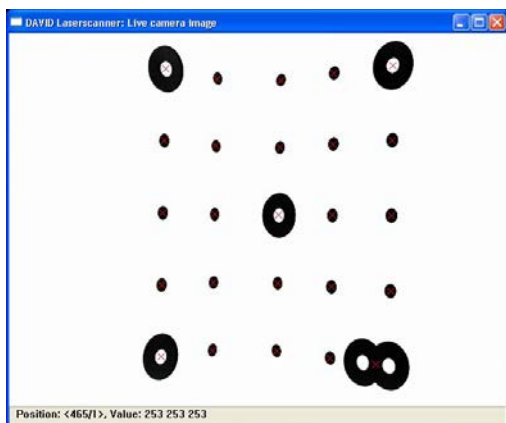
V pomoč je uporaba miške za definiranje točk kalibracije:

- levi gumb miške: gumb je uporaben za klik na markico ali premik izbrane markice,
- desni gumb miške: za dodajanje nove markice,
- sredinski gumb miške: za odstranitev izbrane markice.

Prikaz urejenosti markic (0-24):



6. Potrebno se je prepričati, da je lestvica natisnjene kalibracijskega vzorca pravilna. Vrednost vnesenega merila v okno "Scale of calib.points" mora biti ista kot je izmerjena vrednost na kalibracijskem ozadju.
7. Kalibracija kamere se izvede s klikom na gumb »Calibrate Camera«. Če je avtomatska kalibracija kamere uspešna, se na sliki pokažejo majhni rdeči križi, ki označujejo center kalibracijskih točk:



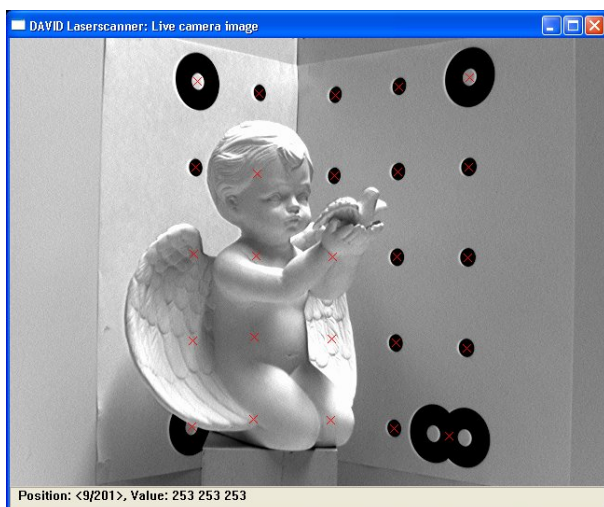
## 3D Lasersko skeniranje

Spodnja slika prikazuje pogovorno okno, s katerim se prične proces skeniranja:



Če je kalibraciji kamere uspešno izvedena, se lahko prične s skeniranjem. Naslednji koraki vodijo skozi 3D program DAVID za skeniranje:

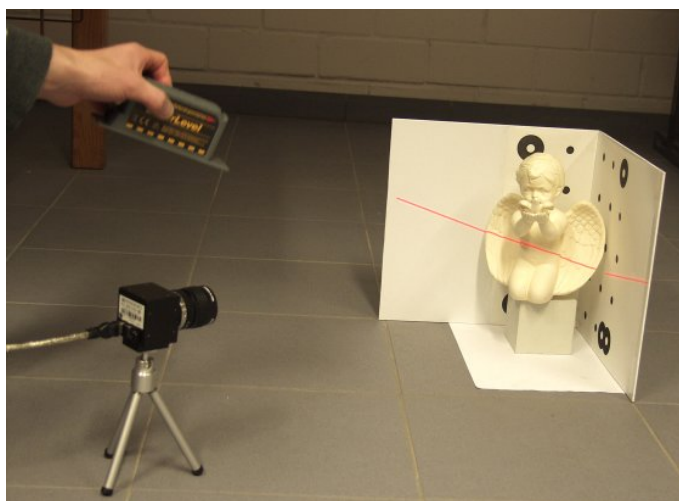
1. Predmet, ki je namenjen skeniranju, je potrebno postaviti med kamero in kalibracijskim ozadjem. Viden mora biti v sredini zaslona kamere. Markice na kalibracijskem polju morajo biti vidne na levi in desni tretjini slike.



2. Prižgati je potrebno laser in ga usmeriti na objekt. Prilagoditi je potrebno nastavitve kamere (odprtina, osvetlitev), položaj laserja in svetlobne pogoje v sobi, tako da je laserska linija jasna in dobro vidna na podobi, medtem ko je ostanek podobe temačen kolikor se le da:

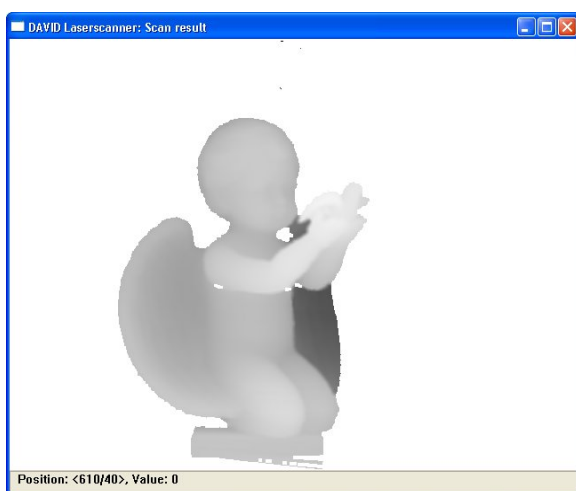


2. Svetlobni pogoji v sobi se ne smejo veliko spremeniti.
3. Ugasniti je potrebno laser (ali vsaj ne usmerjajte laserja na prizorišče), nato pritisniti gumb »Start«!
4. Po kliku na gumb »Start« je potrebno prižgati laser in poskenirati predmet z dotikanjem laserske črte čez predmet:

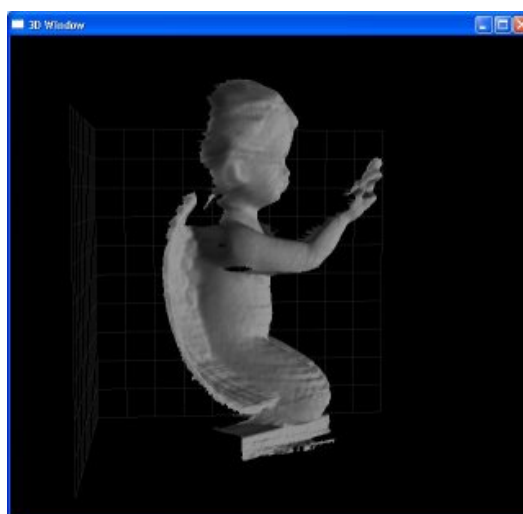
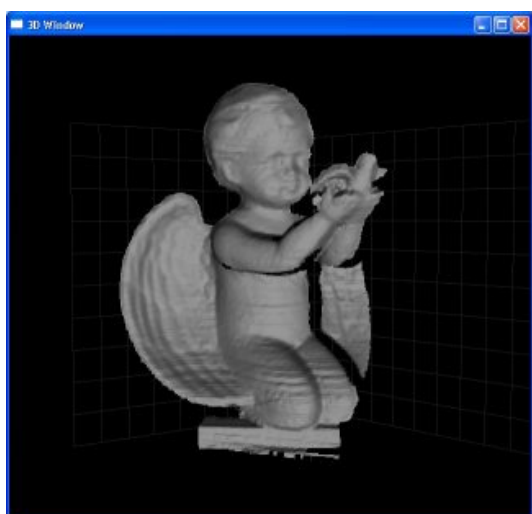


5. Po končanem skeniranju se lahko v mnogih primerih uporabi povprečna vrednost in nato se z njo interpolira filter s klikanjem ustreznih gumbov. Učinek filtrov ni mogoče videti v oknu »Scan results« temveč v 3D pogledu.

Spodnja slika prikazuje okno rezultata skeniranja po približno 30 sekundah skeniranja ter naknadno filtriranje:



6. Za ponovni pogled ali posodobitev predmeta v 3D je potrebno pritisniti gumb »Show 3D«. V oknu 3D je mogoče uporabiti desni gumb na miški za rotacijo predmeta. Poleg tega se lahko uporabi levi gumb na miški ter kolo za povečavo.



7. Skeniranje je mogoče nadaljevati kadarkoli ali pa projekt izbrisati s pritiskom na gumb »Erase«.
8. V primeru, da so rezultati zadovoljivi, se lahko skenirani podatki izvozijo v datoteko \*.obj s pritiskom na gumb »Save Mesh«. \*.OBJ je standardni mrežni format, katerega se lahko uvozi v mnoge 3D aplikacije, ker so 3D koordinate vozlišč trikotnikov so zapisani v tekstovni datoteki (za zapis v drugačnem formatu je mogoče preoblikovati \*.obj datoteko z uporabo brezplačnih orodij, ki se jih lahko pridobi na svetovnem spletu).

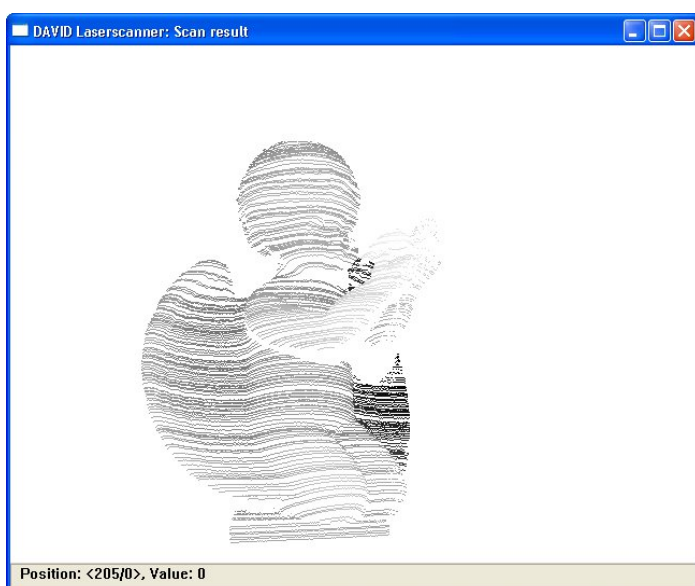
Za uspešno skeniranje je potrebno:

- Laserski žarek mora biti viden na kalibracijskem ozadju levo in desno od predmeta in na predmetu v sredini ob enakem času.
- Razdalja med kamero in ravnino laserja (kot triangulacije) mora biti kolikor se le razsežen za višjo točnost. Laser ne sme biti na enaki višini kakor je kamera.
- Odvisno od osvetlitve ozadja kamere, premikanje laserskega žarka ne sme biti prehitro.
- Na Oknu »Scan results« je mogoče med postopkom skeniranja vseskozi opazovati, katere dele predmeta ste že skenirali in katere je potrebno skenirati ponovno. Spodnja slika prikazuje vmesni rezultat:



- Svetlost pikslov v oknu se avtomatično spreminja in regulira; predstavlja razdaljo ustrezne točke na površini objekta do kamere. Ta razdalja je prikazana v oknu »Scan results« pri premiku kurzorja preko nje (gumb okna, vrednost in mm):
- Osvetljevanje z laserskim žarkom je tako časovno kakor tudi »smerno« neomejeno. Teoretično je mogoče premikati glavo laserje kakor koli, toda praktično bodo rezultati boljši, če je glava laserja vedno na enakem položaju.
- V mnogih aplikacijah ni potrebno skenirati vsakega slikovnega elementa

Rezultata skeniranja po 5 ali 10 sekundah skeniranja prikazuje spodnja slika:



## Združevanje modelov

Programska oprema DAVID za združitev modelov omogoča ustrezno orientacijo in kombinacijo 3D skenogramov iz različnih smeri gledanja. Ni običajno orodje za »šivanje« odkar združuje:

- uporabniški vmesnik za odstranjevanje grobih napak,
- avtomatska in polavtomatska registracija površine,
- sistem za odstranjevanje šumov, ki nam lahko zelo popačijo rezultate.



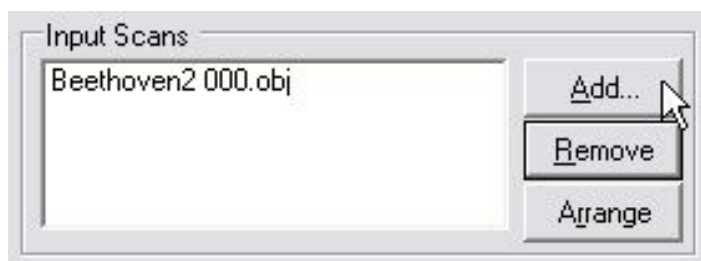
Pogovorno okno programskega paketa DAVID za združevanje modelov, ki omogoča orientacijo in združevanje skenogramov, ki so narejeni iz različnih smeri, prikazuje spodnja slika:



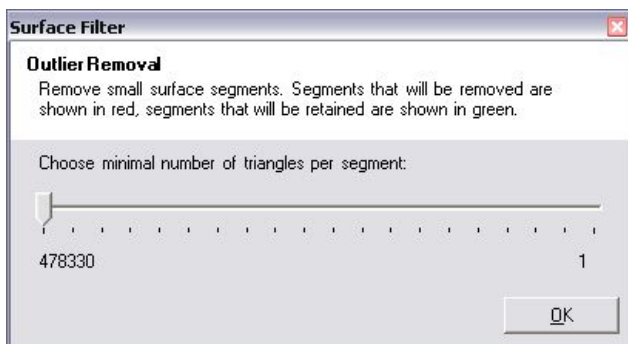
Rezultat združevanja je gladka 360-stopinjska mreža trikotnikov 3D modela.

## Navodila za praktično uporabo programskega paketa DAVID za združitev modelov

Najprej je potrebno dodati enega ali več skenogramov modela v seznam vhodnih podatkov s klikanjem na gumb »Add...«.



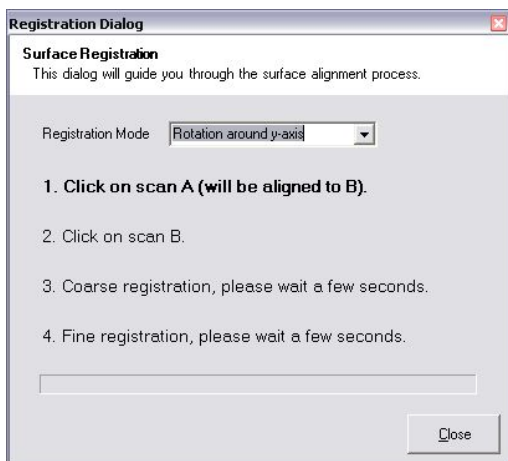
Če DAVID zazna več kakor en segment površine na skenogramu, pogovorno okno »Surface Filter« prikaže:



Premikanje drsnika pogovornega okna levo-desno omogoča izbor, kateri izsek bo oddaljen in kateri ne. Okno 3D prikaže predogled rezultata. Izseki, ki bodo premaknjeni, so prikazani rdeče, izseki, ki ostanejo bodo prikazani zeleno (enako pogovorno okno se prikaže ponovno pri shranjevanju rezultatov združevanja).

Po končanju dodajanja skenogramov v seznam, je potrebno pritisniti gumb »Arrange« za njihovo razvrstitev drsni po drsni.

Pred izvedbo združevanja skenogramov je potrebno izbrati registracijo skenogramov. Pritisniti je potrebno gumb »Align«, da se odpre pogovorno okno registracija DAVID za izbor:

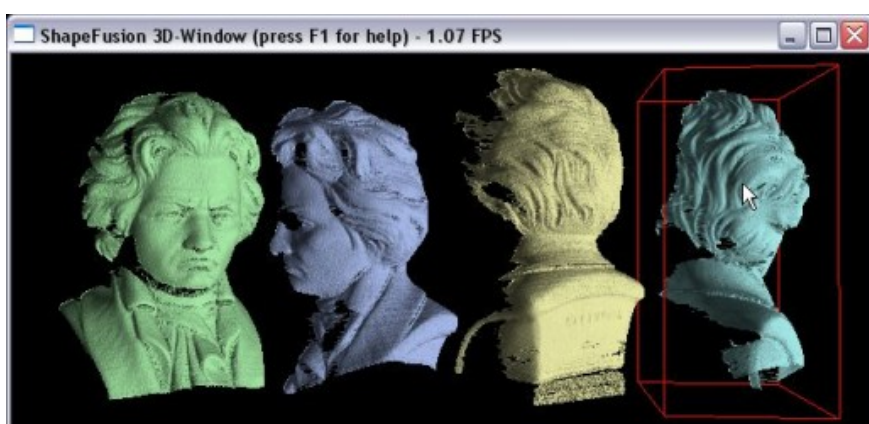


Izbirati je mogoče med šestimi različnimi metodami registracije za paroma površinsko orientacijo: »Prosta rotacija«, »Rotacija okoli x - osi«, »Rotacija okoli y - osi«, »Rotacija okoli z - osi«, »Ročna registracija« in »Fina registracija«.

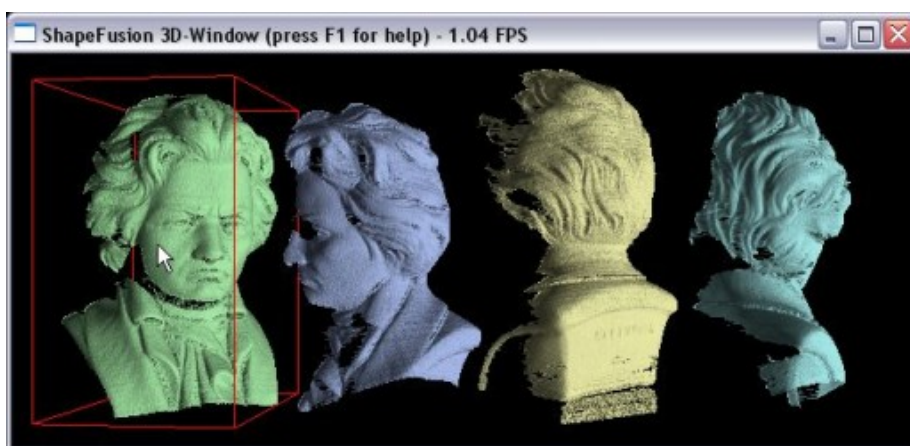
Pri uporabi prvega načina »Prosta rotacija«, računalnik izvede preprosto registracijo med dvema skenogramoma v trenutku, brez kakršne koli povezave glede na rotacijo ali translacijo oziroma programska oprema poišče relativni položaj med dvema skenogramoma, ki omogočata največjo površino stikanja. Ta neomejena površina stikanja deluje maksimalno v mnogih primerih, toda ne v vseh.

Naslednje tri metode registracije so popolnoma podobne prvi, le da je relativni položaj med dvema skenogramoma omejen. Npr. metoda »Rotacija okoli y - osi« zahteva, da se je objekt vrtel okoli y - osi referenčnega koordinatnega sistema (y - os je navpična os v primeru uporabe programskega paketa DAVID za skeniranje), zahteva tudi, da ni bila izvedena translacija objekta okoli y - osi. Center rotacije ostane neomejen, kar pomeni, da ni potrebna uporaba »mize«, ki se vrti, temveč se lahko objekt ročno rotira. Po izboru metode registracije, pogovorno okno registracije naprej vodi skozi proces orientacije.

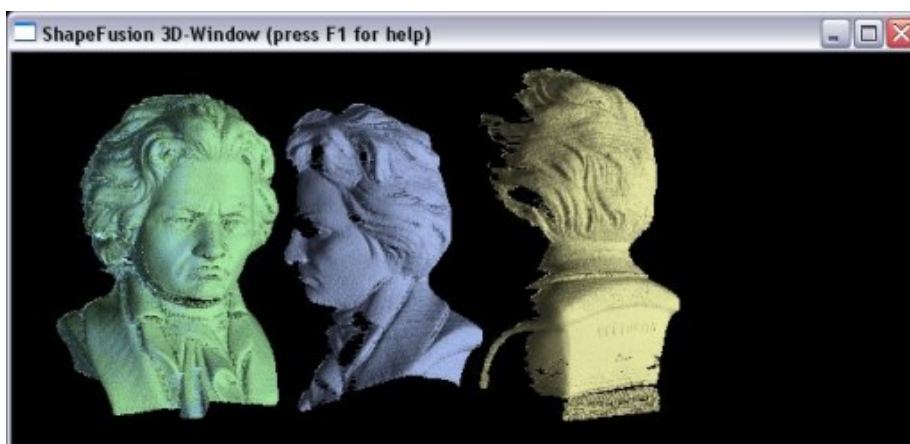
Po izbrani registraciji je potrebno izbrati skenogram, ki naj bi se združili. S klikanjem na skenograme v 3D oknu je mogoče videti rdeče omejeno okno okoli izbranega skenograma:



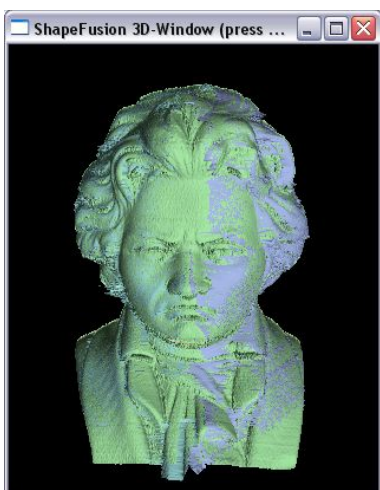
S klikom na drugi skenogram izberemo skenogram, katerega želimo dodati prvemu, kakor prikazuje spodnja slika:



Po končanem dodajanju sledi izvedba preproste registracije. Po nekaj sekundah sta oba skenograma združena:

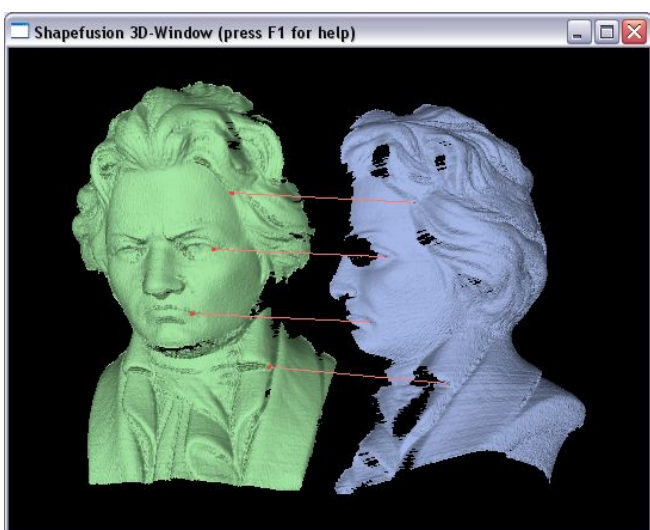


Za ostale skenograme je potrebno proces ponoviti. Po končanem procesu združevanja skenogramov bi moral 3D model izgledati tako kot prikazuje spodnja slika:

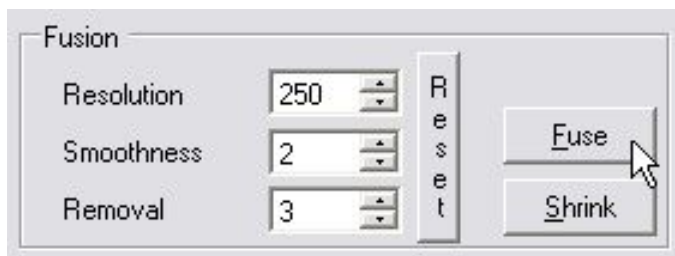


Upoštevati je potrebno, da mora biti orientacija površine v vrsti zelo precizna za doseganje ustreznih rezultatov v procesu združevanja. Natančna orientacija je karakterizirana z mnogimi točkami na površini (barva prekrivanja površine v 3D oknu mora migljati, če rotirati objekt).

Če proces registracije ne najde primerne orientacije, je potrebno poskusiti še enkrat. Odkar metoda temelji na naključnem algoritmu, obstajajo dobre možnosti, da bo proces deloval v drugem ali tretjem poizkusu. V primeru, da proces ne deluje, je potrebno ročno uvrščanje skenogramov v 3D okno in uporabiti metodo »Fina registracija«. Ročna metoda »ročna registracija« dovoljuje podrobno označitev ustreznih parov točk, katere bi morali dobiti v zvezo po orientaciji:



Po natančno izvedeni orientaciji skenogramov, lahko pride tudi do napačnih rezultatov prileganja. Za izpis rezultatov je potrebno pritisniti gumb »Fuse«.



Rezultat združevanja je zelo odvisen od parametrov združevanja, to so »Ločljivost«, »gladkost« in »odstranitev«. Priporočljivo je poskusiti z različnimi nastavitvami parametrov. Najprej je priporočljiva nastavitev nizke ločljivosti (npr.100), ker je pri nizki ločljivosti proces združevanja mnogo bolj močan v primerjavi z nenatančnostjo orientacije, šumi in stvarmi, ki so na drugi strani. Višja ločljivost pomeni daljši obdelovalni čas in mnogo več trikotnikov. Če je rezultat združevanja luknjičast model pri višji ločljivosti, je potrebno povečati parametre »gladkosti«. Vrednost parametra »gladkosti« naj bo na začetku majhna, povečuje se naj do zadovoljivih rezultatov.

Za mnogokratno zmanjšanje nečistih robov je potreben klik na gumb »Shrink«.

Gumb »Save« odpre novo pogovorno okno za shranjevanje rezultatov združevanja, kjer je mogoče izbirati med \*.OBJ in \*.PLY formatom datoteke. Izbrati je mogoče bodisi rezultat združevanja bodisi orientiran in filtriran 3D skenogram., vendar značilnost shranjevanja ni aktivirana v procesu združevanje modelov.

## **Pomembna navodila [ Institute for Robotics and Process control ]**

Za uspešno izvedbo 3D laserskega skeniranja je priporočljivo upoštevati spodnja navodila:

- Pravilno je potrebno nastaviti vse nastavitve kamere (velikost odprtine, čas osvetlitve) in svetlost sobe, tako da podoba kamera izgleda približno tako kakor ena izmed nastavitvev v vzorčnih primerih. V objektivu kamere mora biti žarek laserja kolikor se le da tanka, toda še vedno močna svetla črta. Preostali del podobe naj bo čimbolj temen, celo črn, posebno ob uporabi neonske luči v sobi (zaradi migljajev).
- Pred nakupom drage opreme je priporočljivo izboljšati nastavitve (soba, ozadje, nastavitve kamere,...), ker so rezultati 3D skeniranja presenetljivo dobri ob uporabi cenovno ugodne kamere( 640 x 480 pikslov, 20 €) in laserja (10 €).
- Če objekt odbija lasersko svetlobo na sebe, je potrebno zmanjšati svetlost (velikost odprtine, čas osvetlitve,...), tako da odboji niso vidni v podobi kamere. V nasprotnem primeru so lahko rezultati napačni in pomanjkljivi.
- Kamera ne sme uporabljati prepletenih metod (DV kamere ponavadi to delajo) in ne sme uporabljati zgoščevanja. Drugače so lahko rezultati slabi in precej popačeni.
- Za skeniranje temnih, prozornih ali predmetov, ki odsevajo svetlobo, se lahko uporabi npr. prah za otroke, ki daje predmetu hkrati svetel in moten videz.
- Pred pritiskom na gumb »Start«, laser ne sme biti viden v kameri, poleg tega se svetlobni pogoji v sobi od trenutka vklopa laserja ne smejo več spreminjati. Če se svetlobni pogoji spremenijo, je potrebno pritisniti »Pause«in ponovno pričeti s skeniranjem s klikom na gumb »Start«.
- Pri skeniranju žive osebe mora imeti oseba ves čas skeniranja zaprte oči (oblika odprtih in zaprtih oči je zelo podobna).

## **Priporočljivo je upoštevati tudi [ Institute for Robotics and Process control ]:**

- Premikanje laserskega žarka naj bo kolikor se le da počasno, pri čemer je potrebno paziti, da se laser (izvor laserskega žarka) preveč ne premika. Rezultati so najboljše, če gre laserska žarek le enkrat ali dvakrat, toda počasi čez objekt, kakor nekajkrat z večjo hitrostjo,
- Velikokrat je nemogoče poskenirati vsa vidna področja objekta, ker jih laser ne doseže. Ko se objekt z laserjem »osvetli« enkrat ali dvakrat z zgornje stani, ga je potrebno »osvetliti« še s spodnje. To je mogoče takrat, ko kamera stoji dovolj visoko nad mizo oz. tlemi.
- V večini primerov so rezultati boljši, če je laser na točnem položaju in če se rotira počasi (posebno, kadar kalibracija kamere ni narejena točno),
- Mogoče je shraniti dva oddaljena skenograma (enega narejenega z laserjem od zgoraj in drugega od spodaj) in ju kombinirati z modelom za združevanje DAVID,
- Za pritrditev tarč v ozadju ni priporočljiva uporaba gladkih trakov, tudi ne uporaba gladkih materialov za izdelavo ozadja, ker njihova gladkost v bližini območja skeniranja povzroči oddaljitev odboja laserja,
- Položaj laserja je potrebno postaviti tako, da vidi le ozadje ter skenirani objekt (tla in scena v ozadju kota ne smejo biti vidni),
- Večja ločljivost kamere (več kakor 640x480) je uporabna, če je laser na objektu zelo tanek, objekt pa ima malo detajlov, šumi na podobi so zelo nizki,
- Pri skeniranju človeške glave je zelo pomembno, da oseba ne premika glave (oseba naj nasloni svojo glavo na steno ozadja),
- DAVID zahteva, da vidi lasersko črto:
  - Na levi strani leve ravnine ozadja,
  - Na desni strani desne ravnine ozadja,
  - Na objektu v sredini.
- Ni nujno, da je laserska črta strogo horizontalno. Primerna je vsaka smer črte, ki je med horizontalo in diagonalo. Če program zahteva vertikalno lasersko črto, je mogoče kamero ter ozadje rotirati do 90°. V tem primeru se lahko tla ali miza uporabna kot ena izmed sten za ozadje.



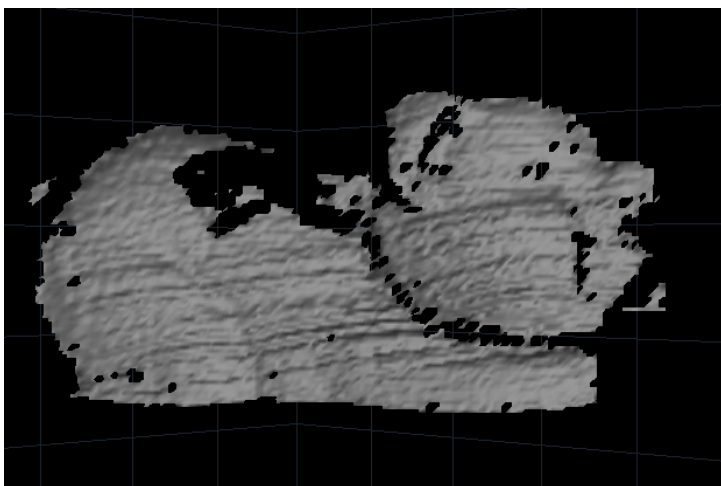


## Priloga B: Vmesni rezultati skeniranja skulpture

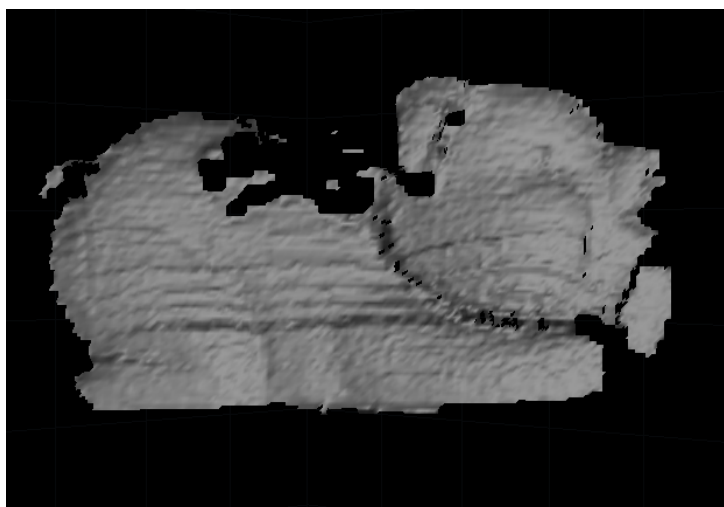
- Desna stran skulpture

Prvi del skeniranja skulpture je bilo skeniranje desne strani. Predmet je skoraj v celoti svetle barve, le na nekaterih delih temnejše modre barve. Kot je mogoče videti, so predeli svetle površine skenirani boljše kakor predeli, ki so obarvani temneje. Na predelih temnejše barve je mogoče zaznati območja brez točk, kakor tudi na območjih, ki v objektivu kamere niso vidni.

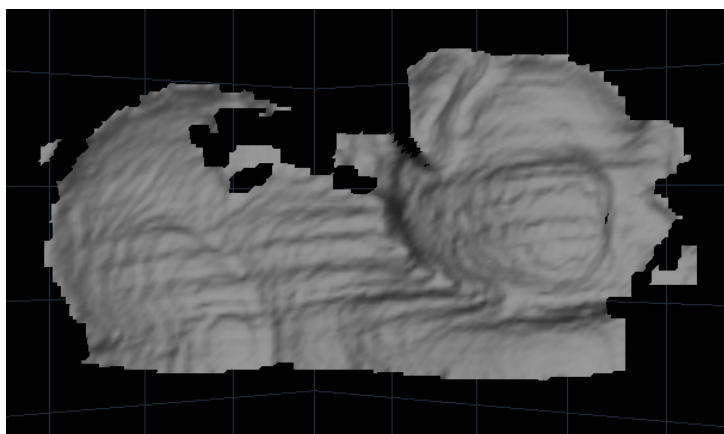
Spodnja slika prikazuje skenogram, na katerem ni bilo narejene nobene izboljšave znotraj programskega paketa David:



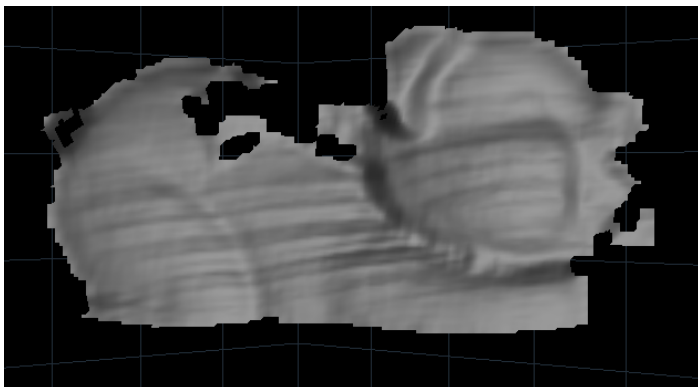
Na osnovnem skenogramu je bila izvedena interpolacija, katere namen je zapolnitev praznega prostora. Skenogram vsebuje večje število točk v primerjavi z izvornim skenogramom, ker interpolacija omogoča dodajanje točk na mestih, kjer je število točk majhno, razdalja med točkami, med katerimi je izvedena interpolacija pa majhna. Rezultat interpolacije prikazuje spodnja slika:



Spodnja slika prikazuje primer skenograma, na katerem je bila poleg interpolacije izvedena tudi glajenje linij. Površina skeniranega predmeta je bolj gladka v primerjavi s skenogramom, na katerem razen interpolacije ni bil izveden noben postopek.



Poleg glajenja linij program omogoča tudi povprečenje. Rezultat obeh izvedenih postopkov prikazuje spodnja slika:

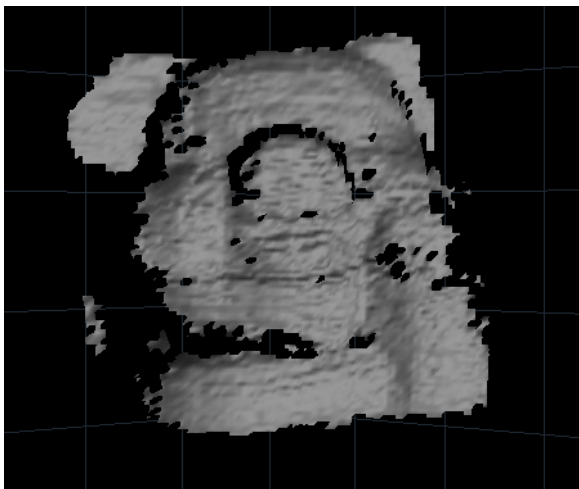


Iz zgornjih slik je razvidno, da je mogoče na osnovnem skenogramu, ki ga dobimo kot rezultat laserskega skeniranja, dodelava. Skenogrami, pridobljeni na osnovi interpolacije, glajenje linij ter povprečenja, so si med seboj po osnovnih značilnostih podobni, vendar je površina na drugem in tretjem skenogram bolj gladka, zmanjšano je tudi število odvečnih točk. Ker je bila pri vseh skenogramih, razen v osnovnem skenogramu, izvedena interpolacija, so razlike najbolj vidne pri gladkosti skenirane površine, v primerjavi z osnovnim skenogramom pa še večje število točk oziroma manjše število lukenj.

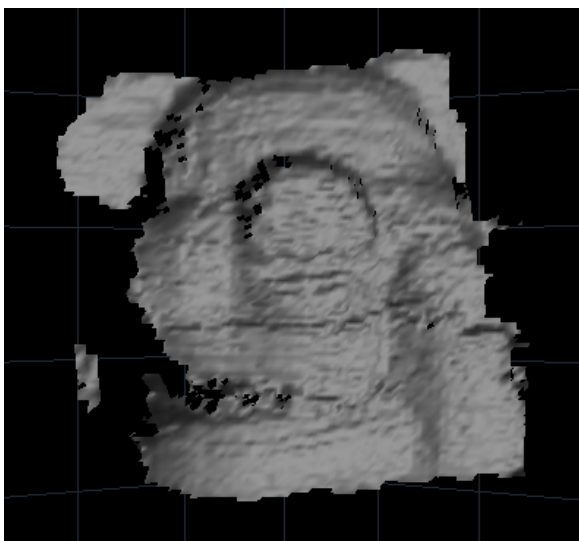
- Skeniranje glave skulpture

V drugem delu skeniranja je bil predmet ročno obrnjen tako, da je bilo v objektivu kamere mogoče videti njegov sprednji del.

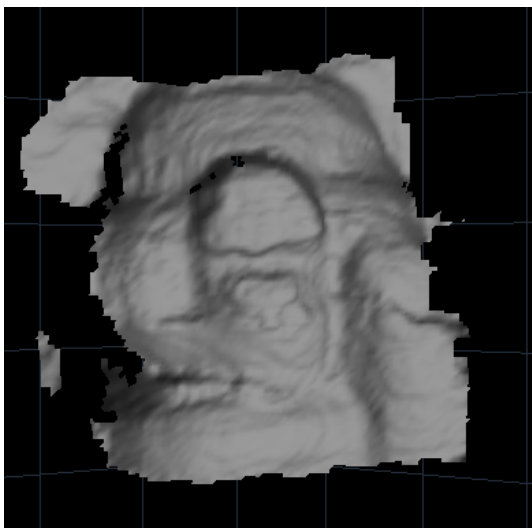
Rezultat skeniranja, brez dodelave prikazuje spodnja slika:



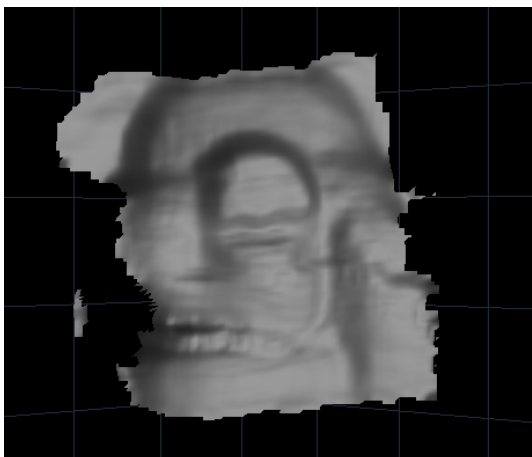
Če na skenogramu izvedemo interpolacijo, je rezultat manjše število območij brez točk, prikazano na spodnji sliki:



Programski paket omogoča poleg združevanje skenogramov, na katerih ni izvedena nobena dodelava, tudi združevanje skenogramov z dodelavami. V primeru, da bi želeli združiti skenograma, na katerih je narejena tako interpolacija kakor glajenje linij, sem le-to naredila tudi na skenogramu glave:



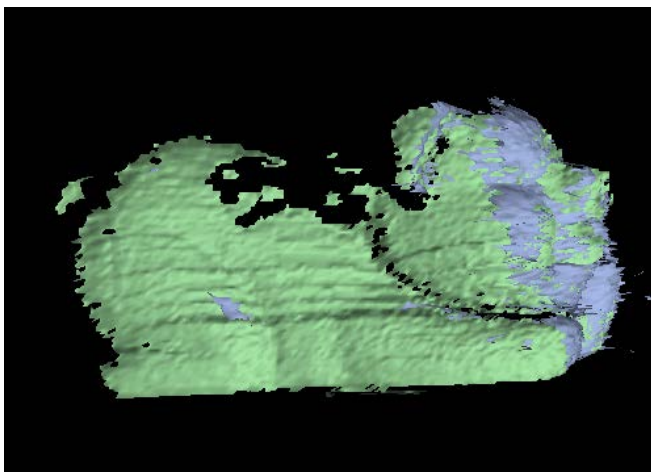
Zadnja obdelava oziroma dodelava skenograma je izvedba interpolacije ter povprečenje:



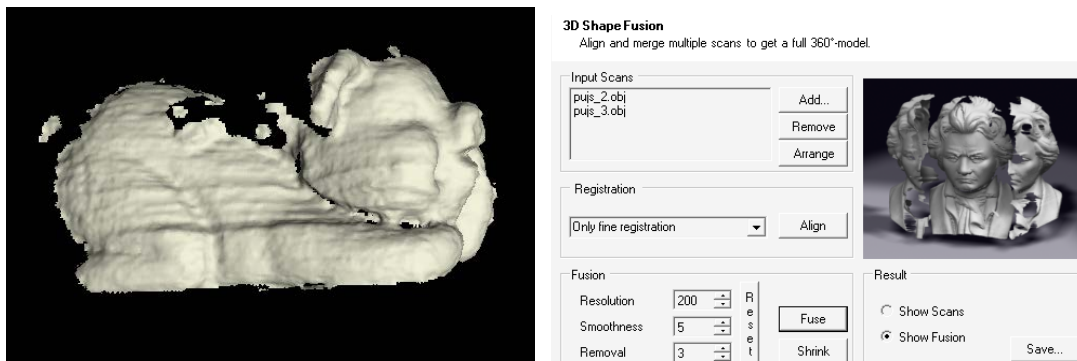
Če skenograme sprednjega dela skulpture primerjamo med seboj, lahko ugotovimo, da so rezultati podobni kakor so pri primerjanju skenogramov desne strani skulpture oziroma se rezultati med seboj razlikujejo po enakih lastnostih kakor pri skeniranju desne strani skulpture.

## Združevanje skenogramov v 3D model

Z združitvijo dveh skenogramov dobimo 3D model skeniranega predmeta. Na spodnji sliki je mogoče videti, da sta bila združena dva skenograma, eden je zelene drugi modre barve:



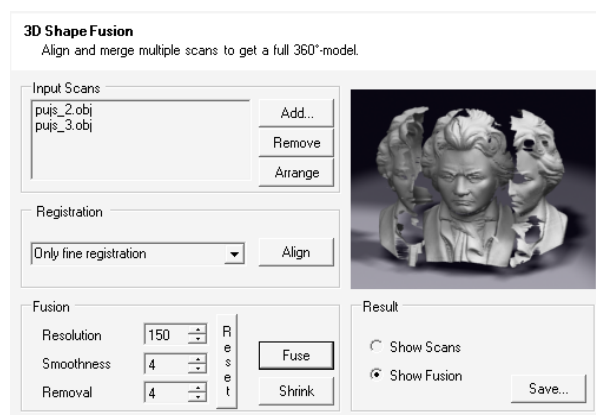
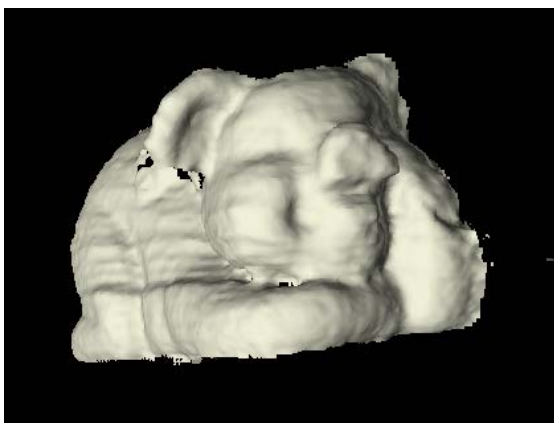
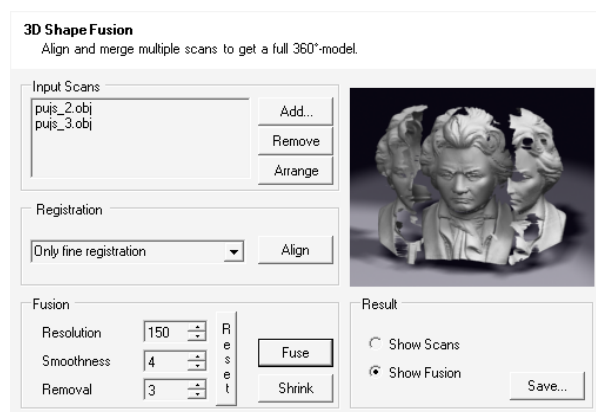
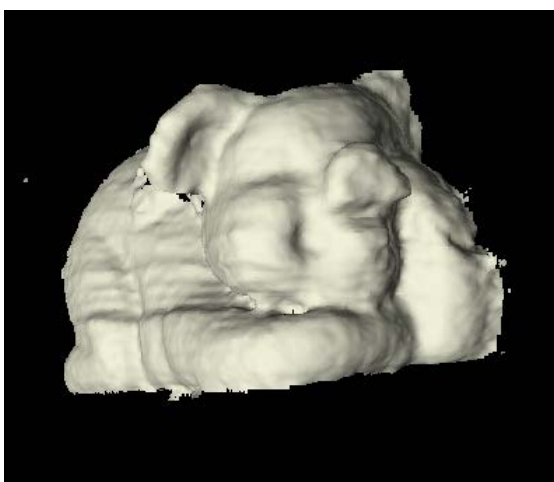
V pogovornem oknu, ki omogoča združevanje skenogramov je mogoč tudi klik na gumb »Fuse«. Rezultat le - tega podaja spodnja slika:



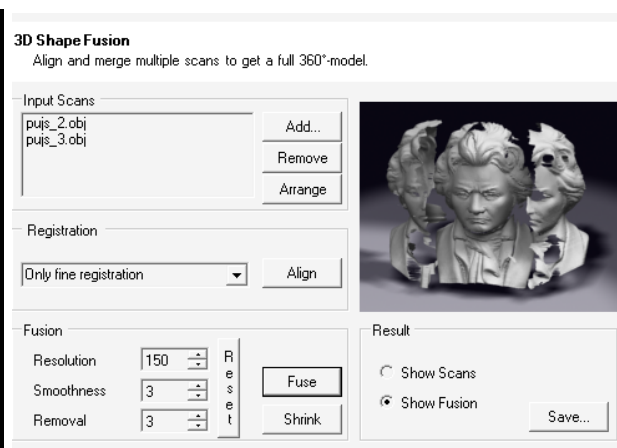
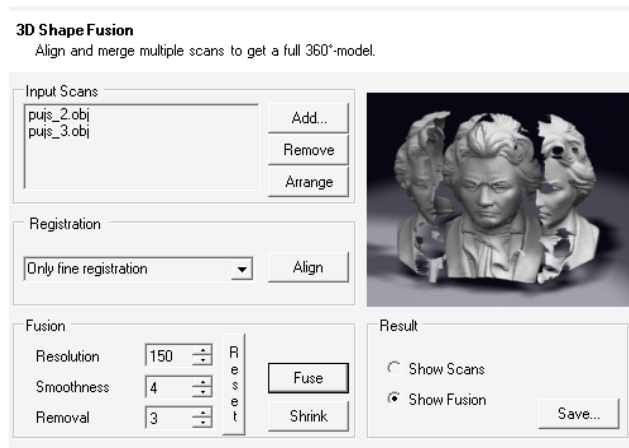
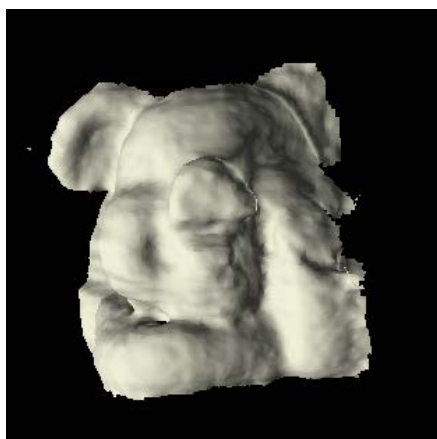
Na desni sliki je mogoče videti, katera dva skenograma sta bila združena, kakšna tehnika združevanja je bila narejena ter vrednosti ločljivosti, gladkosti ter možnost odstranjevanja odvečnih točk. Za združevanje je bila najprej uporabljena ročna, nato še fina registracija.

Znotraj programa je mogoče model skeniranja obračati. Spodnja leva slika prikazuje model skulpture s sprednje strani, na levi sliki vrednosti ločljivosti, gladkosti ter odstranjevanja točk. Poleg ločljivosti je bila spremenjena tudi vrednost gladkosti.

Naslednje slike prikazujejo izgled modela ob spreminjanju posameznih vrednosti ločljivosti, gladkosti ter odstranjevanja točk:

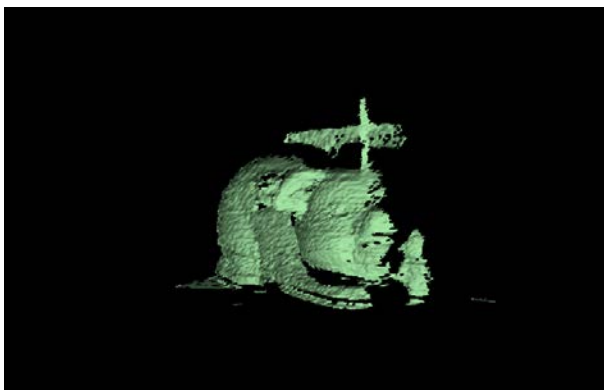




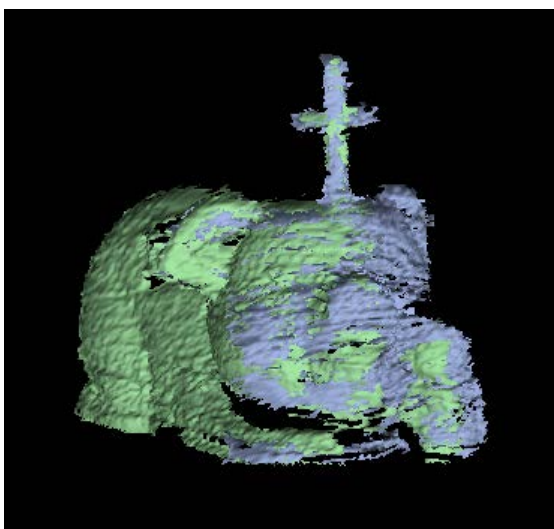


Primer združevanja skenogramov v celoto sem naredila tudi s pomočjo oslonilne točke, katero sem pritrdila na površino skeniranega objekta. Rezultati, pridobljeni s pomočjo oslonilne točke so prikazani v nadaljevanju.

Najprej je prikazan skenogram desne strani, kjer se lepo vidi oslonilna točka v obliki križa. Drugi skenogram prikazuje skenirano površino sprednjega dela skulpture, zadnja slika pa prikazuje združitev obeh skenogramov:

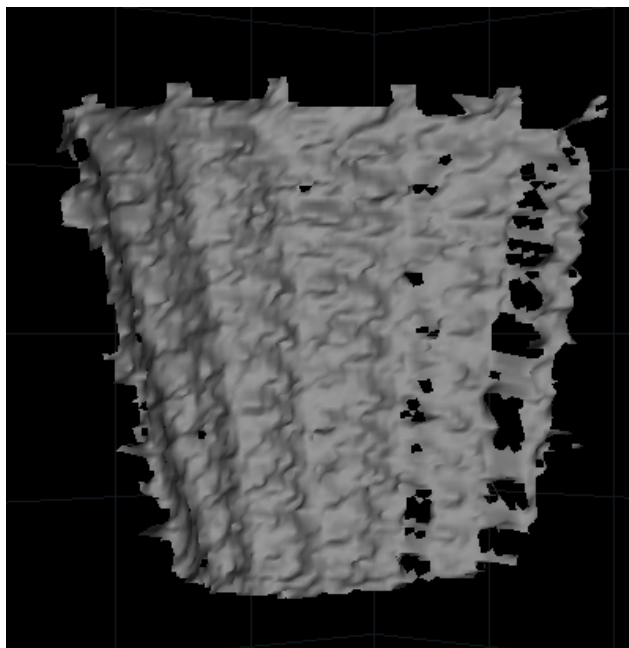


3D model predmeta, pridobljen s pomočjo dveh skenogramov, ki sta združena na osnovi oslonilne točke prikazuje spodnja slika:

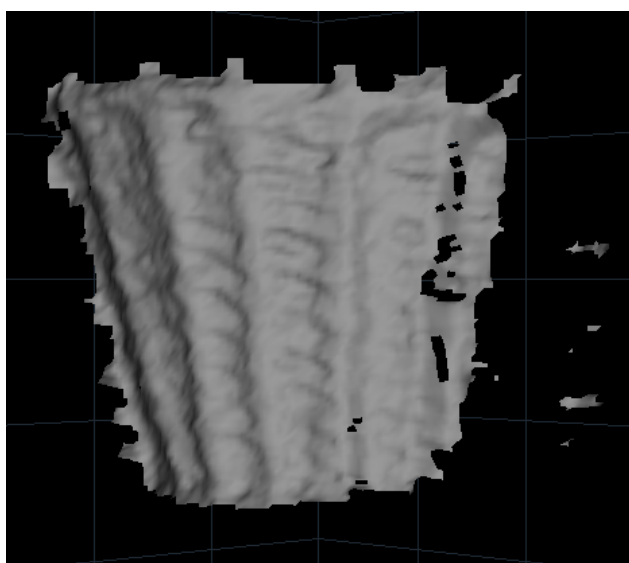


## Priloga C: Vmesni rezultati skeniranja okrasnega koša

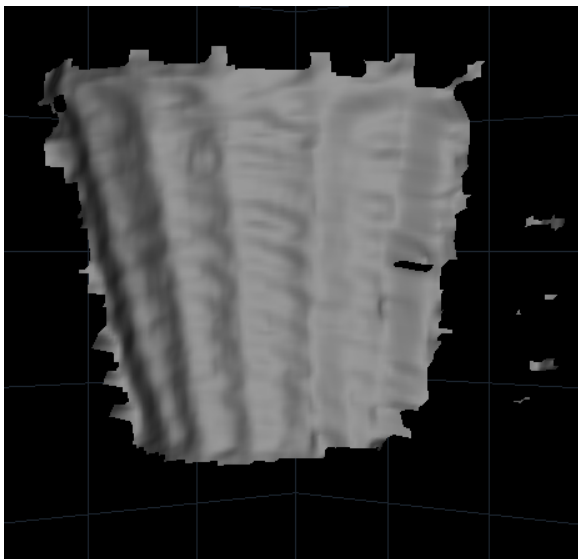
Tukaj so predstavljeni skenogrami, na katerih so bile izvedene interpolacija, glajenje linij ter povprečenja. Prva slika prikazuje interpolacijo skenograma predmeta:



Po izvedeni interpolaciji ter glajenja linij skenirani predmet izgleda tako:



Slika interpolacije ter povprečenje je:

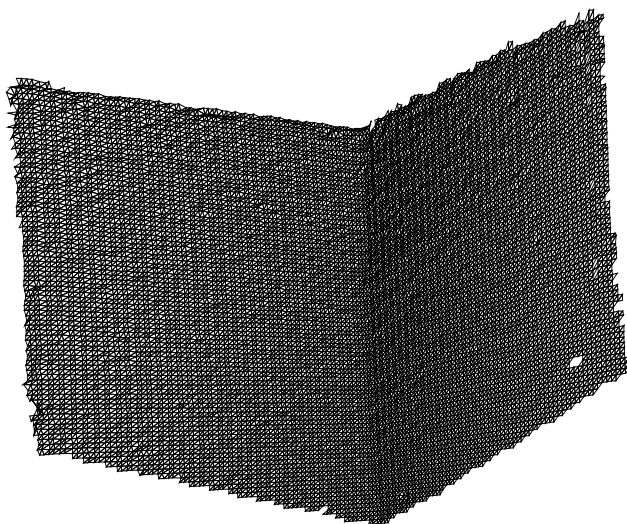


Tudi v primeru skeniranja okrasnega koša so rezultati podobni kakor pri skeniranju skulpture. Skenogrami lepo prikazujejo zgrabo predmeta, predvsem je struktura zelo dobro vidna v primeru interpolacije ter povprečenje. Tudi prvi in drugi skenogram nazorno prikazujeta strukturo, le a je v tretjem primeru na skenogramu manjše število ovehnik točk in območij brez točk.

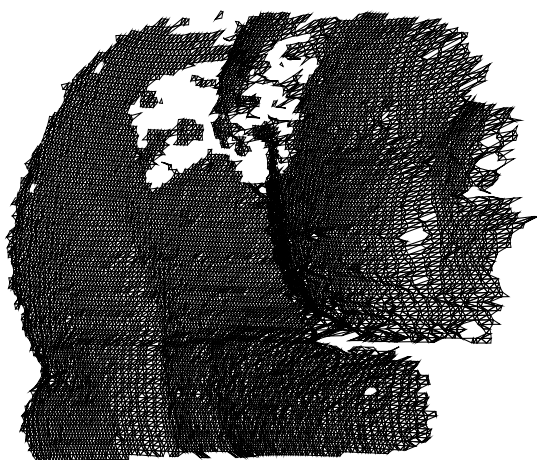
## Priloga D: Uvoz skenogramov v programski paket AutoCad.

V nadaljevanju so prikazani še isti primeri, ki sem jih uvozila v program AutoCad s pomočjo dodatka za uvoz formata \*.obj. Pri uvozu v program se lepo vidi, da so skenogrami zgrajeni iz mreže trikotnikov. Točke, ki jih pridobimo kot rezultat skeniranja v oblaku točk namreč med seboj tvorijo mrežo trikotnikov.

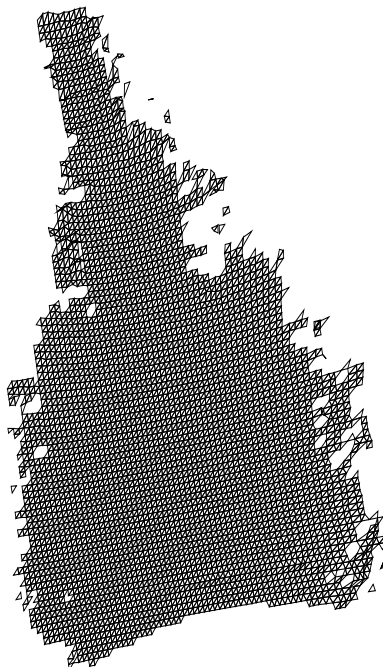
Mreža točk v AutoCadu po uvozu skenograma škatle:



Mreža točk v AutoCadu po uvozu skenograma skulpture:

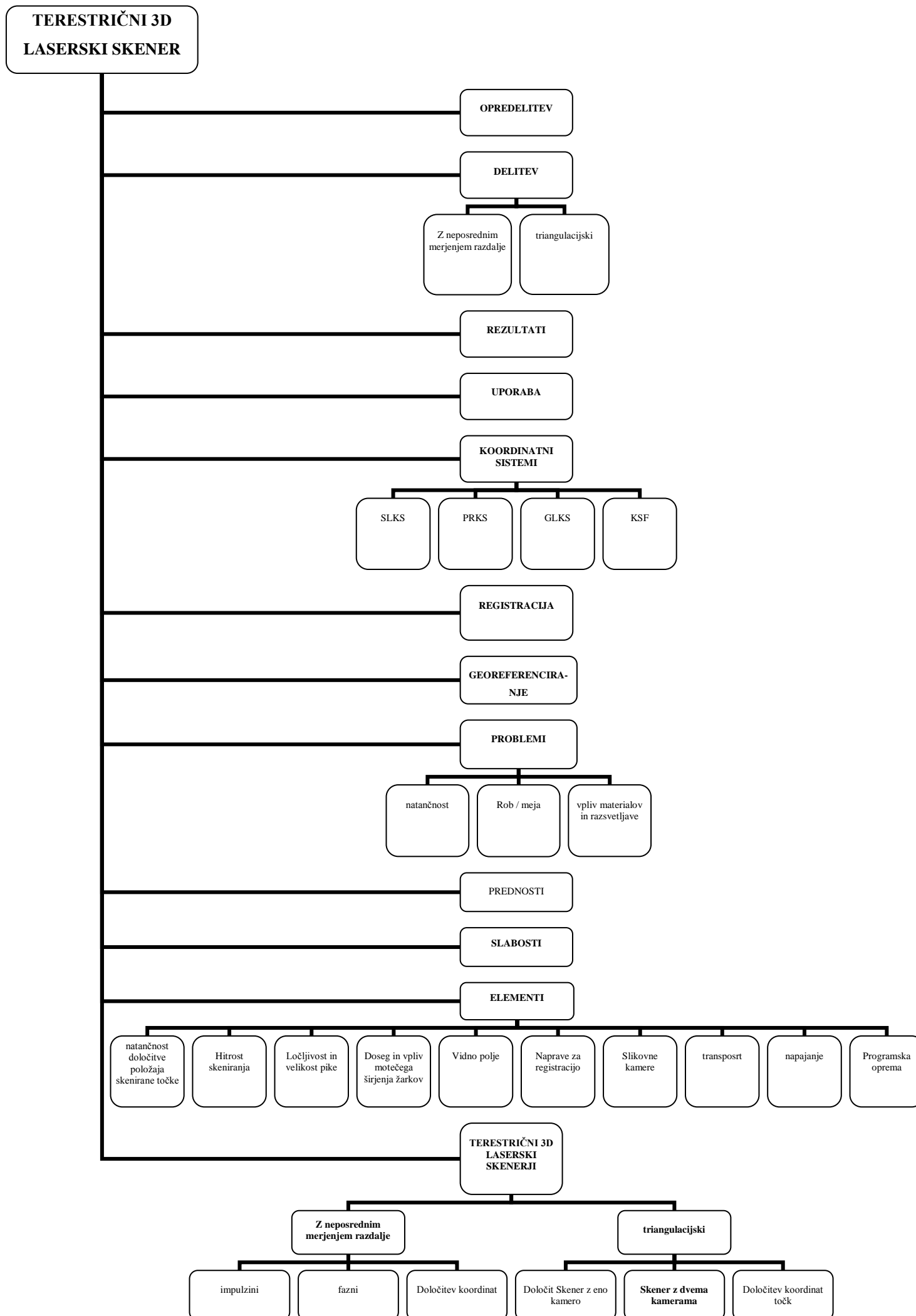


Mreža točk v AutoCadu po uvozu skenograma hruške:





# Priloga E: Diagram značilnosti 3D laserskega skeniranja





# Priloga F: Diagram uporabe programskega paketa DAVID

