

DIY 3D-skannausratkaisujen vertailu

Miika Kekkinen



Tekijä(t) Miika Kekkinen	
Koulutusohjelma Tietojenkäsittelyn koulutusohjelma	
Opinnäytetyön otsikko DIY 3D-skannausratkaisujen vertailu	Sivu- ja liitesivumäärä 66+27
Opinnäytetyön otsikko englanniksi Comparing DIY 3D-scanning solutions	
<p>Opinnäytetyön tarkoituksena on tutustua 3D-skannaukseen, erilaisten 3D-skannausratkaisujen soveltuvuuteen DIY (do it yourself) tyyppiin ratkaisuihin ja toteuttaa Haaga-Helian 3D- ja robotiikka laboratorioon toimivia edullisia 3D-skannereita vertailua varten. Projektissa suoritettua vertailua keskitytään pääasiallisesti skannereiden skannaustulosten tarkkuuteen sekä skannereiden käytettävyyteen. Toteutetut 3D-skannerit perustuvat valmiisiin DIY tyyppiin ratkaisuihin ja toimivat valmiilla ilmaisilla skannausohjelmistoilla.</p> <p>Työn teoriaosuudessa käydään yleisesti läpi 3D-skannausmenetelmiä ja niiden teoriaa. Samalla pohditaan erilaisten menetelmien soveltuvuutta DIY tyyppiin skannausratkaisuihin.</p> <p>Projektin käytännön osiossa vertaillaan fotogrammetrisia ja laser-kolmiomittaukseen perustuvia menetelmiä, jotka valittiin toteutettaviksi 3D-skannausratkaisuiksi teoriaosuuden aikana. Fotogrammetrinen skanneri oli prototyyppitasolla jo olemassa työn alkaessa. Yksi työn tavoitteista oli parantaa kyseisen prototyypin toimintaa ennen vertailua. Fotogrammetrisella skannerilla testataan kolmea erilaista skannausohjelmistoa (123Dcatch, Memento ja VisualSFM). Laser skannerilla puolestaan vain yhtä ohjelmistoa (Horus).</p> <p>3D-skannereiden vertailussa käytettiin kolmea toisistaan monimutkaisuudeltaan eriävää skannauskohdetta, jotka aiheuttivat yllättävän paljon ongelmia käytetyille skannausratkaisuille. Ongelmat johtuivat pääosin käytettyjen skannauskohteiden ominaisuuksista. Heijastavat pinnat ja monimutkaiset pinnat tuottivat eniten ongelmia. Molemmat ratkaisut kuitenkin tuottivat lopulta vaikeuksista huolimatta suhteellisen hyviä tuloksia vertailua varten.</p> <p>Työn liitteissä on myös runsaasti skannereiden käyttöön liittyvää dokumentaatiota, jotta skannereiden käyttö ja jatkokehitys olisi laboratorioissa mahdollista.</p>	
Asiasanat 3D-skannaus, fotogrammetria, kolmiomittaus, tee-se-itse skannaus	

Author(s) Miika Kekkinen	
Degree programme Business Information technology	
Report/thesis title Comparing DIY 3D-scanning solutions	Number of pages and appendix pages 66+27
<p>The purpose of this thesis is to explore the possibilities of different 3D-scanning methods, their suitability for DIY (do-it-yourself) solutions and to create functional inexpensive 3D-scanners for Haaga-Helia 3D- and robotics lab for comparison. In the analysis carried out in this thesis, the main focus is primarily on the accuracy and the usability of the created scanners. The scanners are based on available DIY scanner solutions and are working with free 3D-scanning software.</p> <p>The theoretical part of this thesis consists of different scanning methods, their theory and thoughts about their suitability as DIY solutions.</p> <p>The empirical part of the thesis focuses on the comparison of photogrammetric and laser triangulation based 3D-scanning methods, which were chosen during the theoretical part as feasible solutions. A prototype of the photogrammetric scanner already existed in the beginning of the project and one of the main goals was to improve its functionality before the comparison. There were three 3D-scanning software tested with the photogrammetric scanner (123Dcatch, Memento and VisualSFM) and only one (Horus) for the laser scanner.</p> <p>Three distinct objects of varying complexity were used in the 3D-scanning comparison, which caused a surprising amount of problems for the tested scanning solutions. The problems were mostly caused by the features and the quality of the objects. Reflective and complex surfaces caused the most problems. However, in the end both of the 3D-scanning solutions produced relatively good results for the comparative analysis.</p> <p>In the attachments of this thesis there is a lot of documentation regarding the use of the implemented scanners to facilitate the use and development of the scanners.</p>	
Keywords 3D-scanning, photogrammetry, triangulation, do-it-yourself scanning	

Sisällys

1	Johdanto	1
1.1	Työn tavoite	1
1.2	Käsitteitä	1
2	3D-skannaus	2
2.1	3D-skannauksen lyhyt historia.....	2
2.2	Mitä on 3D-skannaus ja kuinka se toimii?	3
2.3	3D-skannaus menetelmät	5
2.3.1	Koskettavat skannerit.....	5
2.3.2	Ei-koskettavat skannerit	6
2.4	Käyttökohteet ja sovellutukset.....	11
3	DIY 3D-skanneri ratkaisujen vertailu	15
3.1	Projektin tavoite	15
3.2	Menetelmät	15
3.3	Projektin tulosten hypoteesi	17
3.4	Toteutetut 3D-skannerit.....	18
3.5	Fotogrammetrinen skanneri	19
3.5.1	Alkuperäinen rakenne ja toiminta	19
3.5.2	Kehitetty rakenne ja toiminta	21
3.5.3	Kuvausympäristön ja kameran asetusten optimointi	22
3.5.4	Kuvasarjan ottaminen.....	25
3.5.5	123Dcatch.....	29
3.5.6	Autodesk Memento	33
3.5.7	VisualSFM.....	37
3.5.8	Skannaustulokset ja ongelmatilanteet	44
3.5.9	Yhteenveto.....	45
3.6	Laserskanneri	46
3.6.1	Skannerin rakenne ja toiminta	47
3.6.2	Skannerin kokoonpano.....	48
3.6.3	Skannausympäristö ja skannerin kalibrointi.....	50
3.6.4	Horus	53
3.6.5	Skannerin käytettävyys	53
3.6.6	Skannaustulokset.....	54
3.6.7	Ongelmatilanteet	57
3.6.8	Yhteenveto.....	58
4	Pohdinta.....	59
4.1	Skannereiden vertailu	59
4.1.1	Kokoonpano.....	59
4.1.2	Käytettävyys.....	59

4.1.3	Skannaustulokset.....	61
4.2	Jatkokehitys	62
4.2.1	Fotogrammetrisen skannerin jatkokehitys	62
4.2.2	Laser skannerin jatkokehitys	64
4.3	Opinnäytetyöprosessi ja oma oppiminen	65
4.4	Lähteet.....	66
5	Liitteet	70
	Liite 1. Fotogrammetrisen 3D-skannerin käyttäminen.....	70
	Liite 2. Autodesk 123Dcatch, Autodesk Memento sekä VisualSFM 3D- skannausohjelmien käyttö	76
	Liite 3. Kuvaympäristön optimointi: valaistus ja kameran asetukset	88
	Liite 4. Kalibroinnin suoritus Horus ohjelmassa	93
	Liite 5. Skannauksen suoritus Horus –ohjelmassa ja 3D-mallin muodostaminen Meshlab:ssä.....	97

1 Johdanto

1.1 Työn tavoite

Opinnäytetyön tavoitteena ja tarkoituksena oli tutustua 3D-skannaukseen ja kartoittaa edullisia 3D-skannauksen DIY tyyppisiä ratkaisuja sekä kehittää Haaga-Helian 3D- ja robotiikka laboratorion jo olemassa olevia 3D-skannaus ratkaisuja. Tarkoituksena oli löytää tehokkaita ja halpoja 3D-skannausvaihtoehtoja laboratoriolle käytettäväksi 3D-skannaukseen tutustumista ja jatkokehitystä varten. Samalla saatiin edistettyä Haaga-Helian 3D-skannaus tilannetta tarjoamalla laboratorion käyttäjille toimivia 3D-skannausratkaisuja käytettäväksi ja inspiraation lähteeksi. Yhtenä työn tarkoituksena oli myös tuoda esille laboratorion tarjoamia mahdollisuuksia 3D-mallinnuksen, tulostuksen ja robotiikan saralla.

Projekti koostui kolmesta vaiheesta. Ensimmäinen vaihe oli tutustua 3D-skannauksen teoriaan ja mahdollisuuksiin, sekä käydä läpi erilaisia vaihtoehtoisia tapoja toteuttaa DIY mallisia 3D-skannausratkaisuja. Työn toisessa vaiheessa keskityttiin Haaga-Helian jo olemassa olevien 3D-skannausratkaisujen kehittämiseen. Tarkoituksena oli parantaa Haaga-Helian 3D-laboratoriossa sijaitsevan, Heikki Hietalan aloittaman, fotogrammetrisen skannerin toimintaa ja skannaustuloksia. Skannerin toiminnan kehittämisen jälkeen rakennettiin toinen 3D-skanneri tarkoituksena verrata erilaisten toteutettavissa olevien skanneriratkaisujen ominaisuuksia keskenään.

Työn aikana ei kehitetty uusia 3D-skannausratkaisuja tai ohjelmistoja, vaan keskityttiin jo olemassa olevien DIY-ratkaisujen testaukseen. Skannereiden rakenteet ovat pääosin itse suunniteltuja, mutta skannauksen suorittavat ohjelmistot ja laitteistot ovat malliensa mukaiset.

1.2 Käsitteitä

DIY-ratkaisu = do-it-yourself eli tee-se-itse ratkaisu

CAD = Computer aided design eli tietokoneavusteinen suunnittelu

Firmware = laiteohjelmisto, jonka tehtävänä on huolehtia laitteen perustoiminnoista

Binäärikuva = kuva jonka esittämiseen käytetään vain arvoja 1 ja 0

Blender = vapaan lähdekoodin ilmainen 3D-mallinnus ohjelma

Meshlab = 3D-pistepilvien ja mallien käsittely ohjelma

GitHub = versionhallintaa tarkoitettu verkkosivu, joka toimii maailman suurimpana lähdekoodi-verkkopalveluna

Arduino = Avoimeen laitteistoon perustuva mikrokontrolleri

Arduino IDE = mikrokontrolleri ohjelmiston tekoon ja lataukseen tarkoitettu vapaan lähdekoodin ohjelmisto

2 3D-skannaus

Tässä projektin osiossa käydään läpi hieman 3D-skannauksen historiaa, teoriaa ja menetelmiä empiirisen vertailututkimuksen tueksi. Työssä keskityimme pääosin DIY 3D-skannaukseen, joten tämän osion yhtenä tarkoituksena on tarkastella myös käsiteltyjen 3D-skannausmenetelmien soveltuvuutta DIY-projekteihin.

2.1 3D-skannauksen lyhyt historia

Ensimmäiset 3D-skannaus menetelmät kehitettiinkin 60-luvulla ja ne perustuivat pääosin valokuvaukseen. Nämä varhaiset optiset skannerit käyttivät projektoreita, kameraa sekä valoja tulosten saavuttamiseksi. Niiden toiminta oli hidasta eivätkä tulokset ylittäneet täydellisen kolmiulotteisen kuvan saavuttamiseen välineiden rajoituksien takia. Tästä huolimatta niitä voidaan sanoa maailman ensimmäisiksi optisiksi 3D-skannaus menetelmiksi. (1, Bernd Breuckmann).

Optinen 3D-skannaus perustuu pääosin kolmiomittaukseen, jonka juuret ulottuvat tuhansien vuosien taakse muinaisiin babylonialaisiin ja egyptiläisiin, joiden sanotaan olevan ensimmäisiä ihmisiä, jotka käyttivät kolmiomittausta. Nykyisen kolmiomittauksen periaate ja täten 3D-skannauksen vanhin periaate tulee kuitenkin Euklidin sekä Archimedeksen matemaattisista trigonometrian periaatteista. Myös jo 1600-luvulla alankomaalainen Snell von Rojen tutki optisen kolmiomittauksen saloja. Tästä huolimatta kolmiomittaukseen perustuvat 3D-skannerit näkivät päivänvalon vasta 1900-luvun lopussa vain muutamia vuosikymmeniä sitten. (1, Bernd Breuckmann).

80-luvulla optiikkaan perustuva 3D skannaus kehittyi käyttämään strukturoitua valoa, lasereita ja varjoja paremman kolmiulotteisen kuvan muodostamiseen. Varsinkin strukturoitua valoa käytettiin paljon arkeologiassa vanhojen esineiden kuvaamisessa. Suurin osa näistä menetelmistä kohtasi samoja rajoitteita kuin valokuvausmenetelmät, mutta laser skannauksesta kehittyi myöhemmin 1970-luvulla ensimmäinen optiikkaan perustuva tapa taltioida täydellisesti kokonainen kolmiulotteinen kappale. Muut optiset menetelmät eivät kyenneet taltioimaan kokonaista objektia sen jokaisesta suunnasta. Ennen laser skannereita tähän pystyttiin vain teollisuudessa käytetyillä mittavarrella toimivia kosketusskannereilla, joissa objektin skannaus tapahtui koskettamalla objektia ja

mittaamalla sen muotoa tarkoituksena löytää esimerkiksi tuotannossa syntyneitä virheitä ja epämuodostumia. (2, Olli Santaluoto, 2012).

1990-luvusta asti 3D-skannaus menetelmät ovat kehittyneet kovaa vauhtia. Menetelmät ovat pysyneet pääosin samankaltaisina, mutta niissä käytetyt laitteet ja ohjelmistot ovat kehittyneet valtavasti. Esimerkiksi useissa skanneri ratkaisuihin käytettyjen kameroiden tarkkuus on kasvanut merkittävästi. Tämä kehitys näkyy eniten skannereiden tuottaman kuvan tarkkuudessa ja skannerin kokoonpanon hinnassa.

Mikrokontrollerien kehityksen sekä halpojen elektroniikka osien saatavuuden kasvamisen ansiosta 3D-skannaus on siirtynyt kalliista ammattikäyttöön tarkoitetuista ratkaisuista jokaisen tekniikasta kiinnostuneen harrastelijan tavoitettavaksi. Vapaaseen lähdekoodiin perustuvia DIY-skanneriratkaisuja on viimeisen parin vuoden aikana ilmestynyt lukuisasti julkiseen verkkoon harrastelijoiden saatavaksi ja monet näistä on mahdollista rakentaa omassa kodissa suhteellisen edulliseen hintaan ja vähäisellä tietotaidolla.

2.2 Mitä on 3D-skannaus ja kuinka se toimii?

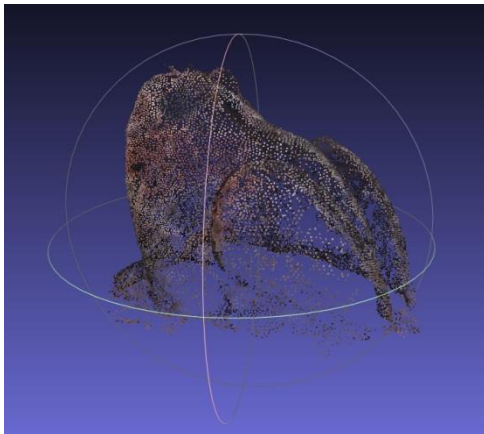
3D-skannausta kutsutaan yleisesti myös kolmiulotteiseksi digitalisoinniksi. Skannauksen tarkoituksena on tallentaa informaatiota skannattavista esineistä digitaaliseen muotoon. Sen pääperiaate on sama kuin missä tahansa muussa skannerissa: skanneri analysoi kohdetta ja tuottaa analyysin mukaan digitaalista informaatiota kohteesta. Digitaalinen informaatio tallennetaan tämän jälkeen esimerkiksi tietokoneelle, joka prosessoi informaation ja luo sen pohjalta esimerkiksi kopion skannatusta kohteesta. (3, Sakshat Virtual Labs).

3D-skanneri on siis laite, jonka tarkoituksena on analysoida kohdetta ja tuottaa dataa sen muodosta ja mitoista. Kerätyn datan avulla kohteesta voidaan luoda kolmiulotteinen malli jatkokäsittelyä varten. Mallin muodostaminen vaatii useimmiten tähän tarkoitukseen suunnitellun erillisen ohjelman (Blender, MeshLab), mutta joissakin 3D-skannereiden ohjelmistoissa mallin rakentaminen saattaa olla jo olemassa vakiona. Jatkokäsittelystä hyvänä esimerkkinä toimivat yhä yleistyvät 3D-tulostimet, joilla voidaan kopioida skannattuja esineitä. 3D-skannerin avulla voidaan siis tuottaa tulostettavia kolmiulotteisia kopioita erilaisista esineistä.

Toiminnaltaan useimmat 3D-skannerit muistuttavat hyvin pitkälti kameraa ja monet nykyisetkin skannerit toimivat pitkälti kameran avustuksella. (2, Olli Santaluoto 2012). Kameroiden toiminta perustuu kohteiden väri-informaation keruuseen näkökentällään, kun

taas 3D-skanneri keskittyy pintojen etäisyyksien laskelmoimiseen. Tästä syystä 3D-skannerit kohtaavat samoja rajoitteita kuin kameratkin; vain laitteen näkökentällä olevat asiat tulevat skannatuksi ja täydellisen kolmiulotteisen skannauksen suorittaminen vaatii useimmiten useampia skannauksia eri suunnista.

Skannauksen aikana kohteen muodon ja mittojen tallennus tapahtuu x-, z-, y-koordinaatistoa hyödyntäen. Skanneri analysoi kohteen muodon kordinaatiston pisteinä ja muodostaa tästä informaatiosta kattavan lukemattomien koordinaattipisteiden muodostaman pistepilven. Tämä pistepilvi muodostaa kolmiulotteisen mallin skannatusta objektista x-, z-, y-koordinaatistoon. Pistepilvi on tyypillisesti ASCII tekstiformaatissa ja muodostaa tekstitiedostomuotoisen listauksen kaikista pistepilven pisteiden koordinaateista. Pistepilvi ei ole kuitenkaan valmis kolmiulotteinen malli skannatusta kohteesta ja pistepilven pisteet tulee yhdistää mallin muodostamiseksi. Tätä prosessia kutsutaan rekonstruktioksi ja se tapahtuu useimmiten yhdistämällä pistepilven pisteet toisiinsa ennustamalla skannatun objektin muotoa koordinaattipisteiden mukaan. (4, Bernardini ja Rushmeier 2002). Kun skannerin muodostama pistepilvi tallennetaan, muodostetaan siitä esimerkiksi OBJ (Wavefront), PLY (Polygon file format) tai STL (STereolithography) tiedosto, jota voidaan hyödyntää jatkotoimenpiteissä tulosten hiomisessa tai esimerkiksi 3D-tulostamisessa.



Kuva 1. pistepilvi Meshlab ohjelmassa

Toisinaan skannaustulokset vaativat useamman kuin yhden skannauskerran, sillä skannattava kohde on taltioitava jokaiselta puolelta täyden kolmiulotteisen mallin muodostamiseksi. Joissakin menetelmissä kerta skannaus riittää, jos kohdetta tai optiikkaa saadaan kierrettyä kohteen ympäri skannauksen aikana. Useimmiten 3D-skannaus vaatii myös jälkikäsitteilyä skannaustulosten siistimiseksi. Tämä tapahtuu useimmiten käsin 3D-mallien muokkaukseen tarkoitetuilla ohjelmistoilla, kuten Meshlab tai Blender.

3D-skannereita voidaan hyödyntää monella tapaa ja esimerkkejä mahdollisista käyttökohteista ovat laadunvarmistu, takaismallinnus (reverse engineering), historiallisten esineiden sekä rakenteiden dokumentointi ja jäljentäminen, esineiden monistaminen sekä valumuottien rakentaminen. DIY-mallisissa ratkaisuissa 3D-skanneria voidaan hyödyntää esineiden nopeassa mallintamisessa esimerkiksi 3D-tulostusta varten.

2.3 3D-skannaus menetelmät

Erilaisia 3D skannausmenetelmiä on olemassa lukuisia, mutta ne voidaan karkeasti jakaa kahteen pääryhmään: koskettaviin eli kontakti skannereihin sekä ei-koskettaviin eli kontaktittomiin skannereihin toimintaperiaatteidensa mukaan. (2, Olli Santaluoto 2012). Seuraavassa osiossa käymme läpi erilaisia näihin kahteen pääryhmään kuuluvia 3D-skannausmenetelmiä sekä niiden toiminta periaatteita ja teoriaa.

2.3.1 Koskettavat skannerit

Kosketus menetelmällä toimivat skannerit suorittavat skannauksen fyysisen kontaktin avulla. Nimensä mukaisesti nämä laitteet mittaavat kohdetta koskettamalla sitä esimerkiksi mittavartensa päädyssä sijaitsevalla anturilla. Anturi pitää kirjaa kulkemansa reitin koordinaateista ja syöttää tämän informaation tietokoneelle pistepilven määrittämiseksi. (5, Eetu Siitonen 2011).

Yksinkertaimmillaan kontaktiskanneri koostuu tasosta, mittavarresta sekä anturista. Skannattava kohde on kiinnitettyä tasoon ja mittavarsi kontroloi anturin liikkeitä x-, y- ja z- suunnissa. Joissakin tapauksissa, varsinkin monimutkaisten muotojen skannauksessa, laitteen mittavarressa voi olla useampia niveliä, jotka mahdollistavat anturin liikkumisen vaikeampiinkin pinnanmuotoihin. (6, Tommi Rämö).

Kontaktiskannerit ovat usein hyvin tarkkoja ja voivat yltää parhaimmillaan jopa mikrometrin tarkkuuteen skannaustuloksissaan (7, Kennedy Smith 2002). Menetelmän luonteen ja tarkkuuden takia kontaktiskannerit vaativat usein monimutkaisia matemaattisia laskentoja anturin koordinaattien selvittämiseksi. Skannerin mittavarsi voi esimerkiksi koostua useista varsista, jotka ovat liitettyä toisiinsa pyörivien nivelien avulla. Tällöin skannauksen suorittavan ohjelman on pystyttävä laskemaan tarkasti jokaisen varren sekä nivelen tarkka liikerata anturin kulkureitin selvittämiseksi. (8, Coord3 Company 2012).

Tarkkuutensa takia kontakti skannereita käytetään esimerkiksi usein teollisuudessa valmistettujen tuotteiden sekä osien analysoinnissa. Skannattua tuotetta voidaan verrata

täydelliseen tietokonemalliin mahdollisten valmistusvirheiden määrittämiseksi. Näitä laitteita kutsutaan CMM (coordinate measuring machine) koneiksi. (8, Coord3 Company 2012).

Fyysisen kosketuksen avulla toimivilla skannereilla on kuitenkin myös haittapuolensa. Skannattavien kohteiden analysointi kosketuksella on hidasta muihin menetelmiin verrattuna ja pahimmissa tapauksissa se saattaa vahingoittaa tai muuttaa analysoitavan kohteen muotoja, mikä voi vaikuttaa suoraan skannaustulokseen tai vääristää etsittyjä tuloksia. (5, Eetu Siitonen 2011). Kontaktiskannerit eivät myöskään sovellu toimintatapansa takia liian monimutkaisten pintojen skannaukseen, sillä kosketusanturi ei pysty täydellisesti analysoimaan monimutkaisia pintatekstuureja ja esimerkiksi aukkojen analysointi on kontaktiskannerilla hankalaa.

Projektimme näkökulmasta kontaktiskannerit eivät sovellu hyvin DIY-ratkaisuksi raskaan rakenteensa ja runsaan robotiikansa takia. Tarkan skannerin rakentaminen olisi todennäköisesti kallista ja vaatisi runsasta tuntemusta robotiikasta ja matematiikasta. Vaikka suurin osa kontaktiskanneriratkaisuista perustuvat automaatisoituun robotiikkaan, on myös mahdollista rakentaa manuaalisesti liikutettava anturi. Yksinkertainen käsin operoitava kontaktiskanneri ei varmastikkaan ylittäisi tavoiteltuun skannaustarkkuuteen.

Espanjalainen Javier Martinez rakensi yksinkertaisen DIY kontaktiskannerin Arduino nanoa, metalliromua sekä FreeCAD –ohjelmaa hyödyntäen. Skannerissa on käsin liikuteltava yksinkertainen anturi, jota kuljetetaan skannattavan kohteen pinnalla pistepilven määrittämiseksi. (20, Javier Martinez 2014).

2.3.2 Ei-koskettavat skannerit

Kontaktittomat 3D skannerit ovat useimmiten optiikkaa hyödyntäviä skannereita, jotka toimivat kameroiden sekä valon tai muun säteilyn avulla. Skannerit vastaanottavat säteilyä skannattavasta kohteesta optiikkansa avulla ja käyttävät tätä informaatiota pistepilven määrittämiseksi.

Aivan kuten 3D-skannerit yleisesti, myös kontaktittomat skannerit voidaan jakaa kahteen eri luokkaan toimintaperiaatteidensa mukaisesti. Nämä kaksi luokkaa ovat aktiiviset sekä passiiviset kontaktittomat skannerit. (5, Eetu Siitonen 2011).

Passiiviset menetelmät

Passiiviset skannerit eivät pääasiallisesti itse lähetä säteilyä skannattavaa kohdetta kohti. Niiden toiminta perustuu kohdetta ympäröivän säteilyn heijastumisen vastaanottamiseen. Säteily voi olla esimerkiksi valoa tai infrapuna säteilyä. Toimintaperiaate on siis lähes sama kuin tavallisissa kameroissa. Tästä syystä ylivoimaisesti yleisin passiivinen skannausmenetelmä onkin fotogrammetria, jossa tarkoituksena on kuvata skannattavaa kohdetta useasti jokaisesta kulmasta ja lopuksi yhdistää kuvat yhdeksi kolmiulotteiseksi kokonaisuudeksi. Yhdistäminen tapahtuu täysin ohjelmistopohjaisesti ja tästä syystä fotogrammetria on yksinkertainen ja suhteellisen halpa tapa suorittaa 3D skannausta. (6, Tommi Rämö 2010).

Skannauksessa käytetään yhtä tai useampaa kameraa sekä tietokoneelle asennettua ohjelmaa. Useaa kameraa käyttäessä skannaus tapahtuu nopeasti, sillä yhden kameran ei tarvitse ottaa useampaa kuvaa kohteesta. Skannaus onnistuu myös yhden kameran avulla, mutta tällöin prosessi hidastuu huomattavasti, sillä kameraa on liikutettava skannattavan kohteen ympärillä ja pahimmillaan hyvä laatuinen skannaus voi vaatia satoja kuvia yhdestä kohteesta.

Fotogrammetrinen menetelmä on myös hyvin riippuvainen käytettyjen välineiden laadusta sekä kuvauspaikan valaistuksesta. Liian pimeässä, valoisassa tai alati muuttuvassa valaistuksessa skannauksen lopputulos kärsii, sillä kuvia tulkitseva ohjelmisto määrittää kappaleen tasojen ja pisteiden paikat kolmiulotteisessa koordinaatistossa kappaleen sävyerojen avulla. Myös kuvien yhdistäminen tapahtuu etsimällä ja korreloimalla yhteneviä piirteitä kuvista ja vaihteleva valaistus voi johtaa ei-toivottuihin tuloksiin. Tasainen muuttumaton valaistus on siis ideaalia fotogrammetriseen skannaukseen. (5, Eetu Siitonen 2011).

DIY-ratkaisuna passiiviset 3D-skannausmenetelmät ovat erinomaisia. Niiden toteuttaminen on helppoa ja suhteellisen halpaa, vaikka skannauksen laatu riippuukin hyvin paljon käytetyn kameran laadusta. Haaga Helian 3D- ja robotiikka laboratoriossa onkin jo valmiiksi fotogrammetriaan perustuva 3D-skanneriprototyyppi, johon tutustumme tarkemmin työn empiirisessä 3D-skanneriratkaisujen vertailuosiossa.

Toinen kameroita hyödyntävä passiivinen menetelmä on stereoskooppinen skannaus. Stereoskooppisessa skannauksessa käytetään kahta toisistaan erillään olevaa kameraa kuvaamaan samaa kohdetta. Otettuja kuvia verrataan toisiinsa ja niiden eroavaisuuksia käytetään kohteen pisteiden etäisyyksien määrittämiseksi. (6, Tommi Rämö 2010). Toiminnaltaan tämä muistuttaa pitkälti ihmisen näön toimintaa. Silmät "kuvaavat"

ympäristöä kahden lähekkäin sijaitsevan linssin kautta ja lähettävät nämä toisistaan hieman eriävät kuvat aivoihin, joissa kuvat yhdistyvät yhdeksi selkeäksi kuvaksi.

Aktiiviset menetelmät

Aktiivisten 3D-skannerien toiminta perustuu puolestaan säteilyn lähettämiseen skannattavaa kohdetta kohti ja sen takaisinheijastuman tunnistamiseen. Lähetettävänä säteilynä käytetään useimmiten valoa, mutta muita mahdollisia vaihtoehtoja ovat muun muassa ultraäänit sekä röntgen säteet. Tässä työssä keskitymme kuitenkin pääosin strukturoidun valon ja laserien avulla toimiviin menetelmiin.

Strukturoitu Valo

Tämän tyyppiset 3D-skannerit lähettävät erilaisia valokuvioita skannattavaa kohdetta kohti ja tulkitsevat kuvioiden muodon vääristymiä sen osuessa skannattavaan kohteeseen. Kuvioina käytetään useimmiten vaaka tai pystysuuntaisia mustavalkoisia raitoja. Myös visuaalisia binäärikuvia voidaan käyttää kohteen muotojen määrittämiseen. Kohteen takana voi olla myös tasainen pystysuuntainen taso, jonka tarkoituksena on eristää skannattava kohde ympäristöstä tarjoamalla tasainen vääristymätön pinta heijastetulle kuviolle. Kuvioiden heijastamiseen käytetään usein jonkinlaista projektorista sen helppokäyttöisyyden ja valon tasaisuuden takia. Heijastumien tallentamiseen käytetään yhtä tai kahta kameraa, joiden tehtävänä on määrittää kuvioiden vääristymien geometriset sijainnit alkuperäiseen kuvioon verrattuna. Kamerat muodostavat valonlähteen sekä kohteen kanssa trigonometrisen kulman, jota skannerin ohjelmisto käyttää kohteen sekä kameran välisen etäisyyden laskemiseen. Tämä mahdollistaa heijastettujen kuvioiden vääristymien muuntamisen kolmiulotteisen koordinaatiston pisteiksi erilaisten matemaattisten algoritmien avulla. (9, Fechteler, Eisert ja Rurainsky).

Srukturoidun valon menetelmässä skanneri kykenee analysoimaan koko näkökenttensä yhdellä kerralla, mikä tuottaa nopeita ja tarkkoja skannaustuloksia ja nopeutensa takia tällä menetelmällä on jopa mahdollista skannata liikkuvia kohteita reaaliajassa.

Menetelmällä on kuitenkin myös varjopuolensa. Kuten muutkin 3D-skannausratkaisut, varsinkin yksinkertaisimmat projektoriin sekä kameraan perustuvat ratkaisut vaativat tarkkaa kalibrointia ja virheellinen kalibrointi johtaa helposti huonoihin tuloksiin. Kalibrointi tapahtuu useimmiten taustatasolle asetettavan ruudukkokuvioiden avulla. Myös skannattavan kohteen pinnan kyky heijastaa kirkasta valoa vaikuttaa skannaustuloksiin. Epätasainen ja kiiltävä pinta voi esimerkiksi tehdä skannauksesta hankalaa. Eritoten

läpinäkyvät pinnat kuten lasi aiheuttavat vaikeuksia tulosten saamiseksi, sillä valo pääsee heijastumaan läpinäkyvästä pinnasta holtittomasti useaan suuntaan. Skannattavat kohteet voivatkin siksi joskus vaatia käsittelyä ennen itse skannaus prosessia. Vaalea tasainen mattapinta on esimerkiksi oivallinen hyvän skannauksen suorittamiseen. (9, Fechteler, Eisert ja Rurainsky).

DIY näkökulmasta strukturoitu valo on hyvä 3D-skannaus vaihtoehto nopeutensa sekä yksinkertaisuutensa takia. Tämä menetelmä voi kuitenkin käydä kalliiksi, sillä valon heijastamiseen vaadittavat projektorit ovat useimmiten hyvinkin kalliita eivätkä halvemmat ratkaisut yllä tuloksissaan täysin ammattilaisvälineiden tasolle. Varsinkin liikkuvan kohteen ikuistaminen tuottaa suuria ongelmia, joten DIY-ratkaisuissa on keskityttävä liikkumattomien kohteiden skannaamiseen. Tämä oli yksi vartenotettavista mahdollisesti työssä toteutettavista 3D-skannaus ratkaisuista, mutta projektorin hankinta ei loppujen lopuksi onnistunut.

Strukturoidun valon avulla suoritettavaa 3D-skannausta voidaan tehdä myös infrapunavalon avulla. Tästä hyvänä esimerkkinä Microsoftin kehittämä Kinect sensori, jota on myös käytetty muutamien DIY-projektien apuna. Kinect sensori koostuu RGB kamerasta sekä infrapunaprojektorista, joka lähettää eteensä tarkkaa infrapunakuviota. Tämä kuvio koostuu useista tasaisin väliajoin sijaitsevista pisteistä, joiden heijastumien avulla Kinectin infrapunasäteitä vastaanottava kamera kykenee laskemaan heijastuvien pisteiden etäisyydet sensorista. Koska infrapunasäteiden jakauma on kartioimainen, voidaan pisteiden etäisyyksistä päätellä kuinka lähellä toisiaan tasot ovat kamerasta. Lähellä olevat tasot näyttävä luonnollisesti tiiviimpää pistekuviota kuin kaukana olevat. Sensori on siis käytännössä projektori sekä kamera yhdessä paketissa eikä skannerin rakentaminen oikeastaan vaadi muuta kuin oikeanlaisen ohjelmiston toimiakseen. (10, Boris Landomi 2015).

Yhtenä etuna tässä ratkaisussa on se, ettei valaistus vaikuta skannauksen tuloksiin millään tavalla, sillä skannaus tapahtuu laitteen itse lähettämän infrapunavalon avulla. Tämäkin oli yksi testaamisen arvoinen DIY-ratkaisu, mutta testaus jäi ajatustasolle Kinect sensorin puutteen vuoksi.

Laser skannaus –menetelmät

Mahdollisesti ehkä suosituin 3D-skannausmenetelmä on laserskannaus. Tässä aktiivisessa menetelmässä kohteen analysointi tapahtuu nimensä mukaisesti yhden tai useamman laserin avustuksella. Lasersäteet kohdistetaan skannattavaa kohdetta kohden,

jonka jälkeen skannerin sensori vastaanottaa heijastuvat valonsäteet ja laskee kohteen pisteiden paikat kolmiulotteisessa koordinaatistossa. Tämä menetelmä voidaan myös jakaa karkeasti kahteen eri luokkaan niissä käytettyjen mittausten menetelmien mukaan. Mittausmenetelmät ovat valon kulkuaikaan perustuva menetelmä (TOF eli time of flight) sekä kolmiomittausmenetelmä.

TOF eli valon kulkuaikaan perustuvissa skannareissa heijastumia vastaanottavana sensorina käytetään etäisyysmittaria. Skanneri lähettää laser pulsseja kohdetta kohti, mitkä heijastuvat takaisin laitteen etäisyysmittariin. Koska laserpulssi on valoa ja valon nopeus on tunnettu vakio, on heijastuspintojen etäisyys sensorista mahdollista määrittää vaivattomasti. Seuraavaksi saadut arvot muunnetaan pistepilveksi, josta skannatun kohteen kolmiulotteinen malli muodostuu. TOF skannaus on myös hidasta muihin menetelmiin verrattuna, sillä voidaan mitata yksittäisten pisteiden etäisyyksiä skannerin on käytävä lävitse koko skannattava alue piste kerrallaan. Tämä voi tapahtua joko sensoria mekaanisesti kääntämällä tai peilien avulla. Peilien käyttö on useimmiten tarkempaa ja nopeampaa, sillä kevyitä peilejä on helpompi siirrellä kuin itse sensoria. Näin etäisyysmittarilla toimiva 3D-skanneri kykenee taltioimaan muutamia kymmeniä tuhansia pisteitä sekunnissa. (11, Yan Cui).

Valon suuren nopeuden takia laser säteen kulkeman matkan mittaaminen ei ole helppoa ja mittaustarkkuus voi olla muihin menetelmiin verrattuna alhainen; noin millimetrin luokkaa (11, Yan Cui). Tästä syystä etäisyysmittaukseen perustuvat skannerit eivät sovellu pienten tai hyvin yksityiskohtaisten esineiden skannaamiseen. Ne kykenevät kuitenkin analysoimaan kohteita jopa kilometrien alueella ja tästä syystä ne soveltuvat parhaiten kaupunkien ja maantieteellisten alueiden mittaamiseen.

Toinen etäisyysmittaukseen perustuva menetelmä on vaihe-eroon perustuva menetelmä. Vaihe-ero skannauksessa kohteeseen lähetetään jatkuvaa aaltosignaalia, jonka heijastuma mitataan vertaamalla lähetetyn sekä vastaanotetun signaalin vaihe-eroja. Etäisyysmittaukseen pulssien avulla vaihe-ero mittaaminen tuottaa tarkempaa ja virheettömämpää tulosta, mutta sen kantotaajuus on huomattavasti lyhyempi. (5, Eetu Siitonen 2011).

Etäisyysmittaukseen perustuvat 3D-skannerit ovat usein ammattikäyttöön tarkoitettuja suurehkoja laitteita, joita käytetään esimerkiksi maanmittauksessa sekä arkeologisten esineiden ja rakenteiden taltioinnissa. Tämän kaltaiset skannerit ovat DIY-ratkaisuna hankalasti toteutettavissa ja laserskannausmenetelmistä kolmiomittaus on tähän tarkoitukseen ehdottomasti sopivampi.

Kolmiomittaus menetelmä toimii lähestulkoon samalla tavalla kuin etäisyysmittarin avulla toimiva skanneri, mutta etäisyysmittarin sijaan valon heijastusta vastaanottavana sensorina käytetään kameraa. Laserin heijastuspisteiden etäisyydet ja sijainnit kolmiulotteisessa koordinaatistossa määritetään etäisyysmittarin sijaan kolmiomittauksella. Kamera, laserheijastus sekä laser valonlähde muodostavat kolmion, jolla on ainakin yksi tunnettu sivu (yleensä kohteen etäisyys kamerasta) sekä kulma. Kameran tehtävänä on katsoa skannattavasta kohteesta heijastuvia valopisteitä; heijastuksien etäisyyksistä riippuen ne näkyvät kameran näkökentällä eri kohdissa. Näiden tietojen sekä tarkan kalibroinnin avulla voidaan määrittää kunkin laserin heijastaman pisteen etäisyys ja sijainti koordinaatistossa pistepilven määrittämiseksi. (4, Eetu Siitonen 2011; 5, Tommi Rämö 2010).

Etäisyysmittaukseen verrattuna kolmiomittaus on huomattavasti nopeampi 3D-skannaus menetelmä. Yhden pisteen sijaan skanneri kykenee taltioimaan lukuisia pisteitä kerrallaan esimerkiksi useita linjalasereita hyödyntäen. Tarkkuus ei kuitenkaan ole aivan kosketuksella toimivien skannereiden tasoa, mutta pienellä jälkikäsitteilyllä varmasti riittävä. Skannerin etäisyys on kuitenkin maksimissaan muutamia metrejä ja tästä syystä se soveltuukin parhaiten pienien ja keskisuurien kohteiden skannaukseen.

DIY-ratkaisuin kolmiomittaukseen perustuvat skannerit ovat erinomaisia, sillä ne eivät vaadi juuri lainkaan kalliita erikois-osia. Yksi tai useampi laserosoitin, kamera sekä esimerkiksi mikrokontrolleri komponenttien ohjaamiseen riittää. Kolmiomittauksen avulla pistepilven laskeminen kameran kaappaamien heijastuksien avulla on suhteellisen yksinkertaista ja tästä syystä esimerkiksi vapaaseen lähdekoodiin perustuvia kolmiomittausmenetelmään perustuvia 3D-skannaus ohjelmistoja löytyy verkosta runsainmitoin. Yleisimmät ratkaisut sisältävät mikrokontrollerin (esim. Arduino), kaksi laserosoitinta, kameran sekä pyörivän tason moottoreineen. Tason avulla skannattavaa kohdetta pyöritetään akselinsa ympäri kokonaisvaltaisen skannauksen saamiseksi. Tämän kaltaisia DIY-skannereita ovat esimerkiksi Ciclops 3D, Atlas 3D sekä FabScan. Työssä toteutettiin Ciclops 3D-skanneriin perustuva ratkaisu.

2.4 Käyttökohteet ja sovellutukset

3D-skannereilla on lukuisia erilaisia käyttökohteita ja sovellutuksia mitä erilaisemmillä aloilla laadunvarmistuksesta museo-esineiden entisöintiin. Tässä osiossa käymme lävitse muutamia esimerkkejä 3D-skannauksen käyttökohteista.

Historian tutkimus

Varsinkin arkeologiassa 3D-skannauksella on tärkeä tehtävä muinaisten esineiden ja rakenteiden tutkimuksen avustuksessa. 3D-skannaus mahdollistaa esimerkiksi hauraiden ja hajoamispisteessä olevien esineiden tutkimisen ilman rikkoutumisen riskiä. Myös esimerkiksi suurien rakenteiden tarkempi tutkiminen etänä on mahdollista skannausten ansiosta, sillä digisoitu kohde voidaan lähettää sähköisesti ympäri maapalloa yksityiskohtia ja kolmiulotteisuutta menettämättä. Tietokoneella esineiden ja rakenteiden tutkiminen on riskitöntä ja vaivatonta. (2, Olli Santaluoto 2012).

3D-skannausta voidaan hyödyntää myös yhdessä 3D-tulostuksen kanssa. Näiden menetelmien avulla esineitä voidaan esimerkiksi korjata entisöinnissä tai kopioida hauraita esineitä esimerkiksi museokäyttöön. Skannaus ja tulostus on prosessina nopeampi ja halvempi kuin perinteinen valanta ja niiden hyödyt tulevat esille etenkin esineiden kanssa, jotka saattavat hajota ajan myötä. (13, Arto Mannila 2014).

Historiallisen tutkimuksen saralla käytetyt 3D-skannaus ratkaisut ovat useimmiten TOF menetelmällä toimivia laserskannereita, sillä ne kykenevät kartoittamaan suuria rakenteita vaivattomasti tarpeeksi korkealla tarkkuudella. Myös fotogrammetriaa on käytetty eritoten arkeologisten kaivantojen dokumentoinnissa tavallisen valokuvauksen tukena. (12, Adam Prins ja Matthew J.Adams).

Lääketiede

3D-skannaus menetelmien kehittymisen myötä 3D-skannauksen hyödyt lääketieteessä kasvavat jatkuvasti. Skannausten avulla voidaan esimerkiksi tehdä potilaille juuri oikeanlaisia proteeseja ja apuvälineitä. Tästä hyvänä esimerkkinä kengän pohjalliset, jotka voidaan tehdä istuviksi suorittamalla ensiksi pikainen potilaan jalkapohjien skannaus ja tuottamalla tuote skannauksen mukaisesti. 3D-skannaus voikin pian korvata myös perinteiset hammastarkastukset. Hampaiden tarkastelu 3D-skannausten avulla on nopeaa ja erittäin tarkkaa (14, Karol Hatzilias). Etuna perinteisiin menetelmiin 3D-skannauksessa on etenkin sen nopeus. Skannaukset voidaan suorittaa pikaisesti potilaan tapaamisen yhteydessä, eikä monimutkaisiin mittaustoimenpiteisiin tarvitse kuluttaa resursseja. Hampaiden muotit voidaan esimerkiksi skannata ja siirtää laboratorioon nopeasti digitaalisessa muodossa jatkotoimenpiteitä varten. Näin vältetään myös perinteisten menetelmien tuomat mahdolliset inhimilliset virheet, sillä skannaukset tuottavat samoja tuloksia mittaajasta riippumatta. (15, Thomas Tong 2011).

Teollisuus

Teollisuudessa 3D-skannausta käytetään esimerkiksi suunnittelussa ja laaduntarkkailussa. Suunnittelussa sitä voidaan hyödyntää esimerkiksi takaisinmallinnuksessa. Jo olemassa olevia kappaleita voidaan skannata ja skannausten avulla niihin voidaan kehittää ja suunnitella sopivia osia jo olemassa oleviin kappaleisiin. Skannaus voi myös nopeuttaa prototyyppien testausta, sillä skannattu kappale vastaa hyvin tarkasti alkuperäisen kappaleen mittoja ja näin ollen mittausvirheet saadaan eliminoitua lähes kokonaan. Myös erilaisten esimerkiksi valanta muottien valmistus nopeutuu 3D-skannauksen avulla, kun muottien muotoja ei tarvitse itse mallintaa lainkaan. (13, Arto Mannila 2014).

Laaduntarkkailussa 3D-skannausta hyödynnetään valmistusvirheiden paikantamisessa tuotteiden valmistuksen yhteydessä. Ei-koskettavia skannausmenetelmiä voidaan käyttää esimerkiksi kappaleiden oikeanlaisen muodon pikaiseen tarkistukseen ja koskettavia menetelmiä voidaan hyödyntää kappaleiden tarkempaan geometriseen tarkasteluun. (13, Arto Mannila 2014).

Viihdeteollisuus

Viihdeteollisuudessa 3D-skannausta käytetään 3D-mallien rakentamiseen muun muassa elokuva ja peli alalla. Jos projektissa tarvittu malli on jo olemassa reaali maailmassa, on sen skannaaminen huomattavasti nopeampaa kuin 3D-mallin rakentaminen käsin. Tästä hyvänä esimerkkinä kilpa-auto pelit, joihin saadaan 3D-skannauksen avulla reaali maailmaa vastaavia ajoneuvoja nopeasti ja vaivattomasti. Tämä nopeuttaa tuotantoprosessia huomattavasti; käsin tehtyjen mallien rakentaminen voi kestää viikkoja, kun taas 3D-skannauksella saavutetut tulokset ovat valmiita muutamissa päivissä. (16, Hampton technical Associates).

Rikostekninen tutkimus

Rikospaikattutkimuksessa 3D-skannaus mahdollistaa rikospaikan nopean dokumentoinnin ennen kuin rikospaikkaa raivataan lainkaan. Skannauksen avulla myös koko rikospaikka saadaan dokumentoitua nopeasti ja tämä lisää todistusaineiston painoarvoa oikeudessa, sillä dokumentoinnin aikana ei tarvitse valikoida dokumentoitavia pisteitä. (13, Arto Mannila 2014).

Rikosten tutkinnassa käytetään monenlaisia erilaisia skannereita eri kokoisten todistusaineistojen taltiointiin. Sormenjälkiin, luodin hylsyihin ja muihin hyvin pieniin yksityiskohtiin käytetään lyhyen kantaman microskenereita, jotka perustuvat mikroskoopilla toimivaan fotogrammetriaan. Jalanjäljet, renkaanjäljet ja muut pienet ei-mikroskooppiset kohteet skannataan puolestaan strukturoidun valon avulla toimivilla skannereilla. Suuret kohteet, kuten erilaiset rakenteet skannataan puolestaan laser skannereilla laajamittaisen ja nopean skannauksen saavuttamiseksi. Digisoidut aineistot käsitellään jälkikäteen laboratorioissa ja niiden avulla voidaan määrittää esimerkiksi ajoneuvojen malleja ja veriroiskeiden kulkusuuntia. Aineistojen pohjalta on myös mahdollista toteuttaa erilaisia visualisointeja ja animaatioita rikospaikasta. (17, Eugene Liscio 2009).

Kuluttajaratkaisut

Lähivuosina 3D-skannaus on alkanut siirtymään ammattikäytöstä myös kuluttajien käyttöön ja markkinoille on alkanut ilmestyä kohtuuhintaisia 3D-skannaus ratkaisuja. Nämä skannerit ovat pääosin strukturoidulla valolla tai laserilla toimivia skannereita ja niitä on saatavissa niin työpöytäkäyttöön kuin kannettavaan skannaukseenkin.

Työpöytäkäyttöön tarkoitetut skannerit voivat olla pyörivällä tasolla varustettuja skannereita jotka pystyvät skannaamaan pieniä ja keskisuuria kohteita laservalojen ja optiikkansa avulla. Toinen yleinen vaihtoehto tämän kaltaisille kuluttajille suunnatuille skannereille on strukturoidun valon avulla toimivat skannerit, jotka koostuvat yksinkertaisimmillaan yhteen liitetystä kamerasta ja projektorista. Tästä hyvänä esimerkkinä EinScan-S, joka hyödyntää strukturoitua valoa Microsoftin Kinect sensorin tapaan ja käyttää pyörivää tasoa kohteen pyörittämiseen. (18, 3ders.org Simon 2015).

Kannettavat ratkaisut koostuvat useimmiten valon lähteestä sekä yhdestä tai useammasta optiikasta, ja niiden toiminta perustuu pitkälti kolmiomittaus menetelmään. Kannettavissa ratkaisuissa on myös paljon kehittyntä tekniikkaa, minkä avulla skanneri kykenee tunnistamaan sensorinsa sijainnin ja skannerin asennon sekä kalibroimaan itsensä automaattisesti kohdistuessa ja korjaamaan geometrisiä virheitä skannaustuloksesta. Tämä tapahtuu useimmiten referenssipisteitä tai kalibroitukuvioita hyödyntämällä. (2, Olli Santaluoto 2012).

Uusimissa kannettavissa 3D-skanneri ratkaisuissa on alettu hyödyntämään myös älypuhelin tekniikkaa. Älypuhelimeen liitettävän laserin sekä puhelimen oman kameran välityksellä toimivat 3D-skannerit tuovat 3D-skannauksen jokaisen kuluttajan tavoitettaviin

yksinkertaisen ja helposti mukana kulkevan ratkaisun avulla. Esimerkiksi Australialainen kehitteillä oleva älypuhelimeen liitettävä 3D-skanneri toimii vihreää laservaloa heijastavan moduulin sekä puhelimen oman kameran avulla. Heijastuspisteiden etäisyyksien mittaaminen ja 3D-mallin rakentaminen tapahtuu puhelimeen asennettavan sovelluksen avulla. (19, 3ders.com Alec 2015). Älypuhelimeen liitettävät 3D-skannerit tekevät tuloaan ja pian tästä ominaisuudesta saattaa jopa tulla joidenkin puhelinmallien vakiovaruste. Nähtäväksi jää mihinkä muualle 3D-skannereita kyetään integroimaan tulevaisuudessa.

3 DIY 3D-skanneri ratkaisujen vertailu

3.1 Projektin tavoite

Tämän projektin empiirisen osion tarkoituksena oli toteuttaa erilaisia itse rakennettavia 3D-skanneri ratkaisuja ja kehittää jo valmiiksi aloitettua fotogrammisen 3D-skannerin prototyyppiä. Tarkoituksena oli vertailla ja ottaa itsetoteutettavia 3D-skanneriratkaisuja Haaga-Helian 3D- ja robotiikka laboratorion käyttöön. Vertailussa tarkoituksena oli tarkastella erilaisten projektin teoriaosiossa käsiteltyjen 3D-skannausmenetelmien soveltuvuutta DIY mallisiin ratkaisuihin ja niiden toteuttamista käytännössä. Jokaisella skannerilla skannattiin kolmea erilaista kohdetta. Toteutettujen 3D-skannerien tarkoituksena on myös toimia esimerkkinä ja inspiraation lähteenä Haaga-Helian 3D ja robotiikka laboratorion käyttäjille ja tuoda esille uudenlaisia DIY ideoita mahdollisille harrastelijoille.

Haaga-Helian 3D- ja robotiikka laboratoriossa oli jo valmiiksi yksi fotogrammetriaan perustuva 3D-skanneri, joka toimii projektissa suoritetun vertailun pohjana. Yhtenä projektin tarkoituksena olikin pyrkiä löytämään 3D-skannaus ratkaisuja, jotka kykenevät haastamaan tämän laboratoriossa jo valmiina olevan ratkaisun.

Toteutettujen ratkaisujen vertailussa keskityttiin pääosin skannereiden kokoonpanon monimutkaisuutteen, skannereiden kokonaiskustannuksiin ja skannaustuloksen tarkkuuteen.

3.2 Menetelmät

3D-skannereiden vertailussa käytetyt skannerit koostuivat itse 3D-tulostetuista rakenteista sekä tarvittaessa ostetuista komponenteista. Skannauksen suorittavat ohjelmistot olivat verkosta vapaasti ladattavissa olevia ilmaisversioita tai vapaan lähdekoodin ohjelmistoja. Käytettyjä ohjelmistoja ja 3D-skanneri ratkaisuja käsitellään tarkemmin skannerien vertailuosiossa.

Rakennettujen skannereiden vertailu tapahtui vertailemalla skannereita toisiinsa empiirisesti tutkimalla laitteiden käytettävyyttä ja skannaustuloksia. Seuraavassa kappaleessa käymme läpi tutkimuksessa käytetyt vertailukohteet, jotka tulevat myöhemmin esille skanneri kohtaisesti vertailuosiossa.

Ensimmäinen 3D-skannereiden vertailukohde oli skannerien kokoonpano. Tämä pitää sisällään skannerin rakentamiseen vaadittavat osat ja itse kokoonpanon monimutkaisuuden ja kuinka suurella tietotaidolla ja vaivalla skannerin rakentaminen on mahdollista. Toinen vertailukohde oli kokoonpanon kokonaiskustannukset. Tässä keskityttiin pääosin skannerin vaatimien osien kustannuksiin elektroniikasta ja mikrokontrollereista tarvittaviin rakenteisiin ja täten skannerin soveltuvuuteen edullisena DIY-ratkaisuna. Kolmantena vertailukohtana oli skannerin käytettävyys. Tarkoituksena oli vertailla erilaisten skanneriratkaisujen yksinkertaisuutta ja käyttömukavuutta. Neljäs ja projektin tärkein vertailukohde oli skannerien tarkkuus. Tässä tarkoituksena oli määrittää kuinka tarkasti ja virheettömästi kukin 3D-skanneri kykenee skannaamaan erilaisia kohteena käytettyjä kappaleita. Skannausohjelmistojen tuottamat 3D-mallit tarkasteltiin Meshlab ohjelmaa käyttäen skannaustarkkuuden ja tarvittavan jälkikäsittelyn määrittämiseksi.

Alla on kuvattu vertailussa käytetyt skannauskohteet. Kohteiden eriäväisyyksien tarkoituksena on kartoittaa eri skanneriratkaisujen kykyä taltioida monimutkaisuudeltaan erilaisia esineitä.



Kuva 2. skannauskohde 1. kivisammakko

Kohde 1. kivisammakko edustaa yksinkertaista pienehköä skannauskohdetta yksinkertaisilla pinnanmuodoilla ja selkeällä rakenteella.



Kuva 3. skannauskohde 2. nalle

Kohde 2. nalle on skannauskohteista suurin ja sisältää runsaasti orgaanista monimutkaista pintatekstuuria. Suuren kokonsa ja yksityiskohtaisen turkkitekstuurinsa takia nalle on haasteellinen skannauskohde 3D-skannereille.



Kuva 4. skannauskohde 3. lohikäärme

Kohde 3. lohikäärme on puolestaan muita kohteita huomattavasti monimutkaisempi ja yksityiskohtaisempi. Kohteessa 3. on myös runsaasti helposti varjoon jääviä välejä ja muotoja, jotka voivat osoittautua hyvinkin haastavaksi skannattaviksi.

3.3 Projektin tulosten hypoteesi

Työn alkupuolella kerättyyn teoretietoon perustuen mahdollisista DIY 3D-skanneri ratkaisuksista fotogrammetriset menetelmät tuottavat tarkimmat lopputulokset. Tähän menetelmään pohjautuvat skannerit ovat myöskin oletettavasti helpoin rakentaa ja

toteuttaa suhteellisen alhaisin kustannuksin. Tästä syystä työn vertailun pohjana käytetty jo valmiiksi rakennettu fotogrammetriaan perustuva skanneri tulee oletettavasti tuottamaan ainakin kaikkein tarkimmat skannaustulokset kaikkein monimutkaisimmista kohteista, joko nykyisellä tai vaihtoehtoisella ohjelmistolla. Pintatekstuureiltaan yksinkertaiset ja yksityiskohdattomat kohteet tuottavat luultavasti vaikeuksia valokuvien yhtenevien pisteiden määrittämisessä.

Laser valoja hyödyntävät kolmiomittaus menetelmällä toimivat DIY-skannerit ovat todennäköisesti vertailuryhmän nopeimpia skannereita, mutta niiden odotettu skannaustarkkuus on luultavasti huomattavasti pienempi muihin ratkaisuihin verrattuna varsinkin yksityiskohtaisissa kohteissa. Yksinkertaiset kohteet voivat puolestaan skannautua huomattavasti tarkemmin kuin fotogrammisilla menetelmillä, sillä laserskannaus ei hyödynnä kohteen yksityiskohtia kolmiulotteisen mallin rakentamiseksi.

3.4 Toteutetut 3D-skannerit

Seuraavassa osiossa käymme läpi projektin aikana toteutetut 3D-skanneri ratkaisut ja niiden rakentamiseen sekä testaukseen liittyvät dokumentaatiot. Jokaisesta ratkaisusta testattiin luvussa 3.2 mainitut vertailukohdat: kokoonpanon monimutkaisuus, kokoonpanon teoreettiset kustannukset, käytettävyys sekä tulosten tarkkuus. Skannattavina kohteina käytettiin luvun 3.2 skannauskohteita.

Rakennetuista skannereista tehtiin myös niiden käyttöön liittyvät ohjeistukset siltä varalta, jos tämän projektidokumentaation lukijalla riittää kiinnostusta työssä käytettyjen ratkaisujen itsenäiseen testaamiseen. Ratkaisujen yleiskuvat ja vertailututkimuksen tulokset käsitellään tässä luvussa, mutta tarkemmat skannerien käyttöön liittyvät dokumentaatiot löytyvät tämän työn liitteistä.

Projektin resurssien puitteissa toteutettiin kahta erilaista 3D-skanneri tyyppiä, jotka molemmat ovat hyvin toimivia DIY-ratkaisuina. Ensimmäinen toteutettu skannerityyppi oli fotogrammetrinen skanneri, jonka prototyyppi olikin jo valmiina työn alkaessa. Projektin aikana prototyyppiä kuitenkin kehitettiin runsaasti ja sen toimintaa testattiin useammalla erilaisella fotogrammetriaan perustuvalla 3D-skannausohjelmalla. Käytetyt fotogrammetriset ohjelmat olivat: alkuperäisessä prototyypissä käytetty Autodesk 123Dcatch sekä työssä vertailuun mukaan otetut Autodesk Memento ja VisualSFM.

Fotogrammetrisen skannerin lisäksi rakennettiin laserskanneri vertailukohteeksi. Laserskanneri perustui kolmiomittaukseen ja skannauksen suorittavana ohjelmistona käytettiin vapaan lähdekoodin Horus 3D-skannausohjelmaa.

3.5 Fotogrammetrinen skanneri

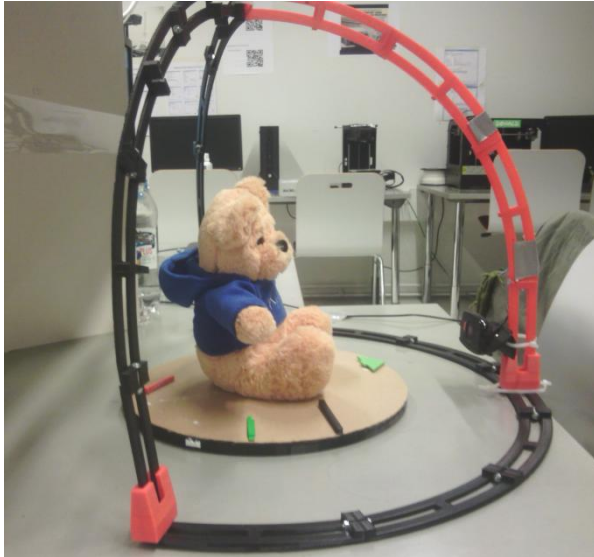
Vertailun pohjana toimi lehtori Heikki Hietalan rakentama fotogrammetrisen skannerin prototyyppi, jonka toiminnan parantaminen oli yksi työn tavoitteista. Fotogrammetrisen skannerin tarkoituksena on kuvata skannattavaa kohde sen jokaiselta puolelta ja määrittää kuvien avulla kohteen kolmiulotteinen malli tietokoneella sijaitsevaa ohjelmistoa käyttäen.

Prototyyppi käytti 3D-skannausohjelmistonaan Autodeskin 123Dcatch ohjelmaa, mutta projektin aikana skanneria testattiin myös muilla ilmaisilla fotogrammetriaan perustuvilla skannausohjelmistoilla. Projektissa käytetyt fotogrammetriaan perustuvat ohjelmistot olivat: Autodesk 123Dcatch, Autodesk Memento sekä VisualSFM.

Työssä käytetyn fotogrammetrisen skannerin kustannukset koostuivat lähes yksinomaan webkameran kustannuksista, joten samankaltainen 3D-skanneri on mahdollista rakentaa itse hyvin alhaisin kustannuksin.

3.5.1 Alkuperäinen rakenne ja toiminta

Alkuperäisessä kokoonpanossaan skanneri koostui webkamerasta (Logitech C525), 3D-tulostetusta puolilympyrän muotoisesta tukirakenteesta sekä taustalevyllä varustetusta pyörivästä alustasta. Webkamera oli kiinnitettynä tukirakenteen kaareen ilman liikkumavaraa, mikä rajoitti kohteen kuvaamisen vain yhteen pystysuoraan kulmaan.



Kuva 5. laboratorion fotogrammetrinen skanneri

Skannattavan kohteen kuvaus tapahtui asettamalla kohde pyörivän alustan päälle ja pyörittämällä alustaa askeleittain samalla kun webkamera tallentaa kohteesta kattavan kuvasarjan. Pyörivälle alustalle on asetettuna pieniä erivärisiä ja muotoisia kappaleita kiintopisteiksi paremman skannauksen saavuttamiseksi. Skannauksen vaatiman runsaan kuvamäärän takia webkameran kuvankaappaus oli automatisoitu skannauksen nopeuttamiseksi. Kuvasarjan kaappaaminen vaati kolme erilaista tietokoneelle asennettua ohjelmaa: Logitech Webcam Controller, CommandCam sekä Photoshop.

Kuvasarjan kaappaaminen tapahtui tietokoneelle asennetun, Ted Burken kehittämän, CommandCam sovelluksen avulla. CommandCam toimii Windowsin komentorivin kautta ja käyttää koneeseen kytkettyä webkameraa ja määrittää kaapattavan kuvasarjan aikavälit, jolloin käyttäjän ei tarvitse kuin kääntää skannerin pyörivää alustaa määritetyin väliajoin. Ohjelma ei kuitenkaan kyennyt tallentamaan kaapattuja kuvia muuta kuin bitmap tiedostoon, ja toimiakseen käytetyissä skannausohjelmistoissa kuvat vaativat kuvaformaatin muuntamista jpg muotoon.

Kuvaformaatin muutos tapahtui automatisoidulla batch toiminolla Photoshop ohjelmistoa käyttäen. Photoshop ohjelmalla luotiin kuvaformaatin muutostoiminto, joka mahdollisti CommandCam ohjelmalla saatujen bitmap tiedostojen nopean kääntämisen jpg muotoon.

Logitech Webcam Controller ohjelmaa käytettiin webkameran asetusten säätämiseen ja kameran kohdistamiseen ennen CommandCam sovelluksen ajamista. Ohjelma oli myös aina suljettava ennen CommandCam ohjelman suorittamista, mikä teki prosessista hieman vaivalloista.

Tämä alkuperäinen toimintamalli oli tehokas ja opeteltuna suhteellisen nopea, mutta vaati kolmea erilaista ohjelmaa kuvasarjan saamiseksi, mikä teki skannauksesta hieman sekavaa ja vaivalloista. Esimerkiksi CommandCam ei kyennyt aloittamaan kuvankaappausta mikäli Logitech Webcam Controller oli vielä päällä kameran kohdistamisen jälkeen.

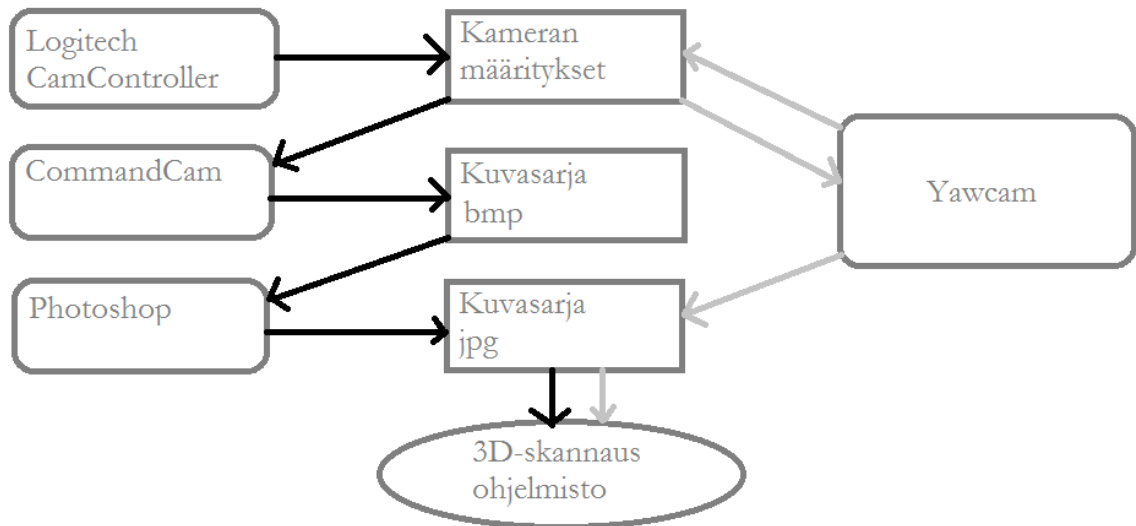
Kuvasarjan käsittelyn jälkeen kaapatut kuvat syötettiin 3D-skannaus ohjelmiston, kuten Autodeskin 123Dcatch tai VisualSFM ohjelman käyttöön kolmiulotteisen mallin saamiseksi.

3.5.2 Kehitetty rakenne ja toiminta

Skannerin fyysinen rakenne pysyi toistaiseksi pääosin muuttumattomana, mutta skannaustulosten parantamiseksi kameraa paikallaan pitävää kiinnikettä löystettiin tarvittavasti kameran irroittamisen mahdollistamiseksi. Kameran irroittaminen oli tarpeellista kameran liikkuvuuden lisäämiseksi; useammat pystysuuntaiset kuvauskulmat tuottavat paremman skannaustuloksen. Uudessa ratkaisussa kamera on mahdollista kiinnittää z-akselina toimivan kaaren eri kohtiin ja tarvittaessa asettaa lähemmäksi skannattavaa kohdetta lähikuvien ottamiseksi.

Kuvasarjan kaappausta yksinkertaistettiin vaihtamalla kuvien käsittelyyn käytetyt kolme ohjelmaa yhteen Yawcam nimiseen ohjelmaan, joka kykenee suorittamaan lähes samat toimenpiteet lyhyemmässä ajassa ja vähemmällä vaivalla. Ohjelma toimii myös graafisen käyttöliittymän kautta komentokehoteen sijaan.

Yawcam on Magnus Lundvallin kehittämä freewarena jaettava webkamera kontrolleri, joka tarjoaa edellisessä ratkaisussa käytetyt toiminnot yhdessä ohjelmassa kolmen ohjelman sijaan. CommandCamin tapaan se soveltuu automaattiseen kuvasarjan kaappaamiseen ja tallentaa kaapatut kuvat automaattisesti korkealaatuisiksi jpg kuviksi, jolloin Photoshopin batch toimintoa ei tarvita lainkaan. Ohjelmalla pystytään myös käyttämään Logitechin Cam Controllerin asetuksia kameran asetusten määrittämiseksi ennen kuvasarjan kaappausta, mikä yksinkertaistaa myös kuvasarjan kaappausprosessia.



Kuva 6. alkuperäinen kolmen ohjelman ratkaisun havainnollistava vertaus uuteen Yawcam ratkaisuun

Kuvasarjan kaappaaminen on näin huomattavasti yksinkertaisempaa ja kuvien saattaminen 3D-skannausohjelman käyttöön tapahtuu hieman nopeammin. Tarkempi Yawcam ohjelman käyttöön ja fotogrammissen skannerin käyttöön liittyvä dokumentaatio löytyy työn liitteistä: liite 1. fotogrammetrisen 3D-skannerin käyttäminen.

3.5.3 Kuvasympäristön ja kameran asetusten optimointi

Fotogrammetriassa kuvasympäristöllä on suuri vaikutus 3D-skannauksen lopputulokseen, sillä skannausohjelmistot käyttävät otetun kuvasarjan kuvien yhtäläisyyksiä kolmiulotteisen mallin luomiseksi. Tästä syystä esimerkiksi voimakkaat varjot voivat aiheuttaa aukkoja tai vääristymiä valmiissa mallissa. Työssä käyttämämme fotogrammissen skannerin tapauksessa valaistuksella on etenkin suuri rooli skannausten onnistumisessa pyörivän skannauskohteen takia. Pyörivää kohdetta kuvatessa varjot pysyvät liikkumattomana aiheuttaen suuria vaikeuksia skannausohjelmistolle oikeanlaisen kolmiulotteisen mallin määrittämisessä.

Valaistuksen tärkeyden takia Haaga-Helian 3D- ja robotiikka laboratoriossa suoritettiin skannaustestejä ideaalin skannausvalaistuksen määrittämiseksi. Koska erilaiset valaistukset vaativat erilaisia kameran asetuksia, testeissä otettiin huomioon myös kuvaukseen käytetyn Logitech C525 webkameran asetuksen kussakin valaistuksessa parhaimman kuvasarjan saamiseksi.

Testauksessa käytettiin laboratorion fotogrammisella skannerilla otettuja 48 kuvan sarjoja erilaisilla valaistuksilla ja kamera asetuksilla. Kuvasarjan muuntaminen 3D-malliksi tapahtui VisualSFM 3D-skannaus ohjelmalla ja tarkkuuden määrittäminen tapahtui tarkastelemalla VisualSFM ohjelmalla saatua pistepilveä 3D-mallien prosessointiin tarkoitettulla Meshlab ohjelmalla, jolla saatujen verteksien lukumäärä on helposti tarkastettavissa. Suurimman tarkkuuden saavuttanut valaistus sekä kameran asetuskombinaatio todettiin parhaimmaksi laboratoriossa saavutettavaksi kuvausympäristöksi.

Alla on kuvattu testien tulokset tiivistetysti taulukkoon. Kuvasarjat ja niihin liittyvät kameran asetukset ja valaistukset löytyvät tarkemmin työn liitteistä: liite 3. kuvausympäristön optimointi: valaistus ja kameran asetukset.

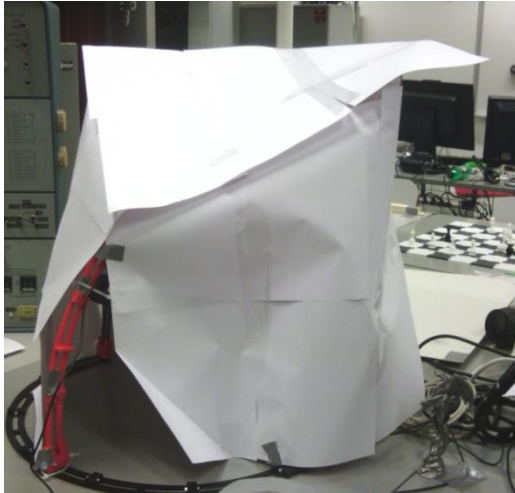
Taulukko 1. Kuvausympäristön testausten tulokset.

Kuvasarja	Laboratorion valaistus	Kameran asetukset	Tarkkuus Meshlabissä
Kuvasarja 1	Takavalot, kuvattava kohde valossa	Keskiverto valoitus, alhainen gain ja muuten vakio asetukset	Tarkkuus noin 22.000 verteksiä
Kuvasarja 2	Takavalot, kuvattava kohde valossa	Keskiverto valoitus, alhainen gain ja mustavalkoinen kuva, muuten vakio asetukset	Tarkkuus noin 28.000 verteksiä
Kuvasarja 3	Vain etuvalot, kuvattava kohde täysin varjossa	Runsas valoitus ja gain, normaali kontrasti ja hieman tavallista korkeampi valoisuus	Tarkkuus noin 32.000 verteksiä
Kuvasarja 4	Vain etuvalot, kuvattava kohde	Runsas valoitus ja gain, normaali	Tarkkuus noin 40.000 verteksiä

	täysin varjossa	kontrasti ja hieman tavallista korkeampi valoisuus sekä mustavalkoinen kuva	
Kuvasarja 5	Täysi valaistus, kuvattava kohde valoteltassa	Normaali valoitus ja alhainen gain, muut asetukset vakiona	Tarkkuus noin 50.000 verteksiä
Kuvasarja 6	Täysi valaistus, kuvattava kohde valoteltassa	Normaali valoitus ja alhainen gain, kuva mustavalkoinen muut asetukset vakiona	Tarkkuus noin 53.000 verteksiä

Kuvausympäristön testausten perusteella varjostettuna oleva kuvauskohde tuottaa parhaimmat skannaustuloksen laboratorioympäristössämme pyörivää alustaa hyödynnettäessä. Tulos on odotettu, sillä varjossa olevassa kohteessa ei synny voimakkaita ulkopuolisia varjoja, jotka saattavat aiheuttaa virhelaskelmia skannausohjelmien muodostaessa kolmiulotteista mallia kuvasarjan perusteella. Varjostus ratkaisusta valotelta tuotti huomattavasti paremman lopputuloksen kuin toiseksi yltänyt kattolamppujen avulla saavutettu täysi varjostus.

Täysin varjostetun kuvausympäristön takia kameran valoitusasetukset on pidettävä hyvin korkealla, mikä aiheuttaa pieniä värivirheitä kuvasarjoissa. Tästä syystä valotelan käyttö on ideaalia, sillä valotelta pehmentää kattolamppujen runsaan valaistuksen ja häivyttää tehokkaasti skannausalueelle syntyvät varjot. Projektin aikana rakennettu valotelta tehtiin yhteen teipattuja A4 kokoisia paperiarkkeja hyödyntäen. Ratkaisu on yksinkertainen, halpa ja toimiva, mutta käytännöllisempänä ratkaisuna toimisi esimerkiksi hyvin valoa läpi päästävä kangas skannausalueen päälle asetettuna.



Kuva 7. valotelttä skannerin yllä

Jokaisessa kuvasarjaparissa mustavalkoinen kuvasarja tuotti paremman skannaustarkkuuden, mikä oli hieman yllättävää, mutta saattaa selittyä valoituksen aiheuttaman rakeisuuden ja värivirheiden tasoittumisella värisävyjen vähentyessä. Vaikka mustavalkoiset kuvasarjat tuottivatkin tarkemman lopputuloksen, ei niiden käyttö ole luonnollisesti suotavaa mikäli skannattavasta kohteesta halutaan tallentaa myös värilliset tekstuurit. 3D-tulosteita ja esimerkiksi mallinnuksessa käytettäviä kohteita skannatessa mustavalkoisuudella ei välttämättä ole väliä ja sen käyttöä tulee harkita mahdollisen skannaustarkkuuden parantamiseksi.

Kuvasarjoissa 5 ja 6 käytetyt valaistukset ja kameran asetukset sekä valotelttä otettiin käyttöön projektin ajaksi. Kameran asetukset ovat kuitenkin vain suuntaa antavia ja ne tulee tarkistaa aina skannauskohdetta vaihdettaessa kohteiden materiaalien ja värien erilaisuuden takia.

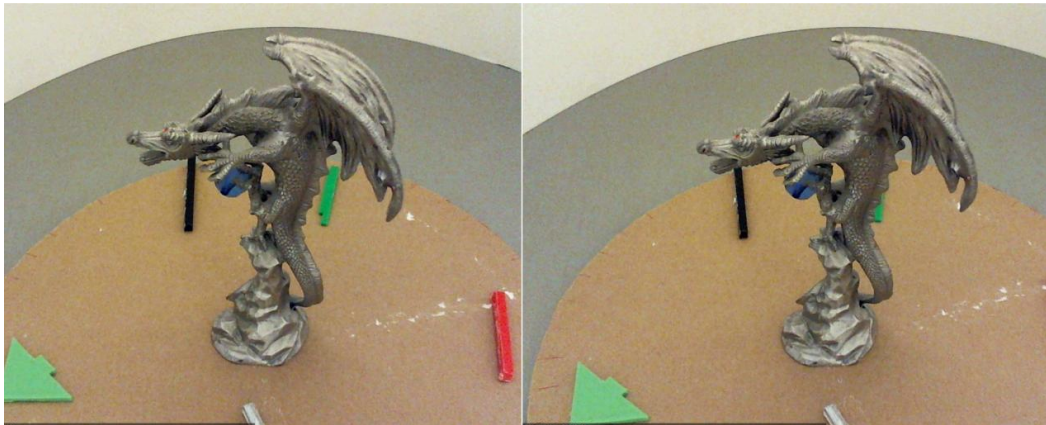
3.5.4 Kuvasarjan ottaminen

Oikeaoppisesti otettu kuvasarja helpottaa fotogrammistien ohjelmistojen työskentelyä ja tuottaa huomattavasti tarkemman skannaustuloksen virhelaskelmien ja ylimääräisten pisteiden vähentyessä. Hyvin suunnitellulla kuvauksella vähennetään myös tarvittavien kuvien määrää ja mahdollisesti vähennetään skannaukseen kuluva aikaa merkittävästi. Tässä osiossa käsitellyt seikat pätevät Haaga-Helian 3D- ja robotiikka laboratorioon rakennettuun fotogrammetriseen 3D-skanneriin.

Tärkeintä kuvasarjaa otettaessa on säilyttää kuvien välinen yhteneväisyys. Tämä tarkoittaa sitä, että peräkkäin otetuissa kuvissa on oltava riittävästi yhteneviä muotoja tai muita pisteitä, joita 3D-skannausohjelmisto hyödyntää 3D-mallin määrittämisessä. Tästä

syystä skannattavaa kohdetta on kuvattava jokaisesta suunnasta tasaisin väliajoin mielellään myös useammasta pystysuorasta tasosta. Suositeltu peräkkäisten kuvien sisältämän yhteneväisyyden määrä on vähintään noin 50% hyvän skannaustuloksen saamiseksi, pyörivällä alustalla toimiessa tämä tarkoittaa karkeasti noin 10-15 asteen kuvaväliä. (23, Brandon Blizard 2014).

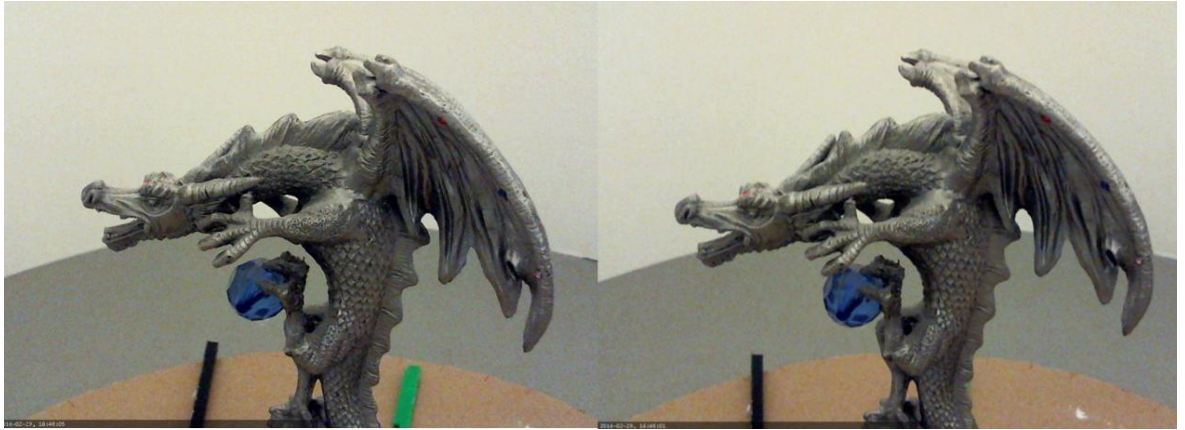
Hyvän kuvasarjan saamiseksi on myös hyvä muistaa poistaa kameran automaattiset toiminnot käytöstä, ettei esimerkiksi kuvien väliset värerot muutu kuvasarjan aikana. Kohdistus on syytä asettaa itse oikeanlaiseksi etäisyyskohtaisesti, mutta kohdistuksessa on tärkeää tarkistaa, että kohdistus on tasainen koko skannattavan kohteen alueella, sillä liian paikallinen kohdistus aiheuttaa muuttuvia tarkkuuseroja kuvasarjan eri kuvissa. (23, Brandon Blizard 2014).



Kuva 8. kuvasarjan peräkkäisten kuvien erot

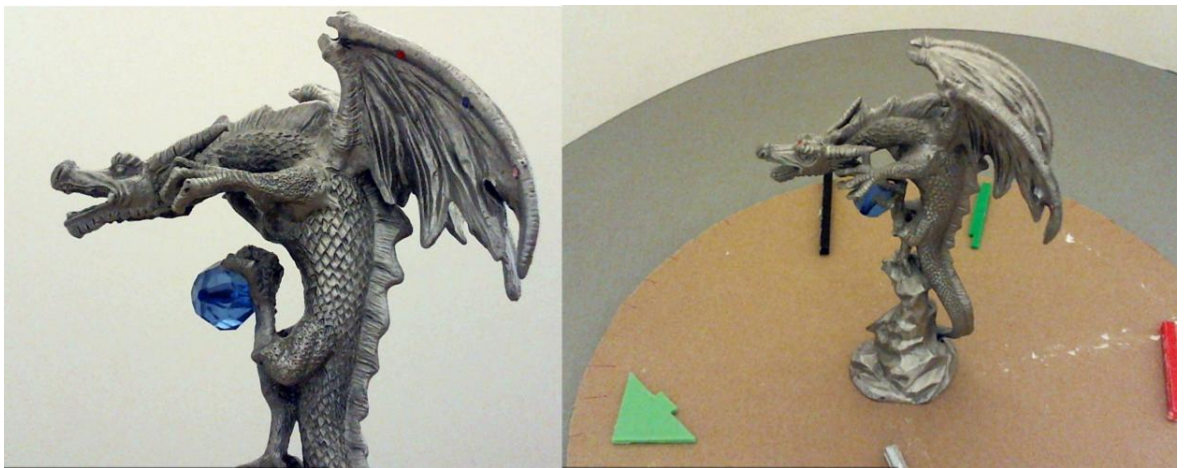
Yllä näkyvässä kuvaesimerkissä skannattavaa kohdetta on kuvattu noin 15 asteen käännöksen jälkeen; kappaleen liike on silmämääräisesti vaikeasti havaittavissa, mutta yhteneviä pisteitä löytyy runsaasti. Skannaus voi siis esimerkiksi koostua sarjasta kuvia, jotka on otettu kohteesta esimerkkikuvien kaltaisesti 15 asteen käännöksen välein. Laboratoriossa skannerin pyörivän alustan merkinnät auttavat sopivan kääntökulman löytämisessä. Skannattavaa kohdetta on myös syytä kuvata useammasta pystysuuntaisesta kulmasta, mutta kameraa liikuttaessa on muistettava myös säilyttää riittävä määrä yhtenevää pinta-alaa aikaisempien kuvien kanssa.

Tarkempien yksityiskohtien tallioimiseksi skannauksessa voidaan ottaa mukaan lähikuvia skannattavasta kohteesta. Lähikuvia otettaessa on pidettävä huoli siitä, että lähikuvat sisältävät selkeitä yhteneviä pisteitä myös kaukokuvien kanssa.



Kuva 9. lähikuvat kohteesta lohikäärme

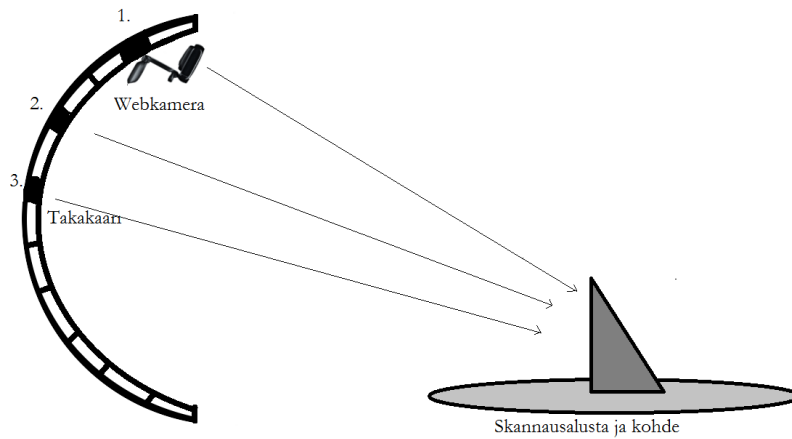
Yllä olevissa kuvissa skannauskohdetta on kuvattu läheltä säilyttäen edellisissä kuvissa esiintyviä piirteitä myös pyörivässä alustassa asti. Lähikuvia voitaisiin teoriassa myös ottaa vielä lähempää niin pitkään kuin käytetty kamera kykenee pitämään kuvan tarkkana, kunhan kuvien lähentyminen tapahtuu porraistetusti eikä kuvasarjojen välille pääse syntymään liian suuria harppauksia.



Kuva 10. liian eriävät lähi ja kauko kuvat

Vaikka yllä olevissa kuvissa löytyykin runsaasti yhteneviä pisteitä, on kameran tarkka suhteellinen sijainti vaikea määrittää 3D-skannausohjelman toimesta liian suuren kuvakulman muutoksen takia. Tämä johtaa huonoon skannaustulokseen ja mahdollisesti kahden päällekkäisen 3D-mallin syntymiseen. Näiden kahden kuvan yhdistäminen toisiinsa vaatisi huomattavasti enemmän kuvia kuvien väliin jäävien yhteneväisyyksien kattamiseksi.

Työssä käytetyssä fotogrammetrisessä skannerissa pystysuuntaisen kuvakulman muuttaminen tapahtuu kameraa siirtämällä skannerin kaarta pitkin. Alla olevassa kuvassa on esitetty kameran sijainti takakaarella kuvasarjojen 1, 2 ja 3 aikana.



Kuva 11. karkea hahmotelma laboratorion fotogrammetrisesta skannerista ja esimerkit kameran pystysuuntaisesta sijainnista eri kuvasarjojen aikana (1,2 ja 3).

Lähikuvien ottaminen tapahtuu puolestaan siirtämällä kamera lähemmäksi skannattavaa kohdetta. Lähikuvien varalta skannerissa ei työn suoritus hetkellä tukirakennetta lähikuvien varalle, joten kameran korkeutta muutettiin asettamalla erilaisia ja erikorkuisia esineitä kameran alle. Webkameran digitaalisen zoom –toiminnon käyttäminen ei ole suotavaa kuvan tarkkuuden säilyttämiseksi.



Kuva 12. kameroiden sijainnit VisualSFM ohjelmassa

Yllä olevassa kuvassa käy hyvin ilmi hyvässä skannauksessa käytetyn kuvasarjan muodostaminen. Nallen ympärillä olevat pisteet esittävät kameran sijaintia kuvaus hetkellä. Kohteesta otetut kuvasarjat on otettu monesta eri pystysuuntaisesta kulmasta kaukaa ja läheltä liian suuria harppauksia välttäm.

3.5.5 123Dcatch

Ensimmäine tässä työssä testattu photogrammetriaa hyödyntävä 3D-skanneriohjelmisto oli ilmainen 3D-skannausohjelma 123Dcatch. Ohjelmisto oli myös käytössä alkuperäisessä fotogrammetrisen skannerin prototyypissä.

123Dcatch on Autodeskin ylläpitämä, ilmainen pilvipalveluna toimivan rekonstruktion sisältämä, 3D-skannaus ohjelmisto, jonka tarkoituksena on tarjota yksityiskäyttäjille yksinkertainen ja kevyt 3D-skannaus vaihtoehto. Ohjelman käyttö on yksinkertaista: siihen ei tarvita muuta kuin kamera ja tietokone/älypuhelin ohjelmiston pyörittämiseksi. Ohjelmiston toiminta perustuu fotogrammetriaan ja 3D-mallin muodostus tapahtuu tutkimalla otetusta kuvasarjasta yhteneväisyyksiä, joiden avulla ohjelmisto määrittää kolmiulotteisen pistepilven pisteet ja luo lopullisen kolmiulotteisen mallin. Vaikka sovellus onkin ilmainen, ovat sen lisenssiehdot tiukat eikä sitä tästä syystä voida käyttää muuta kuin yksityiseen 3D-skannaukseen.

123Dcatch:n käyttö ei vaadi muuta kuin kameran ja tietokoneen, jolle ohjelma ladataan. Älypuhelimella työskennellessä kamera ja sovellus ovat samassa laitteessa, mutta tässä työssä emme käyttäneet älypuhelinsovellusta lainkaan. Käytimme vertailututkimuksessa Haaga-Helian 3D- ja robotiikka laboratoriossa olevaa photogrammetriseen 3D-skannaukseen tarkoitettua 3D-skanneria.

123Dcatch ohjelman käytettävyys

123Dcatch skannerin käyttö oli hyvin yksinkertaista ja helppoa. Kuvien ottaminen skannattavasta kohteesta voidaan suorittaa periaatteessa vapaalla kädellä, mutta tässä projektissa käytimme edellä mainittua kehikkorakennelmaa, jonka avulla kamera saadaan pidettyä paikalla ja kohdistettuna helposti jokaisen otetun kuvan aikana. Tämä teki kohteiden kuvaamisesta helppoa ja yksinkertaista. Koska kuvauslaitteena käytettiin tietokoneeseen liitettyä web-kameraa, ei kuviakaan tarvinnut erikseen tuoda tietokoneelle, jossa 123Dcatch ohjelmisto sijaitti.

Kuvien ottamisen jälkeen kuvat oli helppo ladata skanneriohjelmiston käytettäväksi. Ensikäytön rekisteröinti ikkunaa lukuunottamatta kuvien lataaminen ja 3D-mallin muodostaminen tapahtui vaivattomasti ja täysin automaattisesti Autodeskin pilvipalvelua hyödyntäen noin kymmenessä minuutissa. Ohjelman pilvipalvelupohjaisuus onkin 123Dcatch ohjelmiston suurin plussa sekä miinus.

Etuna pilvipalvelupohjaisuudessa on etenkin vakiintunut laskentatehokkuus. 3D-mallin muodostaminen tapahtuu Autodeskin palvelimilla, eikä se tällöin rasita käyttäjän tietokonetta lähes lainkaan ja mallin muodostus tapahtuu koneen tehoista riippumatta yleensä parin kymmenen minuutin sisällä. Tämä vapauttaa luonnollisesti myös koneen laskentatehoa mallintamisen ajaksi, joten käyttäjä voi työskennellä koneellaan vapaasti 3D-mallin muodostamisen aikana. Pilvipalvelun ansiosta skannausprosessi pysyy myös hyvin yksinkertaisena eikä käyttäjän tarvitse puuttua skannausprosessiin lainkaan kuvien ottamisen jälkeen.

Kokeneemman käyttäjän näkökulmasta tämä on toki myös haittapuoli, sillä 123Dcatch ohjelmistoa käyttäessä käyttäjä ei pysty edes halutessaan puuttumaan prosessiin skannaustulosten parantamiseksi, muutamia skannauksen jälkeen suoritettavia jatkotoimenpiteitä lukuunottamatta. Mikäli tulos ei miellytä on useimmiten kuvattava kohde kokonaan uudelleen tai valokuvien yhtenevät pisteet määritettävä käsin. Koska 3D-mallin muodostaminen valokuvista tapahtuu pilvipalvelun välityksellä, vaatii ohjelman käyttäminen internet-yhteyden. Käytettävyyden kannalta tämä voi olla haittapuoli, mutta Haaga-Helian 3D ja robotiikka laboratorion tapauksessa Internet yhteys on lähestulkoot aina käytettävissä eikä tästä todennäköisesti ole haittaa.

Käytettävyydeltään 123Dcatch on yksinkertainen ja kevyt 3D-skannausratkaisu, jonka käyttäminen ei vaadi muuta kuin hieman tietämystä valokuvauksesta. Valokuvien muuntaminen 3D-malliksi tapahtuu vaivattomasti muutaman napin painalluksella, mikä tekee 123Dcatchista yksinkertaisen ja hyvin käyttäjä ystävällisen 3D-skanneri ratkaisun. Skannaustulosten jälkikäsittelyä voidaan suorittaa esimerkiksi Blender ohjelmalla tai tässä projektissa käytetyllä Meshlabilla.

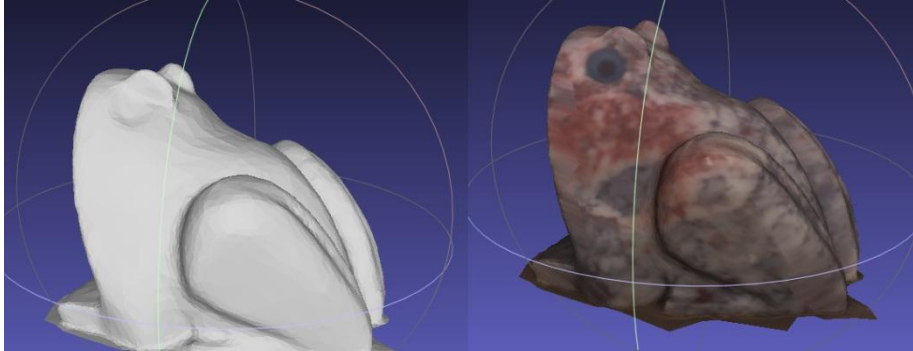
Tarkempi varsinaisen ohjelman käyttöön liittyvä dokumentaatio löytyy projektin liitteistä; liite 2. Autodesk 123Dcatch, Autodesk Memento sekä VisualSFM 3D-skannausohjelmien käyttö.

123Dcatch skannaustulokset

123Dcatch ohjelman skannaustarkkuuden testauksessa käytettiin jo aiemmin esiteltyjä kolmea erilaista skannauskohdetta: sammakko, nalle sekä lohikäärme. Ohjelmiston kuvarajoituksen takia skannauksessa voitiin käyttää vain maksimissaan 70 kuvan sarjaa. Tämän rajoituksen takia skannaustesteissä ei voitu hyödyntää lähikuvia lainkaan.

Skannauskohde 1. kivisammakko

Sammakon skannaus tapahtui käyttämällä 59 kuvan sarjaa. Kohteen pienen koon ansiosta kuvasarja oli lähestulkoon riittävä kaikkien kohteen yksityiskohtien taltioimiseen.



Kuva 13. kivisammakko 123Dcatch:ssä

Kivisammakon skannaustulos oli suhteellisen siisti ja kaikki olennaiset pinnanmuodot tallentuivat 3D-malliin. Teksturoidussa mallissa esiintyi hieman tekstuurien vääristymistä. Tarkkuudeltaan kivisammakko oli noin 5.000 verteksiä, mikä on suhteellisen alhainen määrä, jopa näin pienelle skannauskohteelle. Tässä tapauksessa kuitenkin riittävä.

Skannauskohde 2. nalle

Nallen skannaus tapahtui käyttämällä 60 kuvan sarjaa. 123Dcatch ohjelmalla saadut skannaustulokset nallesta olivat siistejä ja aukottomia, mutta tarkkuudeltaan vain 10.068 verteksiä, mikä on melkoisen alhainen ottaen huomioon kohteen suurehkon koon. Tulos oli tästä huolimatta huomattavasti suurempi kuin saman kaltainen skannaus työn alkaessa ennen valaistuksen optimointia.



Kuva 14. nallen 123Dcatch skannaustulokset Meshlabissä

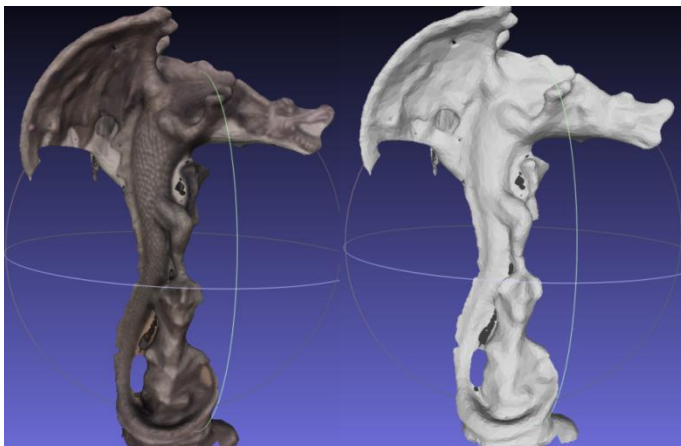
Tekstuurittomasta skannauksesta nähdään, että 123Dcatch onnistui taltioimaan hyvin skannattavan kohteen muodot, mutta pintojen yksityiskohdat jäivät puutteellisiksi varsinkin nallen päästä alaspäin.

Tekstuuriin kanssa huomataan, että kuvien vähäisen määrän takia pään alapuolelta uupuu huomattava määrä yksityiskohtia. Pään alue on kuitenkin skannautunut suhteellisen laadukkaasti ja lisäkuvilla tuloksista saataisiin varmasti hyvät, mikäli ohjelma tukisi suurempia kuvasarjoja.

Positiivisinta 123Dcatch nallen skannauksessa oli kohteen muodon säilyvyys. Skannauskohteena nalle oli monimutkainen turkkinsa takia ja 123Dcatch onnistui luomaan yhtenevän, vaikkakin pienitarkkuuksisen 3D-mallin kohteesta vain kuuttakymmentä kuvaa käyttäen.

Skannauskohde 3. lohikäärme

Lohikäärme-patsas oli skannauskohteena hyvin haastava monimutkaisen geometriansa ja vaikeasti kuvattavien alueidensa takia. 123Dcatchin kuvarajoitus hankaloitti lohikäärmeen skannausta melkoisesti, mutta 56 kuvan sarjalla kohteesta saatiin kuitenkin 8570 verteksiä.



Kuva 15. Lohikäärme 123Dcatch:llä

Kaikki lohikäärmeen piirteet taltioituivat 3D-malliin, mutta tuloksessa esiintyy hyvin paljon turhaa ja ylimääräistä geometriaa. Tämä on kuitenkin odotettavaa, sillä vähäinen kuvamäärä ilman lähikuvia jättää monimutkaisessa kohteessa paljon yksityiskohtia, joita ohjelma ei yksinkertaisesti kykene laskemaan liian vähäisellä informaatiolla. Pieniä aukkoja ja ylimääräisiä poimuja lukuunottamatta kohteen muodot tulevat skannauksesta esille yhteneväisesti.

123Dcatch ongelmatilanteet

Suurin ongelma hyvän skannaustuloksen saamisessa 123Dcatch ohjelmalla oli käytettyjen valokuvien puolella. 70 kuvan rajoitus hankaloittaa kohteen kuvaamista kauttaaltaan ja aiheuttaa mahdollisten tärkeiden yksityiskohtien puutteen lopullisessa 3D-mallissa. Kun skannauskohteen kuvasarjasta uupui tärkeitä kuvia esimerkiksi nallen kainaloiden taltioimiseksi, oli 123Dcatch ohjelmalla omituinen tapa korjata nämä aukot omituisilla valkoisilla poimuilla, mitkä todennäköisesti tulivat kuvausalueen valkoisesta taustasta.

Myös ohjelman pilvipalvelupohjaisuus aiheutti toisinaan pieniä ongelmia. Osa skannauksista jouduttiin lataamaan palveluun useampaan otteeseen erilaisten virhetilanteiden vuoksi ja muutamassa tapauksessa skannaustuloksia jouduttiin odottelemaan useita tunteja palvelimien ruuhkautumisen takia. Tämä ei tietenkään vaikuta skannaustuloksiin milläänlailla, mutta palvelinten ruuhkautumisesta riippuen skannaustulosten saaminen saattaa kestää hyvin pitkiäkin aikoja, vaikka suurin osa tuloksista valmistuikin onneksi noin kahden kymmenen minuutin sisään.

3.5.6 Autodesk Memento

Autodesk Memento on 3D-skannaukseen ja 3D-skannausten jälkikäsitteilyyn tarkoitettu ohjelmisto, joka toimii 123Dcatchin tapaan Autodeskin pilvipalveluna. Memento oli projektin suoritusajankohtana ilmaisessa beta testauksessa, mutta tulee jatkossa olemaan todennäköisesti maksullinen palvelu. Ohjelmisto oli kuitenkin vielä ilmainen projektin suorituksen aikana, joten se sisällytettiin työn aikana tehtyyn vertailututkimukseen. Mementoa käytettiin ainoastaan 3D-skannaukseen eikä sillä suoritettu varsinaista 3D-mallien jälkikäsitteilyä, sillä Memento ei varsinaisesti sovellu ilmaiseksi 3D-skannausratkaisuksi beta testauksen päättymisen jälkeen.

Mementon tarkoituksena on tarjota 123Dcatch ohjelmistoa tehokkaampi helppokäyttöinen pilvipalveluna toimiva harrastelijatason 3D-skannausratkaisu.

Autodesk Memento ohjelman käytettävyys

Mementon käyttö on 123Dcatch ohjelman tapaan yksinkertaista, eikä skannauksen suorittamiseen tarvita kuin kuvasarjan kaappaukseen tarkoitettu kamera sekä tietokoneelle asennettu ohjelmisto.

Käytettävyydeltään Memento onkin täysin 123Dcatchin kaltainen, eikä käyttäjän tarvitse tehdä muuta kuin ladata kuvattu kuvasarja Autodeskin palvelimille Mementon käyttöliittymän kautta ja odottaa 3D-mallin valmistumista. 123Dcatch:n tapaan tämä ei vaadi skannaukseen käytettävältä koneelta laskentatehoa lainkaan, sillä 3D-mallin määrittäminen tapahtuu Autodeskin palvelimilla. Mementon haittapuolet ovat samat kuin 123Dcatchissä ja suurin pilvipalveluna toimivan ohjelmiston varjopuolena on sen riippuvaisuus internet yhteydestä ja yhteyden toimivuudesta.

Etuna 123Dcatch ohjelmistoon käytettävyyden puolella Mementossa on mahdollisuus jälkikäsitellä skannaustuloksia ilman ylimääräisiä ohjelmia, mikä yksinkertaistaa kokonaisprosessia huomattavasti.

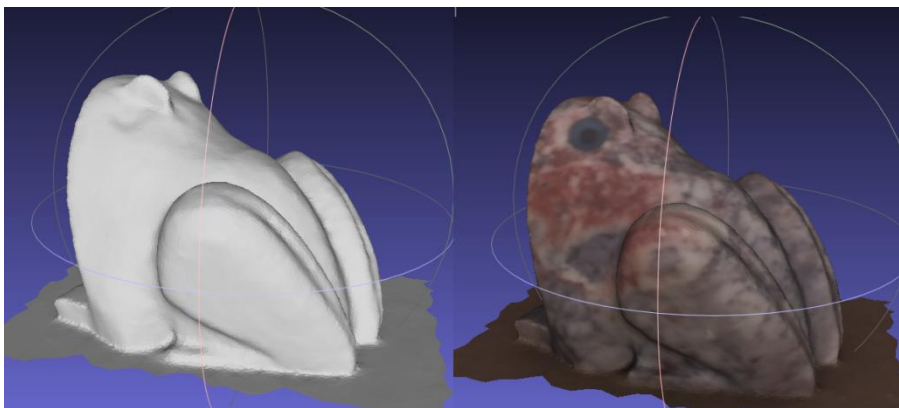
Tarkempi varsinaisen ohjelman käyttöön liittyvä dokumentaatio löytyy projektin liitteistä; liite 2. Autodesk 123Dcatch, Autodesk Memento sekä VisualSFM 3D-skannausohjelmien käyttö.

Autodesk Memento skannaustulokset

Mementon huomattavasti suuremman kuvarajan (250 kuvaa) ansiosta suoritetuissa skannauksissa pystyttiin käyttämään myös runsaasti lähikuvia skannattavista kohteista yksityiskohtien taltioimiseksi.

Skannauskohde 1. kivisammakko

Kivisammakon testaukseen Mementolla käytettiin 107 kuvan sarjaa ja tulokseksi saatiin noin 17.000 verteksiä. Tulos on kiitettävän tarkka kohteen hyvin pieneen kokoon ja yksinkertaisuuteen nähden.



Kuva 16. kivisammakko Mementolla.

Kohteen kaikki tärkeät piirteet taltioituivat moitteettomasti ilman virheitä tai ylimääräistä geometriaa.

Skannauskohde 2. nalle

Nallen skannauksessa Mementolla käytettiin ohjelman kuvakapasiteettia vastaavaa 199 kuvan sarjaa, joka sisälsi runsaan määrän kauko- ja lähikuvia skannauskohteesta. 123Dcatch:n tapaan Memento onnistui säilyttämään skannauskohteen muodot aukkottomasti, mutta tällä kertaa nallen kainaloiden alueelle muodostui aikaisempaa suuremmat poimut puuttuvaa kuvainformaatiota paikkaamaan. Tästä huolimatta skannaustarkkuus oli erinomainen 112.000 verteksin luokkaa.

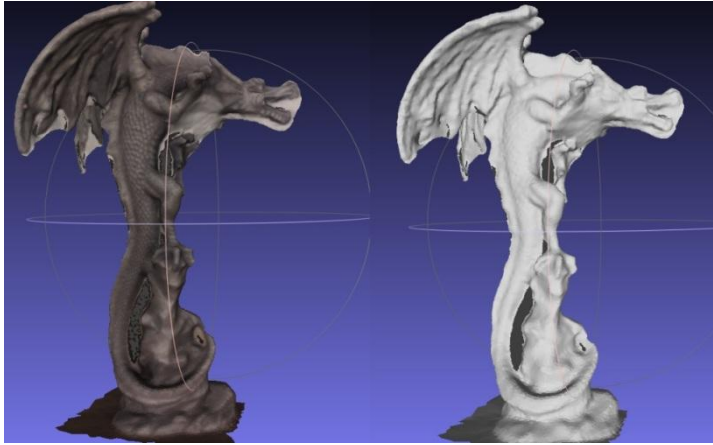


Kuva 17. nallen skannaustulokset Mementolla

Nallen turkin pintatekstuurit tulevat Mementolla hyvin esille varsinkin pään alueella minne suurin osa kuvasarjan kuvista painottui. Paidan tasaisuuden ja yksityiskohtien puutteellisuudesta huolimatta Memento onnistui mallintamaan sen suhteellisen vähäisellä virheellisellä geometrialla.

Skannauskohde 3. lohikäärme

Mementolla lohikäärme-patsaan skannaukseen käytettiin 245 kuvan sarjaa, joka sisälsi runsaan määrän lähikuvia patsaan eri puolilta. Skannauksen tarkkuudeksi saatiin 64.500 verteksiä.



Kuva 18. lohikäärme skannaus Mementolla

Lohikäärme-patsas skannautui kokonaisvaltaisesti hyvin suhteellisen suurella tarkkuudella, mutta Autodeskin tuotteille ominaiseen tapaan vaikeasti tavoitettavat alueet ja aukot paikkautuivat omituisilla poimuilla. Varsinkin lohikäärmeen suun alueelle syntyneet poimut ovat ongelmallisia ja vaikeasti poistettavissa.

Käytetty kuvasarja hipoi Mementon 250 kuvan rajaa eikä parempaa skannausta voitaisi suorittaa kuvasarjan kokoa lisäämällä. Teksturoituna kohde on helposti tunnistettavissa ja monet yksityiskohdat taltioituivat kiitettävästi. Jälkikäsitteilyllä tuloksesta saataisiin varmasti hyvinkin laadukas.

Autodesk Memento ongelmatilanteet

123Dcatchin tapaan Mementolla oli tapana korvata skannauskohteista uupuvia välejä omituisilla täytegeometrioilla.



Kuva 19. täytegeometriaa skannaustuloksessa

Myös pilvipalvelun ruuhkautuminen aiheutti ongelmia kohteiden skannauksissa ja tulosten odottelu vei toisinaan hyvinkin pitkiä aikoja. Varsinkin suurien kuvasarjojen kanssa työskentely oli toisinaan tuskaista, sillä kuvien paikallinen kymmenien minuuttien validointi valui täysin hukkaan ohjelman jumiuduttua kuvien latausvaiheeseen.

3.5.7 VisualSFM

VisualSFM on ilmainen yksityis ja opetuskäyttöön tarkoitettu fotogrammetrinen 3D-skannausohjelma, jonka on kehittänyt Changchang Wu. Muiden fotogrammetristen ohjelmien tapaan VisualSFM hyödyntää kuvasarjojen yhteneviä pisteitä ja niiden metadatalasta löytyviä tietoja esimerkiksi käytetyn kameran linssistä. Näiden tietojen pohjalta ohjelma kykenee muodostamaan kolmiulotteisen pistepilven kuvatusta kohteesta. VisualSFM ohjelmaan on myös integroitu Yasutaka Furukawan PMVS/CMVS työkalu tarkemman pistepilven laskemiseen. [21]

VisualSFM ohjelman käytettävyys

Muihin projektissa käytettyihin fotogrammetrisiin ratkaisuihin verrattuna VisualSFM on hieman monimutkaisempi ohjelma 3D-skannauksen suorittamiseen. Ohjelma sisältää useita erilaisia toimintoja ja antaa huomattavasti vapaammat kädet kuvasarjojen käsittelyyn Autodeskin tuotteisiin verrattuna. Tässä työssä keskityimme kuitenkin mahdollisimman yksinkertaiseen 3D-skannauksen saavuttamiseen VisualSFM ohjelmalla, joten ohjelman käyttö ei yltenyt kovinkaan monimutkaiseksi. Toisin kuin Autodeskin 3D-skannaus ohjelmat, VisualSFM ei kykene muodostamaan kokonaista 3D-mallia kuvasarjan pohjalta. Tuloksena syntyy vain tiivis pistepilvi, joka on muunnettava täydeksi 3D-malliksi ulkopuolisella ohjelmalla esimerkiksi tässä työssä käytetyllä Meshlabilla.

Kuvasarjan muuntaminen 3D-malliksi Autodeskin ohjelmissa tapahtui napin painalluksella pilvipalvelun toimesta, mutta VisualSFM ohjelmassa 3D-mallin muodostaminen tapahtuu paikallisesti kolmessa osassa. Kuvasarjan lataamisen jälkeen ensimmäinen toiminto on laskea kuvasarjan kuvien väliset yhtenevät pisteet. Tämän toiminnon aikana ohjelma käy kaikki kuvasarjan kuvat lävitse ja vertaa niitä muihin kuvasarjan kuviin yhtenevien pisteiden löytämiseksi. Operaation aikana kuvista muodostetaan SIFT (scale invariant feature transform) tiedostot, jotka sisältävät kuvien väliset pistetiedot. Kuvasarjan koosta ja käytetyn koneen tehoista riippuen yhtenevien pisteiden laskennassa voi kestää useita minutteja. Pisteiden määrittämisen jälkeen VisualSFM ohjelmassa ajetaan sparse reconstruction niminen toiminto, joka käy lävitse kuvista muodostetut SIFT tiedostot ja muodostaa niiden avulla yksinkertaisen kolmiulotteisen pistepilven skannatusta kohteesta

[21]. Tämä tapahtuu useimmiten muutamassa minuutissa. Rekonstruktion aikana ohjelma näyttää pistepilven syntymisen ja kuvaukseen käytetyn kameran oletetut kulmat. Tästä käyttäjä saa hyvän kuvan skannauksen onnistumisesta ja voi tarvittaessa vielä poistaa pistepilvestä huonoja kuvakulmia. Yksi VisualSFM ohjelman suurimmista eduista onkin skannauksen muokkaamisen mahdollisuus prosessin aikana. Mikäli pistepilven muodostuksen jälkeen skannaustuloksessa näkyy huonoja pisteitä tai oletettu kameran sijainti on aivan väärässä paikassa, voidaan se poistaa ennen tiiviin pistepilven laskemista skannaustuloksen parantamiseksi.

Kun yksinkertainen pistepilvi on muodostettu on sen pohjalta vielä muodostettava viimeinen tiivis pistepilvi (dense pointcloud), joka sisältää huomattavasti enemmän informaatiota yksinkertaiseen pistepilveen verrattuna. VisualSFM käyttää tiiviin pistepilven laskemiseen PMVS/CMVS työkalua, joka käyttää aiempia ohjelman laskemia tietoja kuvasarjasta tarkemman pistepilven määrittämiseksi [22]. Tiiviin pistepilven määrittäminen voi kestää useita minuutteja.

Tiiviin pistepilven laskemisen jälkeen pistepilvi täytyy viedä toiseen ohjelmaan 3D-mallin määrittämiseksi. Projektissa käytettiin Meshlab nimistä ohjelmaa pistepilvien korjaamiseen ja yhdistämiseen.

Kokonaisuudessaan VisualSFM tarjoaa vapaammat kädet 3D-skannausten suorittamiseen, mutta täydellisen 3D-mallin luominen vaatii useita toimenpiteitä ja vähintään kahta eri ohjelmaa. Toisin kuin Autodeskin tuotteissa, mallinnuksen nopeus riippuu täysin käytetyn koneen tehoista. Myöskään internet yhteyttä ei vaadita lainkaan, eivätkä verkko-ongelmat hidasta 3D-mallin muodostamista lainkaan.

Tarkempi varsinaisen ohjelman käyttöön liittyvä dokumentaatio löytyy projektin liitteistä: liite 2. Autodesk 123Dcatch, Autodesk Memento sekä VisualSFM 3D-skannausohjelmien käyttö.

VisualSFM skannaustulokset

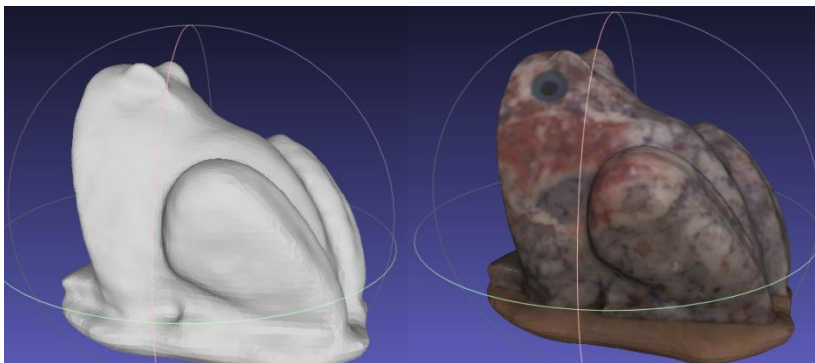
VisualSFM ohjelman skannaustarkkuuden testaamiseen käytettiin jokaisesta kolmesta työssä käytetystä skannauskohteesta otettuja kuvasarjoja. Koska aiemmin testattu 123Dcatch ohjelmisto kykenee käsittelemään vain 70 kuva kerrallaan, on skannauskohteiden testauksessa käytetty ensiksi 123Dcatch ohjelmalla testattua kuvasarjaa vertauksena. Pienen kuvasarjan lisäksi jokaisesta skannauskohteesta otettiin

100-200 kuvan sarja sisältäen myös useita lähikuvia mahdollisimman tarkan skannauksen saamiseksi.

Koska VisualSFM ohjelma muodostaa skannatusta kohteesta vain pistepilven, on pistepilven jälkikäsitteilyyn ja varsinaisen 3D-mallin muodostamiseen käytetty Meshlab nimistä ohjelmaa. Pistepilven rekonstruointiin käytettiin Meshlabin poisson surface reconstruction -algoritmia. Rekonstruktiossa käytettiin ”octree depth” -asetuksessa arvoa 11. Työssä käytetty arvo vakioitiin Meshlab:n poisson algoritmia käytettäessä skannaustulosten paremman vertailun takia.

Skannauskohde 1. kivisammakko

VisualSFM ohjelmalla kivisammakon skannauksessa käytettiin samaa 107 kuvan sarjaa kuin Mementossa. Skannaustulokseksi saatiin noin 26.000 verteksiä, mikä oli huomattavasti enemmän kuin muilla aikaisemmillä ohjelmilla.



Kuva 20. kivisammakko VisualSFM:llä

Kivisammakon muodot tulivat hyvin esille eikä varsinaisia virheitä esiintynyt lainkaan. Kohteen yksinkertaisuuden takia ei suuresta verteksitarkkuudesta ollut tässä tapauksessa oikeastaan apua, sillä samat yksityiskohdat saatiin hyvin esille huomattavasti pienemmällä tarkkuudellakin.

Skannauskohde 2. nalle

Ensimmäinen nallesta skannattu kuvasarja oli 123Dcatch ohjelmassakin käytetty 60 kuvan sarja. Skannaustuloksen tarkkuudeksi saatiin huomattavasti enemmän verteksejä kuin 123Dcatch ohjelmalla, mutta kuvien vähäisyyden takia skannaustuloksessa ilmeni huomattavia aukkoja, joista suurin oli skannattavana olevan nallen oikea käsi, joka sen hyvin harvan pistepilven seurauksena jäi uupumaan lähes kokonaan. Tästä huolimatta skannaustulos oli yllättävän tarkka vähäiseen kuvamäärään verrattuna; 24.477 verteksiä.



Kuva 21.60 kuvan nalle VisualSFM ohjelmalla Meshlabissä

Tekstuurittomassa nalleissa yleiset muodot ovat hyvin havaittavissa, mutta paidan alueella esiintyy puuttuvan käden lisäksi runsaasti virheellistä geometriaa.

Tekstuurien kanssa nalle näyttää huomattavasti paremmalta. Paidan alueen vaikeudet näkyvät hyvin myös tekstuurissa. 123Dcatch ohjelmaan verrattuna 60 kuvan sarjan tuottama skannaus on hieman tarkempi ja todenmukaisempi puuttuvaa kättä ja paidan runsasta virheellistä geometriaa lukuunottamatta.

60 kuvan sarjan lisäksi nallesta otettiin 199 kuvan sarja, joka sisälsi myös runsaan määrän lähikuvia tarkempien yksityiskohtien kaappaamiseksi. Samaa kuvasarjaa käytettiin myös aikaisemmin Mementon testaamisessa. Suuren kuvamäärän ansioista ongelmakohtista saatiin taltioitua hieman enemmän yksityiskohtia, mutta kohteen luonnollisen kiintopisteiden puutteen ja pinnan tasaisuuden takia paita jäi edelleen hyvin aukkoiseksi ja skannaustulos kärsi huomattavasti. Suurin osa kuvasarjan kuvista keskittyi kohteen yläosaan pään alueelle kohteen koon ja skannerin luonteen takia.

Tästä huolimatta 198 kuvan nalle oli verteksi tarkkuudeltaan lähes kymmenkertainen 60 kuvan skannaukseen verrattuna ja huomattavasti myös Mementoa tarkempi; skannaus ylsi 153.700 verteksin tarkkuuteen.



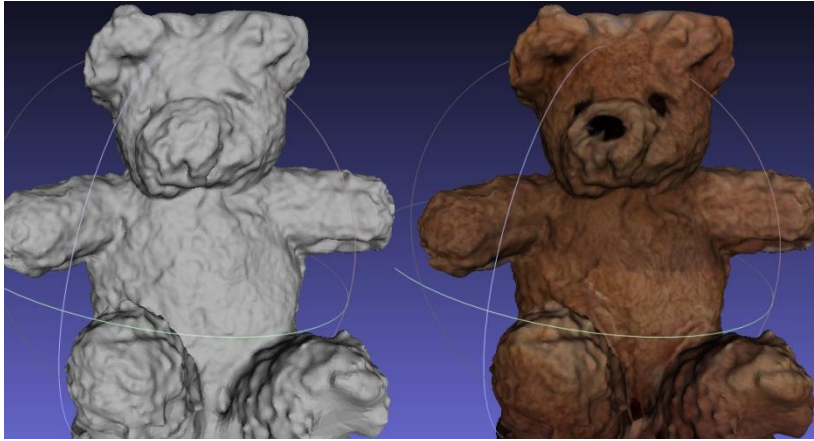
Kuva 22. 199 kuvan nalle VisualSFM ohjelmalla

Tällä kertaa nallen orgaaniset piirteet tulevat hyvin esiin varsinkin nallen päässä, minne kuvasarja oli keskittynyt eniten. 3D-mallina turkin muodostama runsas tekstuuri ei luonnollisesti näytä itsessään kovinkaan hyvältä. Oikea käsi on edelleen puutteellinen, mutta pientä edistystä on havaittavissa. Paidan alueella esiintyy myös entistä runsaammin virheellistä geometriaa.

Paidan alueen virheistä huolimatta nallen monimutkaisen pintatekstuurin muodot tulevat hyvin esille lähikuvien ansiosta. Runsas pintatekstuuri näyttää kuvatekstuurien kanssa huomattavasti paremmalta. Mementoan verrattuna VisualSFM onnistui taltioimaan suuremman määrän yksityiskohtia nallen turkin alueilta, mutta paita jäi huomattavasti Mementoa alhaisemmalle tasolle. Meshlabin poisson rekonstruktio algoritmi ei ilmeisesti toimi hyvin harvojen pistepilvi kohtien kanssa.

Paidan alueen ongelmallisuuden takia nallesta otettiin vielä kolmas 310 kuvasarja ilman nallen paitaa, joka aiheutti aikaisemmissa skannauksissa huomattavan paljon ongelmatilanteita. Kuvasarjan tarkoituksena oli tutkia VisualSFM ohjelman todellista potentiaalia suurien kuvamäärien avulla, joita muut työssä testatut fotogrammetriset ohjelmat eivät pysty käsittelemään.

Paidattoman nallen 3D-skannauksesta tuli odotetulla tavalla huomattavasti paidallista skannausta parempi tulos. 3D-malli on yhtenäinen ja virheellisen geometrian määrä on minimaalista ja keskityy pääosin nallen jalkoihin ja pään yläosaan, jonne kuvasarjan kuvat eivät täysin yltäneet. Tarkkuudeksi skannauksessa saatiin 218.000 verteksiä.

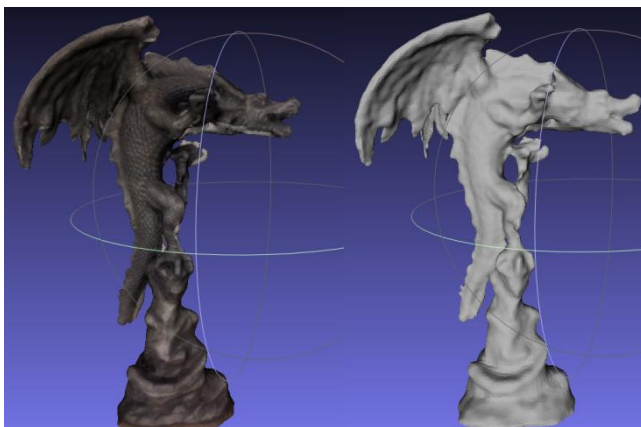


Kuva 23. paidaton nalle VisualSFM ohjelmalla

Nallen hankalasta turkkitekstuurista huolimatta nallesta onnistuttiin muodostamaan melkoisen yksityiskohtainen 3D-malli VisualSFM ja Meshlab ohjelmia hyödyntäen. Muihin työssä käytettyihin fotogrammetrisiin ohjelmiin verrattuna VisualSFM ohjelmassa on selkeästi enemmän potentiaalia yksityiskohtaisten kappaleiden skannaukseen suurilla kuvamäärillä.

Skannauskohde 3. lohikäärme

Kolmannesta skannauskohteesta otettiin runsaasti lähikuvia sisältävä 245 kuvan sarja, joka ajettiin VisualSFM ohjelmassa. Samaa kuvasarjaa käytettiin aikaisemmin Mementoa testatessa. Tulokseksi VisualSFM ohjelmalla saatiin runsaat noin 83.700 verteksiä.



Kuva 24. lohikäärme VisualSFM:llä

3D-malli lohikäärmeestä oli melkoisen tarkka ja yksityiskohtainen pientä ylimääräistä geometriaa lukuun ottamatta. Suurin osa virheistä kohdistuu lohikäärmeen kaulan alueelle, mikä selittyy sinne syntyvien varjojen avulla. Kaula ja lohikäärmeen jalka muodostavat hyvin varjostetun alueen vatsan alueelle, mistä fotogrammetrisen ohjelman

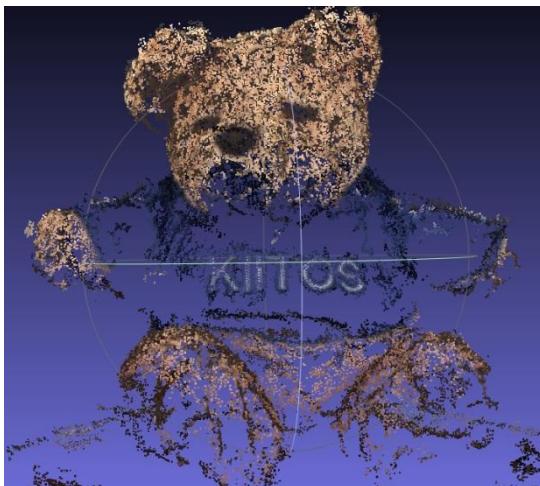
on hyvin vaikea löytää selkeitä pisteitä hyvän mallinnuksen saamiseksi. Lohikäärmeen tarkempi skannaus vaatisi skannausteltan sisäisen pehmeän valaistuksen varjostettujen alueiden kuvaamiseksi.

Kohteen ala-osien alueella esiintyi myös puuttuvaa geometriaa varsinkin hännän kohdalla. Lohikäärmeen häntä mallintui puutteelliseksi, mutta tämä johtui kuvasarjan keskittymisestä lohikäärmeen ylä-osille. Hännän täydellinen mallinnus olisi vaatinut vielä yhden kuvasarjan lohikäärmeen ala-osista, mikä olisi nostanut kuvasarjan koon varsin suureksi laboratorion koneen laskentatehoon nähden.

Muutamista virheistä huolimatta näinkin monimutkaisen ja yksityiskohtaisen kohteen skannaus onnistui suhteellisen hyvin ja kuutamien ylimääräisten kuvasarjojen avulla tuloksesta oltaisiin todennäköisesti saatu vieläkin parempi.

VisualSFM ongelmatilanteet

VisualSFM ohjelmalla näyttäisi olevan suuria hankaluuksia tasaisten ja yksityiskohdattomien pintojen kanssa. Kyseiset pinnat jäivät lähes täysin ilman pisteitä. Tästä on erityisesti haittaa 3D-mallin rekonstruktion kanssa Meshlabin puolella, sillä rekonstruktioon käytetty poisson algoritmi näytti vaativan suhteellisen tiheää pistepilvää hyvien ja tarkkojen tulosten saavuttamiseksi. Pisteiden puute näkyi selvästi paidallista nallea skannatessa ja paidan alueelle syntyikin pisteiden puutteellisuuden seurauksen runsaasti virheellistä geometriaa ja aukkoja.



Kuva 25. nallen paidan pisteiden puute

Tasaiset yksiväriset ja yksityiskohdattomat pinnat tuottavat suuria vaikeuksia fotorammetrisille menetelmille. Tarkempi kamera tai kohteen kauttaaltaan valaiseva valaistus saattaisi auttaa asiaan.

VisualSFM ohjelman käyttö laboratorion koneilla oli myös hieman vaivalloista ohjelman suurien teho vaatimusten takia. Pienet kuvasarjat onnistuivat moitteettomasti, mutta suurien yli 150 kuvan sarjojen kanssa pistepilvien laskemiseen kulunut aika kasvoi runsaasti. Esimerkiksi 245 kuvan sarjan käsittelyyn kului yhteensä noin 90 minuuttia. Myös Meshlabin käyttö pistepilvien yhdistämiseen oli hankalaa pienillä suoritusnopeuksilla. Pistepilvien siivous oli lähes aina tahmaista ja tarkempien kohteiden rekonstruktion ja teksturoinnin suorittaminen vie aikansa. Toimintojen suorittaminen kuitenkin onnistui hyvin vaatien hieman kärsivällisyyttä.

3.5.8 Skannaustulokset ja ongelmatilanteet

Aikaisemmissa kappaleissa käsiteltyjen skannaustulosten yhteenveto on esitetty alla olevassa taulukossa. Tarkkuudet on esitetty vertekseinä Meshlab ohjelmalla tarkasteltuna. Tarkkuuden perässä on myös esitetty skannauksessa käytetyn kuvasarjan koko suluissa. Skannauskohteen koolla ja yksityiskohtien määrällä on suuri merkitys skannaustulosten tarkkuuteen ja tästä syystä nallesta saadut skannaukset ovat huomattavasti tarkempia muihin kohteisiin nähden nallen suuren koon ja monimutkaisen turkkitekstuurin takia.

Taulukko 2. fotogrammetriset skannaustulokset

Skannauskohde	123Dcatch tarkkuus	Memento tarkkuus	VisualSFM/Meshlab tarkkuus
Kivisammakko	5.000 (59 kuvaa)	17.000 (107 kuvaa)	26.000 (107 kuvaa)
Nalle	10.680 (60 kuvaa)	112.000 (199 kuvaa)	153.700 (199 kuvaa) ja *218.000 (310 kuvaa)
Lohikäärme	8.579 (56 kuvaa)	64.500 (245 kuvaa)	83.700 (245 kuvaa)

*VisualsSFM ohjelman rajoittamattoman kuvakapasiteetin takia nallesta otettiin myös 310 kuvan sarja.

Skannaustulosten perusteella on selvää, että VisualSFM/Meshlab ratkaisulla suoritettavat skannaukset tuottavat huomattavasti suuremman verteksi tarkkuuden muihin ohjelmiin verrattuna. Tämä johtuu pääasiallisesti ohjelman rajoittamattomasta kuvamäärästä, jonka

avulla skannauksiin saadaan sisällytettyä huomattavasti enemmän yksityiskohtia suurien kuvasarjojen avulla. 123Dcatch tukee vain 70 kuvaa ja Memento huomattavasti suurempaa 250 kuvaa. Myös Meshlabin rekonstruktio algoritmi toimii todennäköisesti erillailla kuin Autodeskin tuotteiden algoritmit; Meshlab ei osaa yhdistää harvoja pistepilviä yhtä tehokkaasti kuin Autodeskin tuotteet, mutta luo samalla huomattavasti vähemmän ylimääräistä geometriaa aukkojen alueille. Algoritmien toimintaa on kuitenkin mahdoton vertailla, sillä Autodeskin tuotteiden käyttämästä rekonstruktioista ei ole informaatiota saatavissa.

Tarkkuudesta huolimatta Autodeskin tuotteilla oli omat etunsa varsinkin nallea skannatessa. Nallen yksityiskohdan ja tasavärinen paita aiheutti suuria ongelmia VisualSFM/Meshlab ratkaisulle muodostaen reikiä ja puutteellista geometriaa paidan alueelle (esimerkiksi puuttuva käsivarsi). Tätä ongelmaa ei Autodeskin tuotteissa ollut, sillä ohjelmat tuottivat aukottoman yhtenäisen 3D-mallin paidan tasaisuudesta huolimatta. Pieniä geometrisia virheitä esiintyi kuitenkin näissäkin ohjelmissa paidan tasaisuuden takia. Ohjelmat muodostivat myös omituisia täytegeometrioita alueille, joita kuvasarjan kuvat eivät kattaneet. Lohikäärmeen skannauksessa täytegeometrian määrä oli kuitenkin huomattavasti suurempaa; lohikäärmeen siipien välit ja suu täyttyivät poimuilla. VisualSFM ohjelmassa suu ja siipien välit taltioituivat huomattavasti paremmin ja lopputulos oli todentuntuisempi hännän poikkeamista lukuunottamatta.

Myös varsinaisia skannaukseen liittyviä ongelmatilanteita esiintyi VisualSFM/Meshlab ratkaisun puolella eniten. Skannauksen suoritus vaatii kahta melkoisen raskasta ohjelmaa 3D-mallin saavuttamiseksi, mikä aiheutti kaatuilua ja hidastelua projektissa käytetyllä tietokoneella. Itse prosessikin vaati huomattavan määrän perehtymistä hyvien tulosten saamiseksi. Monimutkaisissa skannauksissa esiintyi myös satunnaista puutteellista geometriaa, mikä johtui pääosin pintojen yksityiskohdattomuudesta tai kuvasarjan keskittymisestä toiselle alueelle. Autodeskin tuotteiden ongelmatilanteet pitäytyivät pääosin kuvasarjojen rajoitteiden sekä pilvipalvelun toimimattomuuden puolella, mikä muun muassa viivästytti skannaustuloksia melkoisesti palvelimien takkuilessa.

3.5.9 Yhteenveto

Fotogrammisten 3D-skannausratkaisujen osalta projektiin tuloksena syntyi paranneltu toimiva fotogrammetrinen skanneri, joka kykenee tuottamaan melkoisen tarkkojakin 3D-skannauksia erilaisista objekteista. Skannerin käyttö on hieman aikaa vievää, sillä skannausprosessin aikana kohteesta otetaan jopa satoja kuvia hyvän tuloksen saamiseksi.

Kuvien käsittelyyn ja 3D-mallin muodostamiseen skannerilla on käytössään kolme erilaista fotogrammetrista 3D-skannaus ohjelmistoa, jotka eriyvät toisistaan melkoisesti. 123Dcatch on helppokäyttöinen ja toimii alhaisilla kuvamäärillä. Tulosten tarkkuus on kuitenkin alhainen ja tästä syystä ohjelma soveltuu parhaiten yksinkertaisten kohteiden skannaukseen.

Memento on 123Dcatchin kaltainen huomattavasti tehokkaampi ohjelma, joka kykenee käsittelemään 250 kuvan sarjoja laadukkaiden ja tarkkojen skannausten suorittamiseksi. Mementon beta testauksen loputtua ohjelma ei kuitenkaan enään ole ilmainen eikä luultavasti käytettävissä labran fotogrammetrisen skannerin kanssa ilman lisenssin ostamista. Molemmat Autodeskin ohjelmat toimivat pilvipalveluna eivätkä tästä syystä rasita laboratorion tietokonetta lainkaan. Skannaustulosten saaminen kuitenkin kestää kymmenestä minuutista useampaan tuntiin pilvipalvelun toiminnasta riippuen.

Kolmantena 3D-skannausratkaisuna toimii VisualSFM/Meshlab ratkaisu, joka antoi testien aikana tarkimmat skannaustulokset jokaisesta testikohteesta. Ohjelmassa ei ole kuvarajaa, joten sillä pystytään tallentamaan tarvittaessa lähes kaikki kohteen yksityiskohdat lähikuvia myöten. Ongelmana tässä on kuitenkin ohjelman toimiminen paikallisella koneella, mikä aiheuttaa runsasta rasitusta koneen suorituskyvyille suurien kuvasarjojen kanssa. Skannaus vaatii myös monia eri vaiheita hyvän lopputuloksen saamiseksi ja skannausprosessi kestääkin usein puolesta tunnista muutamaan tuntiin koneen tehoista ja kuvasarjan koosta riippuen.

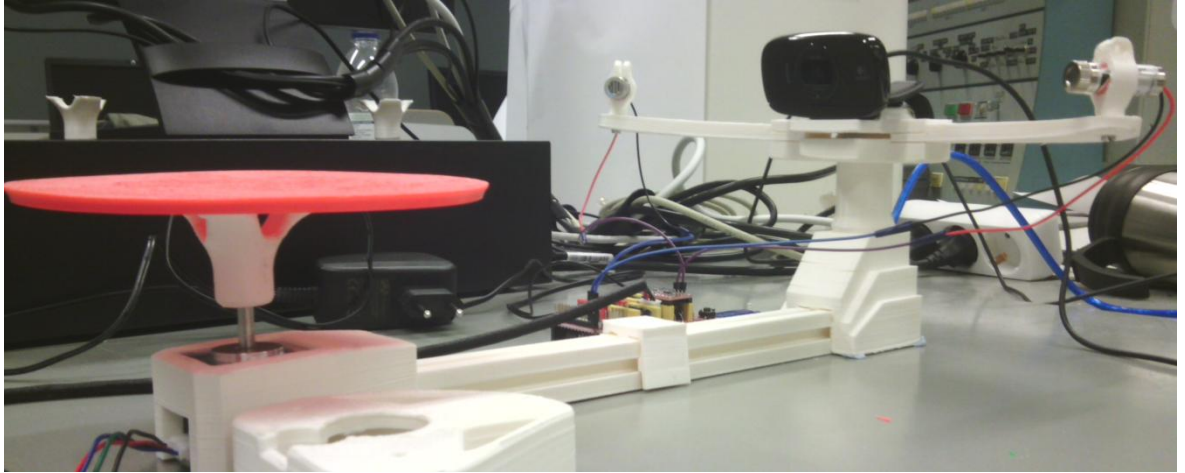
Alkuperäinen fotogrammetrisen skannerin prototyyppi toimi 123Dcatch ohjelmiston avulla ja kykeni parhaimmillaan 10.000 verteksin tarkkuuteen nallea skannatessa. Skannausympäristön optimoinnin ja useampien skannausohjelmistojen testaamisen jälkeen parhaimmat skannaustulokset yltivät yli 200.000 verteksiin. Tulosten kannalta fotogrammetrisen skannerin kehitys edistyi huomattavasti lähtötilanteesta.

3.6 Laserskanneri

Projektin toisena testattuna 3D-skannausratkaisuna toimi kolmiomittaukseen perustuva laserskannaus. Laserskannerina käytettiin itse rakennettua BQ:n Ciclops 3D-skanneriin perustuvaa pääosin 3D-tulostettua skanneria, jonka ohjelmistona toimi BQ:n kehittämä Horus 3D-skannausohjelmisto. BQ tarjoaa myös valmiiksi tulostettavat osat Ciclops 3D-skanneriinsa, mutta tässä työssä osien mallinnus ja suunnittelu suoritettiin pääosin itse.

3.6.1 Skannerin rakenne ja toiminta

Skanneri koostuu itse 3D-mallinnetuista ja 3D-tulostetuista osista, Logitech C525 webkamerasta, Arduino UNO mikrokontrollerista, CNC v3 kilvestä, askelmoottorista ja askelmoottoriajurista sekä linjalaser osoittimista.



Kuva 26. työssä rakennettu laserskanneri

Kuvasta ilmenee skannerin rakenne ja elektronisten komponenttien sijainti 3D-tulostettujen rakenteiden yhteydessä. Horus ohjelmalla skannatessa webkamera on kuitenkin kuvasta poiketen asetettuna 90 asteen kulmaan vinottain. Horuksen nykyisessä versiossa kameran kuvasyöttö käännetään automaattisesti 90 astetta eikä asetusta voida vielä näillä näkymin muuttaa. Ciclops 3D-skannerin alkuperäisessä kokoonpanossakin webkamera on asetettuna vinoon.

Jokainen skannerin rakenteellinen 3D-tulostettu osa, laser osoittimia kannattelevia siivekkeitä lukuunottamatta, mallinnettiin itse ja 3D-tulostettiin Haaga-Helian 3D- ja robotiikka laboratoriossa. Siivekkeet kuuluvat Fabio Ferretin Sardauscan nimisen 3D-skannerin rakenteisiin ja ovat vapaasti ladattavissa Sardauscanin GitHub -osoitteesta.

Skannerin toiminta perustuu kolmiomittaukseen. Kohdetta pyöritetään skannerin skannausalustalla askelmoottorin avulla samalla kun skannerin siivekkeissä sijaitsevat laser osoittimet valaisevat skannattava kohdetta vuorotellen. Laserlinjat heijastuvat kohteeseen osuessaan ja skannerin keskellä sijaitsevan webkameran avulla skannausohjelma tulkitsee laser linjojen muutoksia ja muodostaa tämän pohjalta pistepilven skannattavasta kohteesta.

Kustannuksiltaan projektissa rakennettu laser skanneri oli suhteellisen halpa. Koska skannerin rakenteelliset osat 3D-tulostettiin itse ja skannerissa käytetty webkamera oli

käytettävissä valmiiksi, skannerin kustannukset koostuivat yksinomaan elektroniikka kustannuksista. Kiinasta tilattuna Arduino Uno, CNC v3 kilpi, 2 laser linja moduulia, askelmoottori ajureineen maksoivat noin 50 euroa. Askelmoottorin virtalähteenä käytettiin käytettyä vanhaa 12v seinämuuntajaa.

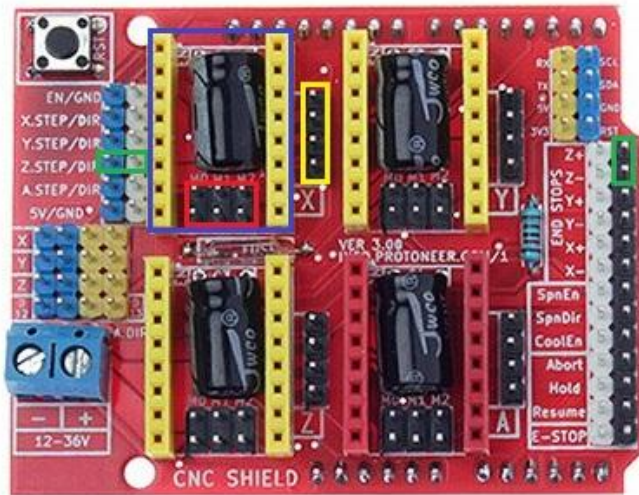
3.6.2 Skannerin kokoonpano

Skannerin rakennuksen ensimmäinen osio oli skannerin tukirakenteiden 3D-mallinnus sekä 3D-tulostaminen. Tukirakenteina olisi myös ollut mahdollista käyttää BQ labsin Ciclops 3D-skannerin GitHub sivuilta löytyviä tulostettavia rakenteita. Rakenteiden mallintaminen itse oli kuitenkin huomattavasti opettavaisempaa. Rakenteiden tulostamisen jälkeen keskityttiin skannerin laittamiseen toimintakuntoon elektroniikan osalta.

Vaikkakin projektissa rakennettu laser skanneri perustui BQ labsin kehittämään vapaan lähdekoodin Ciclops 3D-skanneriin, ei valmistajan ohjeistamia kustomoituja komponentteja ollut saatavissa. Tästä syystä skannerin robotiikkana käytettiin Arduino UNO:a sekä CNC v3 kilpeä, jotka yhdessä mahdollistivat saman toiminnallisuuden kuin valmistajan käyttämä ZUM Scan -mikrokontrolleri. BQ:n alkuperäistä firmwarea ei myöskään voitu käyttää komponenttien erilaisuuden takia; työssä käytettiin GitHubista ladattua Gyrobot käyttäjän muokkaamaa Horus firmwarea skannerin ajamiseen. Firmware on ladattavissa osoitteesta: <https://github.com/swindonmakers/horus-fw>

Laser skannerin elektroniikan kokoonpano

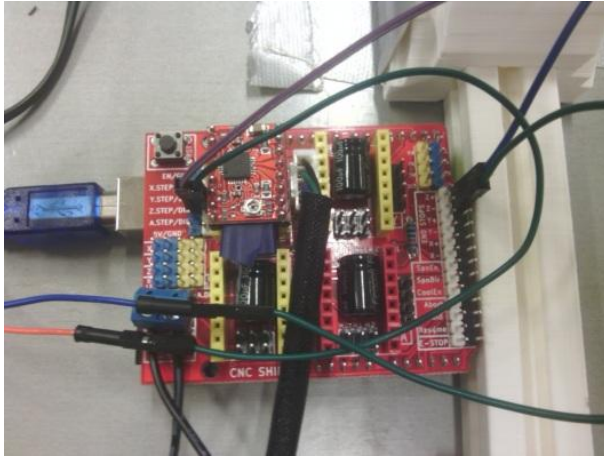
Skannerin elektroniikka koostuu Arduino UNO mikrokontrollerista, CNC v3 lisäkilvestä, kahdesta linja laser moduulista, 12v virtalähteestä, NEMA 14 kokoisesta 200 askeleen askelmoottorista sekä a4988 mallisesta askelmoottorin ajurista. CNC kilven tarkoituksena on mahdollistaa askelmoottorin ajaminen ulkoisen virtalähteen avulla. Yksikertainen lisäkilpi olisi myös mahdollista valmistaa itse huomattavasti alhaisemmin kustannuksin.



Kuva 27. Arduino Unon päälle asetettava CNC v3 kilpi

CNC kilpi kiinnitettiin suoraan Arduino UNO mikrokontrollerin päälle, siten että kilven virransyöttö sijaitsee mikrokontrollerin ulkoisen virransyötön päällä. Yllä olevassa kuvassa on merkitty värikoodein CNC kilpeen tehdyt liitännät. Lasermoduuleja ajetaan kilven Z.STEP/DIR pinneistä ja maadoitus tapahtuu END STOPS pinneistä Z+ sekä Z-. Sininen Z.STEP liitäntä on kytketty skannerin vasempaan laseriin ja valkoinen puolestaan oikeaan. END STOP maadoitus liitäntöjen paikalla ei ole väliä.

Kuvassa sinisillä reunuksilla on rajattu kilven x-akselin kontrollointiin tarkoitettu liitäntä. Tähän liitettiin skannerin askelmoottoria ajava a4988 mallinen ajuri. Ajurin kiinnityksessä on tärkeää, että ajurin EN liitäntä on liitettynä kilven EN liitäntään (vasen yläkulma x-akselin liitännässä). Näin varmistetaan, että ajuri on kiinnitetty kilpeen oikeinpäin. Kuvassa punaisella merkityn alueen liitännät kontrolloivat askelmoottoriajurin mikroaskel-tilaa. Skannerin oikeanlaisen toiminnan takaamiseksi kaikki kolme liitäntää (MS0, MS1 ja MS2) tulee sulkea. Liitännät jäävät askelmoottoriajurin alle, joten tämä on suoritettava ennen ajurin liittämistä. x-akseli liitännän oikealla puolella keltaisella rajattu liitäntä on tarkoitettu askelmoottorin kytkemiseen CNC kilpeen.



Kuva 28. skannerin liitännät mikrokontrollerin CNC v3 kilvessä

Askelmoottorin ajaminen vaatii huomattavasti enemmän jännitettä kuin mikrokontrollerin kautta voidaan syöttää, tästä syystä CNC kilven vasemmassa alakulmassa on virransyöttä liitäntä ulkoiselle virtalähteelle. Työssä käytettiin vanhaa seinäpistokkeeseen laitettavaan 12v muuntajaa, jonka virransyöttö on 1.5 ampeeria.

Firmwaren asennus mikrokontrolleriin

Elektronisen kokoonpanon jälkeen elektroniikan toiminta testattiin asentamalla Arduino UNO:lle soveltuva muokattu Horus firmware aikaisemmin mainitun Gyrobot käyttäjän GitHub osoitteesta: <https://github.com/swindonmakers/horus-fw>

Firmwaren asennus mikrokontrolleriin suoritettiin Arduino IDE ohjelman avulla. Asennus tapahtui avaamalla firmware -kansion (horus-fw) sisältämän Marlin.Ino tiedosto Arduino IDE ohjelmassa ja lataamalla se USB-kaapelilla kytkettyyn mikrokontrolleriin IDE:n upload -komennon avulla.

Elektroniikan ja firmwaren toiminnan testaus tapahtui Horus 3D-skannausohjelmaa hyödyntäen. Ohjelma mahdollistaa erikseen lasereiden sekä askelmoottorin testauksen.

3.6.3 Skannausympäristö ja skannerin kalibrointi

Aivan kuten fotogrammetrisilla menetelmillä, on skannausympäristöllä suuri merkitys myös laser skannausten tuloksiin. Myös Horus ohjelmiston kehittämän BQ:n mukaan parhaimmat skannaustulokset saadaan skannattavan kohteen ollessa tasaisessa varjottomassa valaistuksessa (25, BQ).

Tästä syystä laser skannerin skannausympäristöstä tehtiin samankaltainen kuin fotogrammetrisen skannerin kanssa. Laboratoriossa pidettiin täysi valaistus ja skannattava kohde sekä skannausalusta asetettiin ympäröivää valoa pehmentävään valoteltaan. Valotelta ratkaisu oli yksinkertainen kahdesta pahvilaatikosta ja yhteen liitetystä paperiarkeista kasattu rakennelma. Skannattavan kohteen taakse asetettiin mattamusta heijastamaton tausta, jonka tarkoituksena oli vähentää skannauksesta syntyvän kohinan määrää skannaustuloksissa. Ilman tekstuuria skannatessa valoteltaa ei välttämättä tarvita.

Valoteltan aiheuttama hämäryys skannausalueella häiritsi kuitenkin skannerin kalibrointi prosessia ja tästä syystä valotelta tulee poistaa kalibroinnin ajaksi. Horus ohjelma mahdollistaa onneksi kameran skannaus ja kalibraatio asetusten määrittämisen erikseen.

Kameran asetukset tulee katsoa kuntoon skannauskohde kohtaisesti. Asetusten määrittämisessä käytettiin Horus ohjelmiston valmistajan tarjoamaa dokumenttia: Horus: Guide For Optinum Scanning. (25, BQ).



Kuva 29. erinomainen skannausympäristö ja kameran asetukset

Myös skannattavan kohteen ominaisuudet vaikuttavat skannaustulosten tarkkuuteen. Mustat ja punaiset kappaleet ovat eritoten hankalia tallentaa punaisilla linjalasereilla; myös heijastavat pinnat aiheuttavat ongelmia tai virheitä skannauksessa heijastumien luovien virheellisten pisteiden takia. (25, BQ). Näissä tapauksissa kohteen käsittely esimerkiksi valkoisella puuterilla auttaa huomattavasti skannaustulosten kanssa.

Tämän lisäksi kalibrointi on tärkeää hyvien skannaustulosten saavuttamiseksi. Kalibrointi on syytä suorittaa aina kun skannaustuloksissa ilmenee geometrisia virheitä tai esimerkiksi pistepilven päällekkäisyyttä. Kalibrointi on myös kohdillaan, mikäli jokin

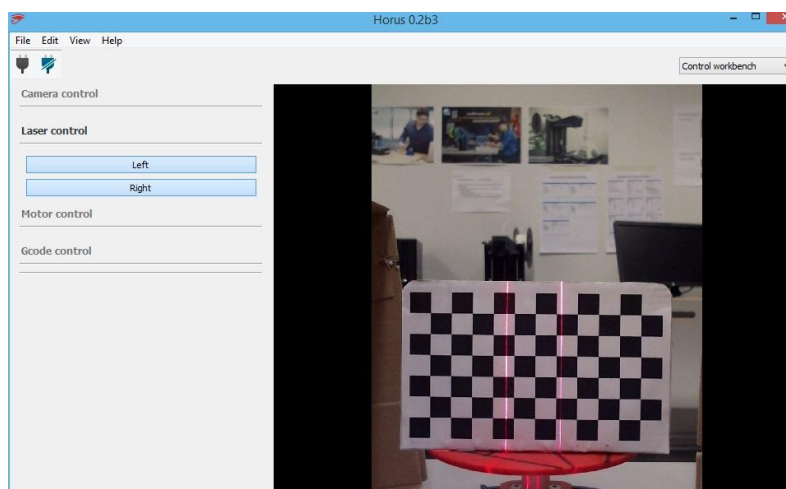
skannerin rakenteellisista osista liikahtaa liiallisesti, esimerkiksi pyörivä alusta saattaa pudota kappaletta vaihdettaessa.

Koska työssä käytettiin vapaan lähdekoodin Horus ohjelmistoa skannauksen ajamiseksi, oli ohjelman käyttöohjeet helposti saatavissa verkosta. Kalibrointi ohjeet löytyvät muun dokumentaation ohella osoitteesta: <http://diwo.bq.com/en/documentation-ciclop-and-horus/>. Kehittäjän virallinen dokumentaatio pätee myös työssä rakennettuun skanneriin, mutta toteutetun skannerin pienien rakenteellisten eroavaisuuksien takia skannerikohtainen kalibrointi on dokumentoitu erikseen.

Kalibrointia varten tehtiin shakkikuviota muistuttava kalibrointi levy, jonka avulla Horus ohjelmisto kalibroi itsensä lähes automaattisesti. Kalibrointi kuvio ladattiin ohjelmiston kehittäjän sivuilta, jotta ohjelma tunnistaa kuvion varmasti kalibroinnin yhteydessä. Tulostettu kuvio liimattiin muovipidikkeeseen kiinnitettyyn pahvilevyyn, jotta se pysyisi pystyssä. Itse tehtyä tai muuta kalibrointi levyä käytettäessä ruutujen koko, määrä ja etäisyys pyörivästä skannaus alustasta on mitattava tarkasti; tietoja tarvitaan skannerin kalibroinnissa Horus ohjelman sisällä.

Ennen kalibrointia on syytä tarkistaa, että skanneri on rakenteellisesti kunnossa. Tärkeintä on tarkistaa, että skannerin pyörivä alusta on suorassa ja hyvin paikallaan ja, että skannerin laserit leikkaavat suurinpiirtein pyörivän alustan keskipisteessä. Laser linjat on myös syytä asettaa mahdollisimman pystysuoraan kalibroinnin helpottamiseksi.

Lasereiden pystysuuntainen kohdistaminen suoritetaan ohjelmiston Control Workbench:ä hyödyntäen. Control Workbench:ssä voidaan kontrolloida lasereita manuaalisesti ja asettaa ne pystysuorasti kalibraatiolevyn mukaisesti kameran kuvasyöttöä hyödyntäen.



Kuva 30. Control Workbench ja pystysuorat laserlinjat

Pienet virheet eivät haittaa, sillä kalibrointi ottaa huomioon lasereiden ja pyörivän alustan pienet suuntavirheet. Tärkeintä on, että skannerin osat pysyvät liikkumattomana samassa tilassa kalibroinnin ja skannauksen aikana. Lasereiden kohdistus onnistuu helposti avaamalla Horus ohjelmiston ja valitsemalla Control Workbench. Laser control osiosta laserit voidaan kytkeä päälle kohdistamisen ajaksi. Varsinaisen kalibroinnin suoritus on dokumentoitu työn liitteissä: liite 4. Kalibroinnin suoritus Horus ohjelmassa.

3.6.4 Horus

Horus on vapaan lähdekoodin 3D-skannausohjelmisto, jonka on kehittänyt espanjalainen BQ. Ohjelmisto tarjoaa graafisen käyttöliittymän kolmiomittaukseen perustuville laser skannereille ja mahdollistaa skannerin yhdistämisen, hallinnan, kalibroinnin ja 3D-skannauksen suorittamisen. (27, Jesus Arroyo 2015).

Skannerin yhdistäminen Horus ohjelmistoon tapahtuu ohjelman käynnistämisen jälkeen käyttöliittymän vasemmasta yläkulmasta nuolipainikkeesta. Ennen yhdistämistä on kuitenkin syytä tarkistaa, että skannerin USB kaapeli on kiinnitettynä käytettävään tietokoneeseen ja askelmoottorin virtalähde on kytkettynä verkkovirtaan.



Kuva 31. skannerin yhdistäminen Horukseen

3.6.5 Skannerin käytettävyys

Laser skannerin käyttö oli pääosin yksinkertaista. Skannaus tapahtuu yksinomaan tietokoneen kautta Horus ohjelmistoa käyttäen, eikä skanneriin tarvitse itse koskea kalibroinnin, hienosäädön ja kappaleen vaihdon lisäksi. Skannaus tapahtuu melko yksinkertaisen käyttöliittymän kautta automaattisesti ja taltioi kohteen kattaen koko kappaleen 360 asteen kulmassa. Monimutkaisten kohteiden kohdalla kohde on helppo asettaa toiseen asentoon ja pyrkiä skannaamaan alueet joihin ensimmäinen skannaus ei päässyt.

Skannattavien kohteiden pinnan värit ja heijastuvuudet vaikuttavat voimakkaasti skannaustuloksiin; heijastavia, punaisia tai mustia kappaleita ei voida skannata hyvin

ilman esikäsitteilyä. Tästä voi koitua ylimääräistä työtä tietynlaisten kohteiden kanssa työskentellessä.

Kohteen tallentaminen pistepilveksi on laserskanneri ratkaisulla yksinkertaista, mutta VisualSFM ratkaisun tapaan pistepilvi on muunnettava 3D-malliksi itse esimerkiksi Meshlab ohjelman avulla. Varsinkin useampien yhdistettävien pistepilvien kanssa työskentellessä 3D-mallin muodostaminen yltyy melkoisen haastavaksi ja aikaavieväksi prosessiksi. Myös pistepilven normaalien laskeminen Meshlabissä osoittautui projektin aikana haasteelliseksi, eikä prosessissa onnistuttu täydellisesti kuin yhden skannauskohteen kohdalla.

Pistepilven skannauksen automaattisuuden ja nopeuden ansiosta laserskanneri on kuitenkin loppujen lopuksi huomattavasti nopeampi ja vaivattomampi ratkaisu valokuvausmenetelmiin verrattuna.

3.6.6 Skannaustulokset

Laser skannerin testauksessa käytettiin samoja skannauskohteita kuin fotogrammetrisen skannerin testauksessakin. Kohteet olivat: kivisammakko, nalle sekä lohikäärme-patsas. Skannauskohteet skannattiin käyttäen 0.225 asteen askelta hyvän ja suhteellisen nopean skannauksen suorittamiseksi. Kohteista otettiin tarvittaessa täydentävä skannaus, mikäli kohdetta ei pystytty skannaamaan kattavasti yhdellä skannauskerralla. Laser skannerin toiminnan takia kohteet on usein skannattava useammasta kulmasta; yksi skannaus ei pysty taltioimaan kohteen kaikkia kohtia.

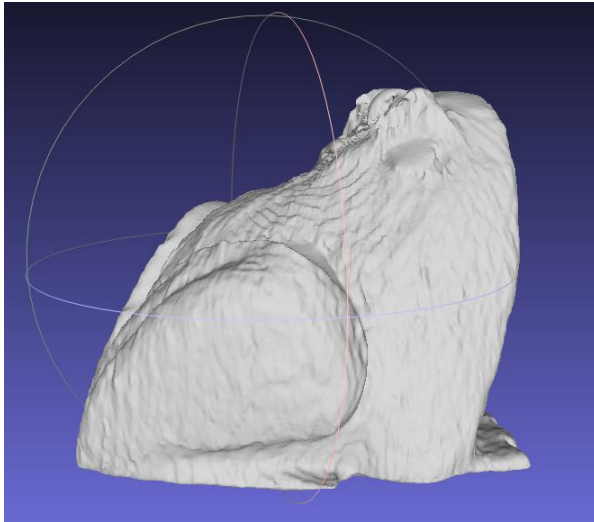
Laser skannausten tuloksena syntyi todella tiiviitä ja suuria pistepilviä fotogrammetrisiin menetelmiin verrattuna. Parhaimmillaan pistepilvet ylsivät 4 miljoonaan pisteeseen.

Skannauksen tuloksena syntyneet pistepilvet käsiteltiin Meshlab ohjelmassa; 3D-mallit luotiin poisson algoritmia hyödyntäen. Tekstuuri tuominen valmiiseen 3D-malliin suoraan pistepilvestä ei onnistunut lukuisista yrityksistä huolimatta, joten projektin aikana suoritettavat laser skannaustulokset sisältävät vain 3D-mallin ilman tekstuuria.

Rekonstruktiossa käytettiin Meshlab ohjelman puolella samoja asetuksia kuin VisualSFM ohjelmistoa testatessa (octree depth: 11, solver divide: 7), jotta skannaustulokset olisivat verrattavissa toisiinsa.

Skannauskohde 1. kivisammakko

Ensimmäinen skannauskohde oli kivisammakko, jonka skannaus laser skannerilla oli hyvin yksinkertaista. Yhden skannauksen tuloksena saatiin yli 1.3 miljoonan pisteen pistepilvi, jonka rekonstruktio tuotti 3D-mallin noin 514.000 verteksin tarkkuudella.



Kuva 32. laser skannattu sammakko Meshlabissä

Rekonstruktion tuloksena saatu 3D-malli on suhteellisen tarkka ja tallioi koko skannauskohteen, mutta pintatekstuuriltaan hyvin epätasainen. Tämä epätasaisuus johtuu todennäköisesti kivisammakon valoa heijastavasta pinnasta, mikä aiheuttaa väreilyä heijastuvissa laser säteissä tuottaen epätasaisen pinnan. Hieman pienemmällä rekonstruktio tarkkuudella Meshlab ohjelmiston puolella aaltokuviolta oltaisiin todennäköisesti välttytty, mutta verteksi tarkkuus olisi luonnollisesti alhaisempi, eivätkä kaikki tarvittava yksityiskohdat välttämättä näkyisi. Myös kohteen yläpuolella esiintyy runsaasti virheellistä geometriaa alueilla jonne lasersäde ei yhden kierroksen aikana täysin yltänyt. Myös sammakon silmien kohdalle jäi selkeät aukot silmien vielä runsaamman heijastuksen takia.

Virheistä huolimatta skannaus on hyvä ja sen tasoittaminen onnistuisi helposti 3D-mallinnus ohjelmalla esimerkiksi Blenderillä.

Skannauskohde 2. nalle

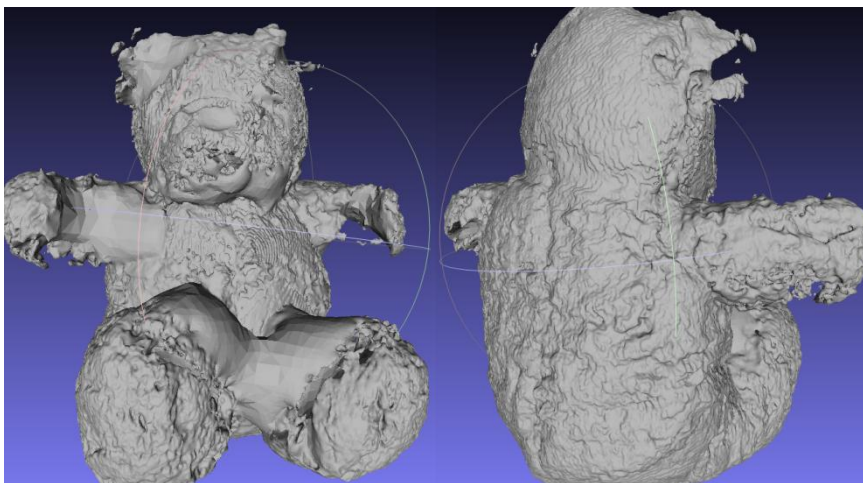
Nallen skannaaminen laserskannerilla oli ongelmallista. Lukuisista asetteluista huolimatta nallen kainaloalueita sekä jalkataipeita ei pystytty laserskannerin toiminnan takia skannaamaan. Tämän lisäksi yksittäinen skannaus jäi todella vajaaksi raajojen taiteiden

kohdalta eikä sen perusteella pystytty luomaan 3D-rekonstruktioita lainkaan. Tästä syystä nallesta otettiin 2 eri skannausta ensiksi istuma asennossa ja sitten selällään. Kaksi eri skannauskulmaa mahdollistivat lähes kokonaisen pistepilven muodostamisen, mutta valtavien pistepilvien yhdistäminen Meshlab ohjelmassa oli jatkuvan kaatuilun ja hidastelun takia hankalaa.



Kuva 33. Yhdistetty pistepilvi nallesta

Yhdistetty pistepilvi oli kattava ja tiivis; tarkkuudeltaan se oli noin 3.9 miljoonan pisteen luokkaa. Pistepilven suuruuden takia sen jälkikäsitteily oli laboratoriossa lähes mahdotonta. Pistepilven normaalivektoreiden laskennassa ilmeni runsaasti ongelmia, eikä normaaleja saatu täydellisesti kohdilleen. Tästä huolimatta pistepilvestä saatiin luotua 3D-malli, joka jäi kuitenkin runsaiden ongelmien ja aukkojen takia hyvin rumaksi. Tarkkuudeltaan rekonstruktio oli noin 1.8 miljoonaa verteksiä, mikä rekonstruktion epäonnistumisesta huolimatta kertoo paljon laserskannauksen potentiaalista.



Kuva 34. laserskannaus nallesta

Myöskään nallen turkin muoto ei onnistunut rekonstruktiossa täysin tarkasti, mikä johtuu siitä ettei kahden skannauksen muodostamia pistepilviä saatu yhdistettyä täydellisesti Meshlab ohjelmassa. Pienetkin heitot pisteiden sijainneissa voivat aiheuttaa virheellistä geometriaa lopullisessa rekonstruktiossa. Paremman jälkikäsitteilyn avulla oltaisiin voitu saada parempia ja helpommin tulkittavia tuloksia, mutta projektin olosuhteissa tämä ei valitettavasti ollut mahdollista.

Skannauskohde 3. lohikäärme

Kolmas skannauskohde kärsi samoista ongelmista kuin ensimmäinenkin: skannattava kohde oli pinnaltaan liian heijastava laserskannerin skannattavaksi. Tämä yhdistettynä kohteen monimutkaiseen muotoon ja vaikeasti skannattaviin alueisiin teki kohteen skannauksesta todella haasteellista, eikä hyvä laatuista skannausta ehditty lohikäärmepepatsasta saavuttaa lainkaan. Pistepilven skannaaminen kohteesta onnistui, vaikkakin pistepilvi oli varsinkin lohikäärmeen pään kohdalla ja siivistä hyvin harva. Yksityiskohtainen ja hieman heijastava pinta aiheutti pistepilveen huomattavan määrän ylimääräistä kohinaa ja virheitä, joiden seurauksena kunnollista 3D-mallia ei lohikäärmeestä kyetty muodostamaan lainkaan.

3.6.7 Ongelmatilanteet

Skannerin kokoamisen ja kalibroinnin jälkeen skannaustuloksissa ilmeni ongelmia. Kaikki skannaukset näyttivät muuten hyvältä, mutta skannauksen puolivälissä skannattavasta kappaleesta syntyi ikään kuin peilikuva edellisen sisään. Syynä tähän oli askelmoottorin liian nopea kierrosaika. Horus ohjelmisto on määritetty toimimaan 200 askeleen moottoreilla, mikä tarkoittaa 1.8 asteen askeltarkkuutta. Vaikka työssä käytettiin juuri oikeanlaista 200 askeleen 1.8 asteen askeltarkkuudella varustettua moottoria oli askelmoottoriajurin mikroaskel-tila väärä. Väärän mikroaskel-tilan takia moottori käytti yhden kierroksen tekemiseen puolet vähemmän askelia, jonka seurauksena ohjelmiston määrittämä 360 asteen kierto olikin askelmoottorille 720 astetta. CNC kilven askelmoottoriajuriliitännän alla sijaitsevissa mikroaskel-tilaa muuttavissa liitännöissä oli ongelma eikä kaikki liitännät olleet kunnolla suljettuja, mikä johti väärän mikroaskel-tilan käyttöön ajurissa. MS0, MS1 ja MS2 liitäntöjen huolellinen uudelleen sulku korjasi kuitenkin ongelman ja skannaustuloksissa ei enää näkynyt peilikuvia.

Laser skannausten todella suuri verteksi tarkkuus osoittautui laboratorio olosuhteissa haasteelliseksi. Pienetkin skannatut kohteet sisälsivät lähes miljoona pistettä, mikä

osoittautui todella raskaaksi laboratorion tietokoneelle Meshlab ohjelmaa käytettäessä. Varsinkin useammista skannauksista saatujen pistepilvien kanssa työskentely oli hyvin vaivalloista eikä jälkikäsitteilyyn pystytty tästä syystä keskittymään kovinkaan hyvin. Skannausten jälkikäsitteily ja siivoaminen Meshlab ohjelmassa alle 0.45 askeleen tarkkuudella tehdyissä skannauksissa on käytännössä mahdotonta laboratorion tietokoneella pistepilvin suuruuteen takia.

Pistepilvien käsittelyn aikana ilmeni ongelmia myös normaalien laskennassa. Varsinkin nallen kohdalla Meshlabin pistepilvelle määrittämät normaalit osoittivat osittain sisäänpäin eikä ongelmaan löydetty tehokasta ratkaisua. Meshlabissa ”calculate normals from point-sets” –toiminnon arvoja muuttelemalla saatiin aikaisiksi parempia tuloksia, mutta täydellinen tulos vaatisi todennäköisesti normaalien määrittämistä käsin, mikä ohjelman jatkuvan hidastelun ja kaatuilun takia oli laboratoriossa täysin mahdotonta. Normaalien virheellisen laskennan seurauksena 3D-mallien rekonstruktiossa ilmeni ongelmia eikä tästä syystä täydellisiä skannauksia saatu lainkaan työn monimutkaisista skannauskohteista. Ongelma saattaa myös johtua pistepilvien aukkoisuudesta; työssä käytetyt objektit olivat todella haasteellisia laserskannerille.

Skanneri kykeni taltioimaan skannattavan kohteen tekstuurit värilliseen pistepilveen, jota ei lukuisista yrityksistä huolimatta pystytty siirtämään valmiiseen 3D-malliin Meshlab ohjelman kautta.

3.6.8 Yhteenveto

Työssä rakennettu laserskanneri oli todella nopea ja toimiva DIY-ratkaisuksi monista erilaisista ongelmista huolimatta. Vaikka työssä valituista skannauskohteista vain yhdestä saatiin tuotettua kiitettäviä tuloksia, oli laserskannerin tarkkuus yllättävän suurta luokkaa. Todella suuret pistepilvet mahdollistavat tarkkojen 3D-mallien tuottamisen, mikäli pistepilvistä saadaan tasaisia ja aukottomia. Tähän tavoitteeseen ei tässä työssä valitettavasti vielä päästy, mutta tavoitetut tulokset kertovat laserskannerin potentiaalista todella tarkkoihin skannauksiin. Tarkemman tutkimuksen ja kokeilun tuloksena skannerista voitaisiin varmasti saada parempiakin tuloksia. Laserskannaukseen soveltuvat paremmin kohteet, jotka ovat pinnaltaan tasaisia kuten työssä käytetty kivisammakko. Tällöin tasaisten pintojen virheellinen geometria ei haittaa paljoa, pinnat voidaan tasoittaa jälkikäsitteilyssä esimerkiksi Blender ohjelmalla.

DIY-ratkaisuna laserskanneri oli suhteellisen työläs kokonaisuus. Sen rakentaminen oli hidasta 3D-mallinnuksen ja tulostamisen takia ja elektroniikan kokoaminen ja testaus vaati

kohtuulisen paljon paneutumista elektroniikan sekä mikrokontrollien toimintaan. Varsinkin firmwaren testauksessa esiintyneet ongelmat vaativat paljon selvittelyä. Tästä huolimatta DIY-laserskanneri oli kustannuksiinsa nähden tehokas 3D-skanneri.

4 Pohdinta

4.1 Skannereiden vertailu

Tässä osiossa käydään läpi työssä tutkittujen 3D-skannereiden vertailu toisiinsa nähden. Osio on jaettu kolmeen osaan: kokoonpanon, käytettävyyden sekä skannaustulosten vertailuun, joissa kussakin keskitytään kyseiseen skannereiden ominaisuuteen.

4.1.1 Kokoonpano

Toteutetuista 3D-skannereista fotogrammetrinen skanneri osoittautui huomattavasti helpommaksi toteuttaa. Työssä käytetyn skannerin kaltainen ratkaisu on myös suhteellisen yksinkertaista toteuttaa, sillä fotogrammetrisen skannerin muodolla ei periaatteessa ole väliä, kunhan se mahdollistaa skannattavan kohteen kuvaamisen useasta kulmasta mahdollisimman helposti. Yksinkertaisimmillaan skanneri voitaisiin toteuttaa pelkän kameran avulla ja kulmien vaihdos itse kameran kanssa liikkumalla. Kustannuksiltaan fotogrammetrinen skanneri on myös alhainen; skannaamiseen tarvitaan vain kamera.

Laserskanneri puolestaan oli melkoisen työläs toteuttaa. Osien 3D-tulostaminen vei paljon aikaa ja elektroniikan kokoonpano vaati hieman opettelua. Skannerin rakenne oli myös oltava juuri oikeanlainen, jotta kolmiomittaus onnistuu ohjelmistopuolella.

Fotogrammetriseen skanneriin verrattuna laserskannerin kokoonpano vaatii runsaasti enemmän aikaa, panostusta ja komponentteja. Tästä huolimatta skannerin toteutus oli suhteellisen edullista, varsinkin kun rakenteelliset osat pystyttiin tulostamaan itse.

4.1.2 Käytettävyys

Käytettävyydeltään molemmat työssä toteutetut skannerit olivat hyvin erilaisia. Fotogrammetrinen skanneri toimi hyvin pitkälti manuaalisesti; skannattavaa kohdetta pyöritetään käsin samalla kun automaattinen kuvankaappaus kaappaa tarvittavaa kuvasarjaa. Skannaukseen sisältyi myös paljon kameran siirtelyä kuvakulmien muuttamiseksi, mikä teki satojen kuvien ottamisesta melkoisen hidasta ja työlästä. Kuvien kaappauksen jälkeen skannaus suoritui suhteellisen nopeasti varsinkin pilvipalveluna toimivilla ohjelmistoilla. Paikallisella koneella toimivalla VisualSFM ohjelmalla

laboratoriossa skannaus oli kuitenkin melkoisen hidasta, mutta tehokkaammalla koneella varmasti huomattavasti nopeampaa. VisualSFM oli ainoa fotogrammetrisella skannerilla käytetty ohjelma, joka vaatii Meshlab ohjelmistoa 3D-mallin muodostamiseksi pistepilvestä. Tämä monimutkaisti ja hidasti valmiin 3D-mallin saamista melkoisesti; VisualSFM ohjelmalla työskentellessä fotogrammetrinen skannausprosessi yltyi todella hitaaksi. Hitaudesta ja monimutkaisuudesta huolimatta VisualSFM ohjelmalla saavutettiin työn ylivoimaisesti parhaimmat skannaustulokset fotogrammetrisistä ohjelmistoista.

Laserskannerilla skannauksen suorittaminen on fotogrammetriseen skanneriin verrattuna puolestaan nopeaa ja lähes automaattista. Skannaus onnistuu napin painalluksella ja skannattavan kohteen kääntäminen alustalla on tarpeen vain monimutkaisten kohteiden kohdalla, joita ei yhdellä skannauksella voida skannata kunnolla. Kohteen skannaus vie useimmiten vain murto-osan fotogrammetrisen skannerin ajasta.

Laserskannerin monimutkaisuus tulee kuitenkin esille kalibroinnissa ja VisualSFM ohjelman tapaan pistepilvien rekonstruktiossa. Skannerin kalibrointi ei itsessään ole monimutkaista, mutta hyvien kalibrointi tulosten saaminen saattaa vaatia kärsivällisyyttä ja hienosäätöä. Skanneria on myös kalibroitava melkoisen usein ainakin nykyisessä muodossaan. Fotogrammetrisella skannerilla ei puolestaan kalibrointia vaadita lainkaan. Työssä käytetty Horus 3D-skannausohjelmisto sisältää myös runsaasti erilaisia asetuksia, jotka vaikuttavat skannaustulosten tarkkuuteen. Osa asetuksista on melkoisen epäselviä ja hankalia saada kohdille ilman kokemusta (esimerkiksi laser säteiden optimointi Adjustment Workbench:ssä), mikä tekee hyvien skannaustulosten saamisesta haastavaa. Pistepilvien rekonstruktio Meshlab ohjelmassa on laserskannausten kanssa huomattavasti VisualSFM ohjelmalla tuotettuja pistepilviedostoja hankalampaa.

Pistepilvien suuntavektorit on laskettava erikseen, mikä voi osoittautua hyvinkin hankalaksi monimutkaisten skannauskohteiden kanssa. Puutteellisten skannausten täydentäminen vaatii myös useampia pistepilviä, jotka joudutaan yhdistämään käsin Meshlab ohjelmassa. Projektin aikana esiintyneiden ongelmien takia pistepilvien rekonstruktiossa ei päästy kuitenkaan täysin perille, eikä toimenpiteiden todellista haasteellisuutta voida arvioida. Fotogrammetrisillä menetelmillä skannausten täydentäminen tapahtuu huomattavasti yksinkertaisemmin; kohteesta ei tarvitse kuin ottaa muutama lisäkuva alueista joihin skannaus ei aiemmin yltänyt.

Molemmilla 3D-skannereilla oli ongelmia tietynlaisten pintojen ja tekstuurien kanssa, mikä rajoittaa niiden soveltuvuutta erilaisten kohteiden skannaamiseen. Fotogrammetrisella skannerilla oli suuria vaikeuksia yksityiskohdattomien ja tasaisten pintojen kanssa, sillä

fotogrammetriset menetelmät vaativat runsaasti yhteneviä kiintopisteitä kuvien välillä. Tästä syystä esimerkiksi testikohteena käytetyn nallen paita ei meinannut onnistua lainkaan, mutta paidaton nalle puolestaan skannautui lähes täydellisesti. Laserskannerilla ongelma on kuitenkin erilainen, laserskannerilla ei puolestaan voida skannata heijastavia, liian tummia tai punaisia pintoja lainkaan. Heijastavat pinnat vääristävät laserheijastusta aiheuttaen virheellistä geometriaa, tummat ja punaiset pinnat puolestaan hävittävät laserheijastuksen tehokkaasti eikä pistetietoa saada tarpeeksi. Tästä syystä käytettävä 3D-skanneri on syytä valikoida skannattavan kohteen ominaisuuksia silmällä pitäen.

Käytettävyydeltään molemmat DIY-ratkaisut olivat melkoisen tasavertaisia, mutta laserskannerin tarjoama automaattisuus ja nopeus teki skannausprosessista huomattavasti mukavampaa eikä uusien skannausten suorittaminen epäonnistuneiden jälkeen tuntunut liian vaivalloiselta. Fotogrammetrisella skannerilla uudelleen skannaus vie huomattavasti paljon enemmän aikaa. Fotogrammetrisen skannerin etuna käytettävyyden puolella oli 3D-mallin muodostaminen ilman ylimääräisiä ohjelmia, mikä onnistui 123Dcatch sekä Memento ohjelmilla automaattisesti pilvipalveluna.

4.1.3 Skannaustulokset

Kumpikin työssä toteutettu DIY-skanneri tuotti hyvin tarkkoja skannaustuloksia alkuperäiseen fotogrammetrisen skannerin prototyyppiin verrattuna. Työn alkaessa fotogrammetrisella skannerilla saatiin skannauksia noin 6000-10000 verteksin tarkkuudella 123Dcatch ohjelmassa, mutta valaistuksen optimoinnin ja useamman skannausohjelman testauksen jälkeen päästiin huikeaan 218.000 verteksiin samasta kohteesta VisualSFM ohjelmalla, joka osoittautui fotogrammetrisen skannerin ohjelmistoja vertailemalla tarkimmaksi työssä käytetyksi fotogrammetriseksi ohjelmistoksi. Fotogrammetrisen skannerin tulokset olivat siistejä, geometrisesti oikeanlaisia ja hyvin tarkkoja varsinkin VisualSFM ohjelmalla. Suurimpana ongelmana olivat tasaiset pinnat, jotka vähäisten kiintopisteiden takia jäivät vajaiksi valmiissa 3D-skannauksessa.

Fotogrammetrisiin menetelmiin nähden laserskannerilla onnistuttiin saamaan huomattavasti suurempia pistepilviä, mikä johtuu puhtaasti laserskannerin toiminnasta; laserlinja sisältää lukemattomia pisteitä, jotka tallennetaan yhtäaikaaisesti laserlinjan heijastuessa kohteesta. Fotogrammetrisissä menetelmissä pistepilvet ovat huomattavasti väljempiä, koska pistepilven pisteet muodostetaan yhtenevien pisteiden avulla.

Laserskannauksessa syntyneet valtavat pistepilvet mahdollistivat hyvin tarkkojen 3D-mallien muodostamisen Meshlab ohjelmalla. Koska 3D-mallien verteksi tarkkuus Meshlab

ohjelmalla riippuu hyvin pitkälti poisson algoritmissa käytettyjen arvojen suuruudesta, käytettiin laserskannerilla saatujen pistepilvien rekonstruktioon samoja arvoja kuin fotogrammetrisella skannerilla VisualSFM ohjelman kanssa. Laserskannerin tulokset olivat huomattavasti tarkempia VisualSFM ohjelman skannauksiin verrattuna. Sammakosta saatiin 518.000 verteksiä ja nallesta kahden pistepilven yhistämisen jälkeen noin 1.8 miljoonaa verteksiä. Luvut ovat huomattavasti suurempia kuin VisualSFM ohjelmalla saaduissa skannauksissa, mutta suuri verteksi tarkkuus johtuu pääosin pistepilven suuresta koosta eikä se välttämättä kerro skannauksen varsinaisesta tarkkuudesta; laserskannauksella syntyy helpommin ylimääräistä virheellistä geometriaa. VisualSFM ohjelmalla saadut tulokset olivat huomattavasti laadukkaampia pienemmästä tarkkuudestaan huolimatta. Laserskannerilla ei kuitenkaan saatu projektin aikana täydellisiä tuloksia (vain yksi skannauskohde onnistuttiin skannaamaan kiitettävästi) ja skannausten suuret pistetarkkuudet kertovat skannerin potentiaalista tuottaa hyvin tarkkoja skannauksia, mikäli kalibraatio ja olosuhteet ovat optimaaliset. Laserskannerilla ei myöskään saatu tuotettua tekstuureilla varustettuja tuloksia.

Projektin tuloksena saatiin kaksi hyvää 3D-skannausratkaisua, jotka molemmat kykenevät suhteellisen hyviin skannaustuloksiin. Näistä kahdesta kuitenkin fotogrammetrinen skanneri tuotti alhaisemmasta tarkkuudesta huolimatta huomattavasti selkeämpiä skannaustuloksia lähes jokaisella testatulla ohjelmistolla ja näistä ohjelmista VisualSFM osoittautui parhaimmaksi Meshlab rekonstruktion mahdollistamien tarkempien verteksi tarkkuuksiensa takia. Laserskanneri kaipaisi ehdottomasti lisää tutkimusta ja testailua hyvien skannaustulosten saavuttamiseksi.

4.2 Jatkokehitys

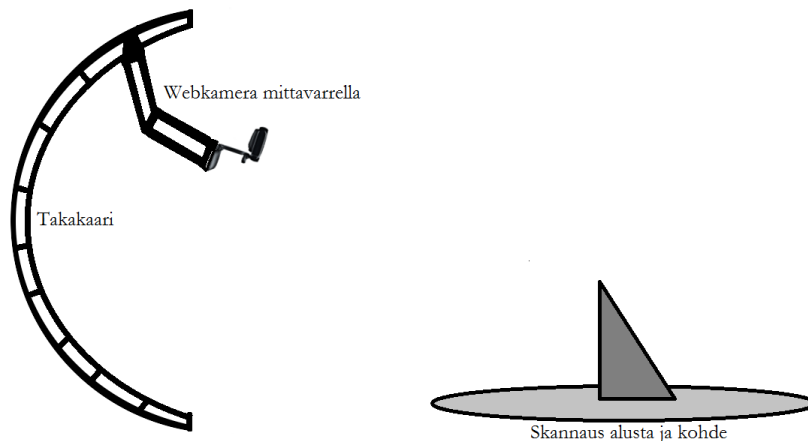
Tässä kappaleessa käydään läpi työssä toteutettuihin skannereihin kohdistuvia jatkokehitysideoita. Jatkokehitysideat ova työn aikana ja työn loppupuolella ajan puutteen tai muun seurauksena syntyneitä ajatuksia skannereiden toiminnan parantamisesta. Projektin aikana fotogrammetrinen skanneri saatiin toimintakuntoon muutamia työskentelyä helpottavia lisäyksiä lukuunottamatta. Laserskanneri puolestaan jäi hieman mysteeriksi ja sen kehittäminen vaatii varmasti huomattavasti enemmän tutkimusta ja testausta.

4.2.1 Fotogrammetrisen skannerin jatkokehitys

Työssä käytetty fotogrammetrinen skanneri on rakenteellisesti toimiva ja tuottaa kiitettäviä skannaustuloksia, mutta muutamilla jatkokehitystoimenpiteillä skannerin käytettävyyttä saataisiin parannettua huomattavasti.

Nykyisessä muodossaan skannerin webkameraa kuljetetaan skannerin taka kaarta pitkin nippusiteen avulla, mikä on helppoa, mutta ratkaisuna ehkä turhankin yksinkertainen. Webkameran kuljettaminen kaarta pitkin olisi huomattavasti käytännöllisempää, mikäli webkamera kulkisi kaarta pitkin ikään kuin kiskoilla. Tämä olisi helposti toteutettavissa 3D-tulostuksen avulla.

Myös lähikuvien ottamisen kannalta nykyinen ratkaisu on ehkä turhan yksinkertainen; lähikuvat otetaan irrottamalla kamera ja asettamalla se korokkeen päälle lähemmäksi skannausalustaa. Samainen kameran liike voitaisiin toteuttaa liittämällä kameraan esimerkiksi mittavarsi, jonka avulla kameraa voidaan siirtää lähemmäksi kuvauskohdetta. Tämä tekisi myös kuvauskulman säilyttämisestä helppoa lähikuvia ottaessa. Mittavarteen liitetty kamera kulkisi täten skannerin takakaarta pitkin ja kohteen kuvaaminen olisi huomattavasti vaivattomampaa.



Kuva 35. karkea kuvaus mahdollisesta mittavarsi ratkaisusta

C525 kameran rakenteen runsaan liikkuvuuden takia yksinkertaisellakin mittavarrella ja takakaaren kiskolla saataisiin lisättyä kameran liikkuvuutta ratkaisevasti.

Toisena jatkokehitysmahdollisuutena olisi käsin operoitavan skannausalustan motorisointi. Tarkkojen skannausten suorittaminen fotogrammetrisilla menetelmillä vaatii usein jopa satoja kuvia. Tästä syystä pyörivän alustan pyörittäminen käsin on vaivalloista ja motorisoitu alusta helpottaisi skannausprosessia huomattavasti. Alustan motorisointi Arduinoa ja askelmoottoria hyödyntäen olisi suhteellisen helppoo toteuttaa ja pyörähdykset saataisiin ajastettua helposti kameran kuvan otto välin kanssa samanlaisiksi. Haasteena kuitenkin olisi Arduinon alustaa pyörittävän ohjelman ja webkameran kuvasarjan käynnistävän ohjelman yhtäaikaisen käynnistyksen saavuttaminen.

Kolmantena jatkokehitysmahdollisuutena olisi skannerin kuvausympäristön parantaminen entisestään. Nykyinen valotelttä toimii moitteettomasti monissa kappaleissa, mutta työssä testatun lohikäärmeapatsaan kaltaiset monimutkaiset kohteet vaatisivat vahvempaa valoa kaikkien varjojen poistamiseen. Valaistuksen tulisi olla pehmeä ja valaista skannattava kohde kauttaaltaan muodostamatta varjoja skannausympäristöön. Tällainen tilanne olisi mahdollista saavuttaa esimerkiksi LED valoilla, jotka sijaitsevat skannattavan kohteen ympärillä joko ympyrän tai puoliympyrän muotoisesti vähintään kahdessa tasossa; kohteen keskipisteen yläpuolella ja alapuolella. Valojen tuottama valo on oltava pehmeää, joten LED lamput tulisi joko hiota hiekkapaperilla tai niiden eteen asettaa valoa pehmentävää materiaalia.

Skannausympäristön aiheuttamien mahdollisten virheiden takia olisi hyvä asettaa tasavärinen vihreä kangas skannattavan kohteen taakse. Tämä mahdollistaisi taustan helpon poistamisen kuvasarjasta esimerkiksi Photoshop ohjelman avulla maskausta hyödyntäen. Ilman taustaa 3D-skannaus ohjelmistot hakevat yhteneviä pisteitä ainoastaan skannattavasta kohteesta ja näin taustan aiheuttamat mahdolliset virhelaskelmat vähentyisivät. Toimenpidettä kutsutaan myös väriavaintamiseksi (chroma keying).

4.2.2 Laser skannerin jatkokehitys

Laserskanneria ei työn aikana saatu täysin toimimaan odotetulla tavalla, ja tästä syystä siihenkin kohdistuu runsaasti erilaisia jatkokehitys ja tutkimus ideoita.

Projektin aikataulun puitteissa ja runsaista yrityksistä huolimatta tekstuurilla skannatuista pistepilvistä ei saatu muodostettua tekstuurilla varustettuja 3D-malleja. Skannerin toiminnan kannalta tämä ei ole oleellista, mutta skannaustulosten paremman tarkastelun kannalta selvittämisen arvoinen prosessi. Prosessi tapahtuu Meshlab tai vastaavassa ohjelmassa.

Skannerin pyörivä alusta vaatii myös kehitystä. Kyljelleen asetettuna lohikäärmeapatsaan paino jakautui pyörivän alustan reunoille, mikä sai alustan pyörimään liian "liukkaasti". Jokaisen askelluksen jälkeen kohde pysyi mikroskooppisessa liikkeessä, mikä aiheutti epätarkkuutta skannaustuloksissa. Ongelma voisi korjautua parentelemalla pyörivää alustaa esimerkiksi lisäämällä laakeroidun tukirakenteen pyörivän alustan ympärille. Alkuperäisessä Ciclops 3D-skannerissa pyörivä alusta on esimerkiksi toteutettu tukevammin laakeroituna.

Projektin aikana laserskannerilla saatiin aikaiseksi suhteellisen hyviä pistepilviä, mutta kunnollisten 3D-mallien muodostaminen jäi vajanaiseksi työssä käytettyjen tietokoneiden alhaisten tehojen takia. Tästä syystä ei voida varmuudella sanoa onko skannerin kalibraatio ja toiminta vielä kiitettävällä tasolla. Kalibraatiota olisi syytä kokeilla toisella hieman kovemmallalla kalibrointi levyllä (esimerkiksi 3D-tulostetulle taustalle asetettuna), sillä nykyinen ratkaisu on altis liikkeelle ja tärähdyksille; tämä saattaa aiheuttaa kalibroinnissa pieniä poikkeamia.

Pistepilvien käsittelyä olisi myös syytä yrittää muilla ohjelmilla, kuten esimerkiksi CloudCompare ilmaisohjelmalla. Meshlab ohjelman puolella normaalien laskeminen osoittautui hankalaksi ja vaatisi runsaasti lisää tutustumista, sillä kiitettäviä tuloksia ei pelkällä Horus ohjelmiston ohjeistuksella saatu aikaiseksi.

Skannerin webkameran pidike suunniteltiin alunperin toimimaan kahdella eri 3D-skannausohjelmalla ja tästä syystä Horus ohjelmistoa käytettäessä kamera on käännettävä vinoon. Pidike ei kuitenkaan ole täysin suunniteltu tähän, mikä saattaa aiheuttaa ongelmia kameran kohdistamisessa. Tästä syystä skanneriin olisi syytä mallintaa uusi kamerapidike, joka mahdollistaisi kameran asettamisen 90 asteen kulmaan tiukasti ja vaivattomasti.

4.3 Opinnäytetyöprosessi ja oma oppiminen

Opinnäytetyö kulki alusta asti pääosin projektisuunnitelman mukaisesti, mutta aikataulussa ei täysin pysytty; projektin eri osioiden aikana ilmaantuneet ongelmat hidastivat työn edistymistä ja tästä syystä työ venyi useita viikkoja alkuperäistä tavoitetta pidemmäksi.

Alkuperäinen toteutettavien skannereiden määrä oli minimissään kolme, mutta tarvittavien laitteiden hankinnassa ilmaantuneiden ongelmien sekä aikataulun venymisen takia oli tyydyttävä vain kahteen skannausratkaisuun ja neljään skannausohjelmistoon. Valittuihin ratkaisuihin pystyttiin kuitenkin paneutua melkoisen tarkasti.

Kokonaisuudessaan projekti oli onnistunut ja tavoitteeseen päästiin. Haaga-Helian 3D- ja robotiikka laboratoriossa on projektin tuloksena ainakin kaksi DIY 3D-skannausratkaisua laboratoriota käyttävien henkilöiden käytettävissä. Molemmat ratkaisut vaativat jatkokehitystä, mutta tuottavat sellaisenaan kohtuu hyviä tuloksia varsinkin fotogrammetrinen skanneri.

Oppimisprosessina projekti oli hyvin opettavainen ja monipuolinen. Työn aikana perehdyttiin kattavasti 3D-skannaukseen ja sen erilaisiin toteutuksiin, mikä antoi hyvän tietopohjan 3D-skannereiden toiminnasta ja niiden tutkimisesta jatkossa.

Projektissa tarvittiin 3D-skannauksen tuntemuksen lisäksi muun muassa 3D-mallinnusta, 3D-tulostusta, elektroniikka osaamista sekä valokuvausta. Eniten henkilökohtaista oppimista 3D-skannauksen lisäksi projektin aikana tuli 3D-tulostamisesta, sillä laserskannerin rakenteiden tulostaminen vaati todella paljon työskentelyä 3D-tulostimien ja niihin liittyvien ohjelmistojen parissa. Myös elektroniikka puolella tapahtui oppimista varsinkin Arduino mikrokontrollerien kanssa työskentelystä, mistä on varmasti hyötyä jatkossakin omien projektien kanssa.

Projekti oli kaikin puolin opettavainen ja mielenkiintoinen. 3D-tekniikan tuntemuksesta on varmasti myös henkilökohtaista hyötyä tulevaisuudessa.

4.4 Lähteet

[1] 25 years of high definition 3D scanning: history, state of the art, outlook. Bernd Breuckmann. Haettu 24.1.2016. Luettavissa:

http://www.bcs.org/upload/pdf/ewic_ev14_s19paper3.pdf

[2] 3D-skannaukseen perehtyminen. Olli Santaluoto 2012. Insinööriyö, Metropolia Ammattikorkeakoulu, Insinööri (AMK), Kone- ja tuotanttekniikka. Luettu 24.1.2016.

Luettavissa: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/45691/3D-skannaukseen%20perehtyminen.pdf?sequence=1>

[3] Sakshat virtual labs. Haettu 25.1.2016. Luettavissa:

<http://coep.vlab.co.in/?sub=34&brch=106&sim=661&cnt=1>

[4] The 3D model Acquisition Pipeline 2002. Fausto Bernardini ja Holly Rushmeier. IBM Thomas J. Watson Research Center, New York. Haettu 25.1.2016. Luettavissa:

<http://www1.cs.columbia.edu/~allen/PHOTOPAPERS/pipeline.fausto.pdf>

[5] 3D-skannaamisen ja fotogrammetrian hyödyntäminen suunnittelutyössä 2011. Eetu Siitonen. Opinnäytetyö Paperikoneteknologian koulutusohjelma. Haettu 25.1.2016.

Luettavissa:

https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/31982/Siitonen_Eetu.pdf?sequence=1

- [6] Pikamallinnuksen sovellukset ja toiminnan kehittäminen 2010. Tommi Rämö. Opinnäytetyö Kymenlaakson ammattikorkeakoulu, kone- ja tuotantotekniikka / koneautomaatio. Haettu 25.1.2016.
- [7] Coordinate measuring machines 2002. Quality Digest, Kennedy Smith. Artikkel. Haettu 26.1.2016. Luettavissa: <http://www.qualitydigest.com/mar02/html/cmm.html>
- [8] Coordinate Measuring Machine History 2012. Coord3 Company. Haettu 26.1.2016. Luettavissa: <http://www.coord3-cmm.com/50-years-of-coordinate-measuring-machine-industry-developments-and-history/>
- [9] Fast and high resolution 3D face scanning. Philip Fecthteler, Peter Eisert ja Jurgen Rurainsky. Fraunhofer Institute Image Processing Department. Haettu 26.1.2016. Luettavissa: <https://www.informatik.hu-berlin.de/de/forschung/gebiete/ki/viscom/papers/icip07b.pdf>
- [10] 3D scanning with Microsoft Kinect 5.2015. Boris Landoni. Haettu 1.2.2016. Luettavissa: <http://www.open-electronics.org/3d-scanning-with-microsoft-kinect/>
- [11] 3D shape scanning with a time of flight camera. Yan Cui, Sebastian Schuon, Derek Chan, Sebastian Thrun ja Christian Theobalt. Stanford University. Haettu 26.1.2016. Luettavissa: http://ai.stanford.edu/~schuon/sr/cvpr10_scanning.pdf
- [12] Practical Uses For Photogrammetry on Archeological Excavations 12.12.2012. Adam Prins ja Matthew J.Adams. Haettu 1.2.2016 Luettavissa: <http://www.jezreelvalleyregionalproject.com/practical-uses-for-photogrammetry-on-archaeological-excavations.html>
- [13] 3D-skannaus 2014. Arto Mannila. Opinnäytetyö, Lahden Ammattikorkeakoulu. Haettu 2.2.2016. Luettavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/72724/Mannila_Arto.pdf?sequence=1
- [14] 3D scanning medical Applications. Karol Hatzilias. Haettu 2.2.2016. Luettavissa: <http://karol.hatzilias.com/medical-3d-scan/>
- [15] Medical Applications in 3D scanning 2.12.2011. Thomas Tong. Haettu 2.2.2016. Luettavissa: <http://marketing.lmi3d.com/medical-applications-in-3d-scanning>

- [16] Why utilize 3D lase scanning in a film project?. Hampron technical associates. Haettu 2.2.2016. Luettavissa: <http://www.hampton-technical.com/3d-scanning/movie-film-industry/>
- [17] [11] A primer on 3D scannin in forensics part: 1, 12.9.2009. Forensic Magazine. Eugene Liscio. Haettu 2.2.2016. Luettavissa: <http://www.forensicmag.com/articles/2009/12/primer-3d-scanning-forensics-part-1>
- [18] SHINING 3D launches new and affordable high-resolution desktop 3D scanner 13.1.2015. 3ders netti-artikkeli. Simon. Haettu 2.2.2016 <http://www.3ders.org/articles/20150113-shining-3d-launches-new-and-affordable-high-resolution-desktop-3d-scanner.html>
- [19] Eora 3D Scanner turns smartphone into a 3D scanner 20.0.2015. 3ders netti-artikkeli. Alec. Haettu 2.2.2016. Luettavissa: <http://www.3ders.org/articles/20151020-eora-3d-scanner-turns-smartphone-into-a-3d-scanner-kickstarter.html>
- [20] FreeCAD: Mechanical 3D scanner using Arduino 21.12.2014. Javier Martinez. Haettu 3.2.2016. Luettavissa: <http://linuxforanengineer.blogspot.fi/2014/12/freecad-mechanical-3d-scanner-using.html>
- [21] VisualSFM: A Visual Structure From Motion System. Changchang Wu 2011. Haettu 1.3.2016. Luettavissa: <http://ccwu.me/vsfm/>
- [22] PMVS: Patch-Based Multi-View Stereo Software. Yasutaka Furukawa ja Jean Ponce. Haettu 1.3.2016. Luettavissa: <http://www.di.ens.fr/pmvs/>
- [23] The art of photogrammetry: How to take your photos? Brandon Blizard, 19.2.2014. Haettu 8.3.2016. Luettavissa: <http://www.tested.com/art/makers/460142-art-photogrammetry-how-take-your-photos/>
- [24] Open source photogrammetry: ditching 123Dcatch. Jesse 2013. Haettu 9.3.2016. Luettavissa: <http://wedidstuff.heavyimage.com/index.php/2013/07/12/open-source-photogrammetry-workflow/>
- [25] Horus: Guide For Optinum Scanning, BQ. Haettu 20.4.2016. Luettavissa: https://static-bqreaders.s3.amazonaws.com/file/ciclop/Horus_Guide_for_Optimum_Scanning_EN.pdf

[26] Horus: User Manual, BQ. Haettu 26.4.2016. Luettavissa: https://static-bqreaders.s3.amazonaws.com/file/ciclop/Horus_User_manual_EN.pdf

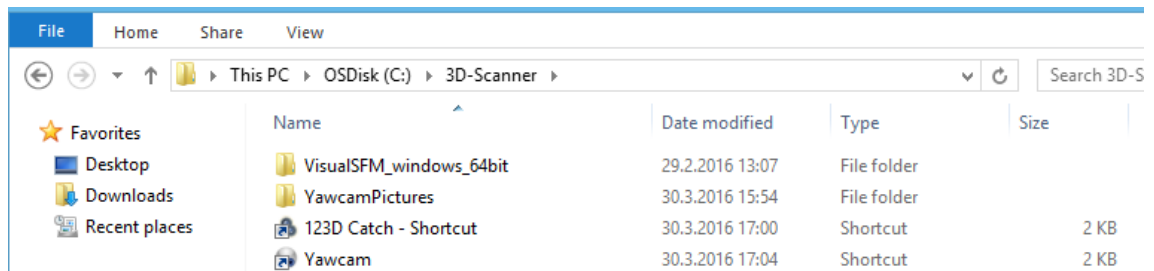
[27] Horus released under GPL license, Jesus Arroyo 2015. Haettu 26.4.2016. Luettavissa: <http://diwo.bq.com/en/horus-released/>

[28] Horus: Guide to post-processing the point cloud, BQ. Haettu 28.4.2016. Luettavissa: https://static-bqreaders.s3.amazonaws.com/file/ciclop/Horus_Guide_to_post-processing_of_the_point_cloud_EN.pdf

5 Liitteet

Liite 1. Fotogrammetrisen 3D-skannerin käyttäminen

Haaga-Helian 3D- ja robotiikka laboratoriossa sijaitsevan 3D-skannerin ohjelmistot löytyvät skannerin viereiseltä tietokoneelta C –asemalta kansiota 3D-scanner.



Kuva 36. 3D-scanner kansion sisältö

Kansio sisältää kuvankaappaukseen tarkoitetun Yawcam ohjelman, kuvien tallennus sijainnin YawcamPictures –kansion sekä 3D-mallin määrittämiseen tarkoitetut VisualSFM ja 123Dcatch ohjelmat.

3D-skannaus fotogrammetrisellä skannerilla koostuu kahdesta osiosta: kuvasarjan kaappauksesta sekä 3D-mallin muodostamisesta kuvasarjasta. Kuvasarjan kaappaaminen tapahtuu skannerin webkameralla Yawcam nimisellä ohjelmalla. Yawcam ohjelman käynnistävä pikakuvake löytyy 3D-scanner kansiota. Kuvasarjan kaappaus koostuu vähintään yhdestä kuvasarjasta, mutta hyvän skannaustuloksen saamiseksi kohteesta on syytä ottaa useampi kuvasarja eri korkeuksilta. Tämä on mahdollista kameran siirtämisellä skannerin takakaarta pitkin.

Skannauksen valmistelu

Skannattava kohde asetetaan ”skannausteltan” sisäpuolelta löytyvälle pyöreälle skannausalustalle alustan keskipisteeseen. Kohteen asettamisen jälkeen on hyvä varmistaa, että ”skannausteltoa” on hyvin suljettu, eikä ylimääräisiä valonsäteitä pääse skannausalueelle teltan aukoista. Teltan etupuolelle aivan takakaaren oikealle puolelle on syytä jättää aukko alustan ja kameran liikuttamisen helpottamista varten. On myös hyvä varmistaa, että aukosta ei pääse liiallista valoa skannausalustalle asti.



Kuva 37. skannausteltan eteen jätettävä aukko

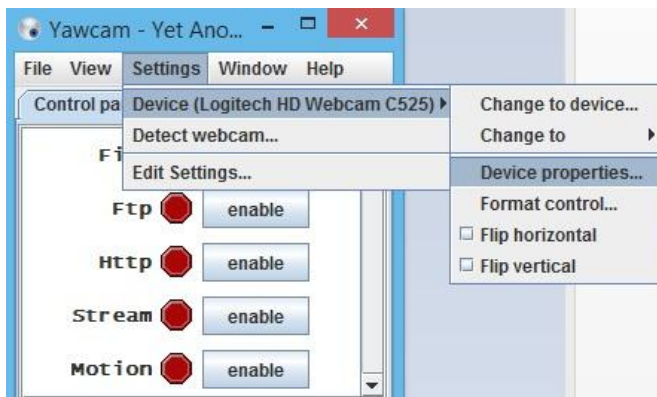
Yawcam ohjelma näyttää kuvaa skannausalueelle kohdistetun kameran näkökentästä. Ennen varsinaisen kuvasarjan ottamista, on kamera asetettava oikein hyvän kuvasarjan saamiseksi. Webkameran kuvaa hyödyntäen kamera on asetettava siten, että skannattava kohde peittää mahdollisimman paljon kameran näkökentästä, mutta pysyy kokonaisuudessaan kuvassa kohdetta pyöritettäessä. Tämä voidaan varmistaa pyörittämällä kohdetta pyörivän alustan avulla ja katsomalla kameran kuvasta, että kohde pysyy pyörähdysten aikana kameran näkökentällä. Kameraa liikutetaan siirtämällä sitä takakaarta pitkin nippusiteen avulla. Ratkaisu on ajan puutteellisuuden takia yksinkertainen raakile ja kameran kohdistaminen voi olla hankalaa, mutta tässä auttaa myös kameran omat nivelet, jotka mahdollistavat kameran tarkemman kääntämisen. Skannerin takakaarella, jossa webkamera sijaitsee on asetettuna muutamia teipinpalasia. Nämä merkinnät ovat suuntaa antavia kameran sijainteja eri kuvauskulmille.

Kuvauskohteen koosta riippuen hyvässä skannauksessa on syytä käyttää useampaa kuvauskulmaa, mutta kuvauskulmaa muutettaessa kuvasarjojen välillä kannattaa välttää liian suurta harppausta kuvasarjojen välillä. Takakaaren merkinnät auttavat tasaisessa kameran korkeuden muuttamisessa.



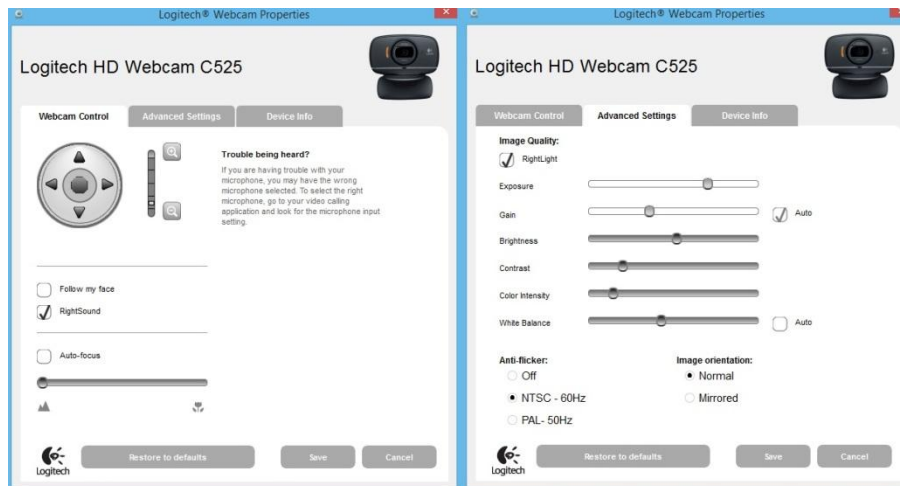
Kuva 38. webkamera ja merkinnät takakaassa

Kameraa siirrettäessä on muistettava tarkistaa kameran kuvasyötöstä kohteen näkyvyys. Ennen kuvasarjan ottamista on myös syytä tarkistaa kameran asetukset ja muokata niitä tarvittaessa hyvän kuvasarjan saamiseksi. Kameran asetukset löytyvät Yawcam ohjelmasta polusta settings – Device – Device-Device properties.



Kuva 39. Yawcam Device properties

Avaamalla Device properties valikon Yawcam käyttää Logitech Cam Controller ohjelmaa webkameran asetusten muokkaamiseen.

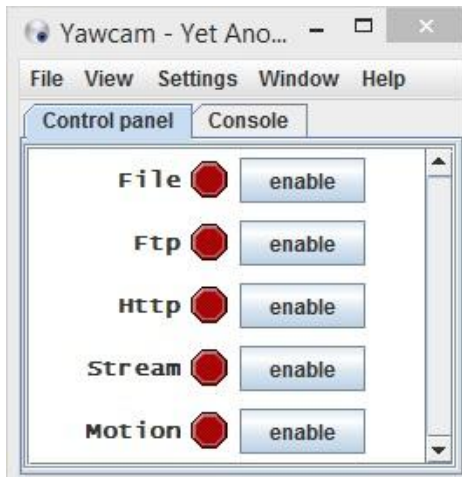


Kuva 40. Logitech Cam Controller Yawcamissä

Tärkeimmät muokattavat asetukset ovat kuvan kohdistaminen (focus) sekä advanced välilehdeltä löytyvät exposure ja gain. Automaattiasetusten käyttöä tulee välttää, sillä ne voivat helposti aiheuttaa värieroja sekä kohdistuseroja kuvasarjan kuvien välille, mikä johtaa huonoon skannaustulokseen. Asetuksien säätämisen tavoitteena on saada kohteesta mahdollisimman selkeä ja tarkka kuvasarja, mutta asetukset ovat lähes aina kohde kohtaisia, joten parhaimmat asetukset löytyvät itse kokeilemalla.

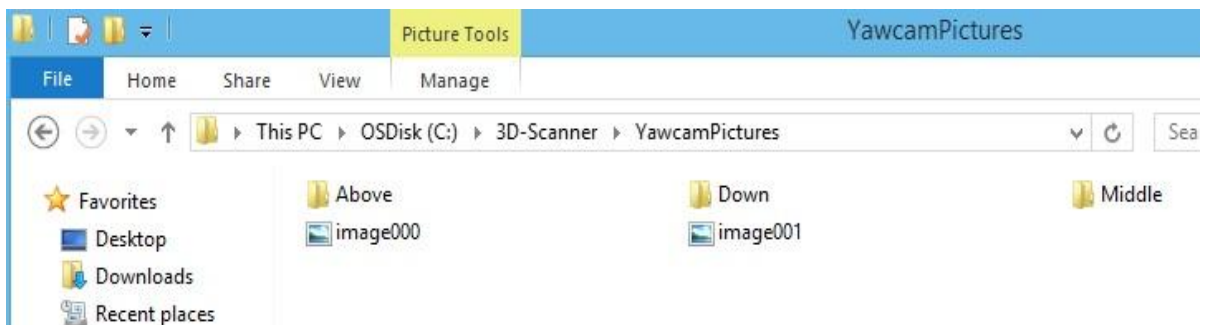
Kuvasarjan ottaminen

Kuvasarjan ottaminen tapahtuu Yawcam sovelluksen ajastetun kuvankaappauksen avulla. Ajastettu kuvakaappaus on asetettu ottamaan webkameralla kuvan 3 sekunnin välein. Käyttäjän on siis pyöräytettävä skannattavaa kohdetta pyörivällä alustalla yhden asekeleen verran 3 sekunnin välein (aikaväliä voidaan muuttaa tarvittaessa Yawcam ohjelman asetuksista Settings – Edit settings – File - Interval). Kuvakaappauksen käynnistäminen tapahtuu painamalla Yawcam control panelin enable painiketta kohdasta ”File”. Kaappauksen pysäyttäminen tapahtuu samasta painikkeesta. Käynnistyttyään värikoodi File -nimikkeen oikealla puolella muuttuu siniseksi.



Kuva 41. Yawcam control panel

Otetut kuvat tallentuvat automaattisesti kansioon C:\3D-scanner\YawcamPictures. Kuvauksen aikana on syytä pitää kyseinen kansio auki, sillä kansioon kuvankaappauksen aikana kansioon ilmestyvät kuvat antavat hyvän ajastuksen alustan pyörittämiseen. Kun kohdetta on pyöritetty 360 astetta voidaan kuvakaappaus pysäyttää. Kuvasarja on syytä tarkistaa aina kuvien ottamisen jälkeen huonojen kuvien varalta. Tästä syystä kuvia on parempi ottaa liikaa kuin liian vähän.



Kuva 42. Kuvakaappauksen kuvien sijainti

Ohjelma nimeää jokaisen kaapatun kuvan image nimellä jpg formaatissa kyseiseen kansioon. Tästä syystä kuvasarjan kaappaamisen jälkeen kuvat on syytä nimetä uudelleen ja siirtää toiseen kansioon. Esimerkiksi otettaessa 3 eri kuvasarjaa eri korkeuksilta, voidaan kuvasarjat tallentaa omiin kuvakulmaa kuvaaviin kansioihinsa: above, middle ja down. Eri kuvakulmista otettujen kuvasarjojen erittely omiin kansioihinsa helpottaa virhetilanteiden selvittämistä jatkossa huomattavasti.

Lähikuvat auttavat tarkkojen yksityiskohtien skannauksessa, mutta voivat aiheuttaa hankalauksia 3D-mallia muodostettaessa. Tästä syystä lähikuvia ottaessa on muistettava säilyttää tarpeeksi yhteneviä piirteitä kaukokuviin nähden. Nykyisessä ratkaisussa lähikuvia otetaan irrottamalla webkamera takakaaresta ja asettamalla se

korokkeella lähemmäksi skannauskohdetta. Lähikuvista on muodostettava oma kuvasarjansa.

Esimerkki skannaus voisi sisältää seuraavanlaiset kuvasarjat: yläkulmasta kauko ja lähikuvat, keskeltä kauko ja lähikuvat sekä alhaalta kauko ja lähikuvat. Useimmiten skannaus onnistuu ilman lähikuvia varsinkin yksinkertaisempien kohteiden kanssa. Kuvasarjojen tallentamisen jälkeen voidaan kuvien avulla muodostaa 3D-malli 123Dcatch tai VisualSFM ohjelmalla. (ks. Liite 2).

Ohjeet lyhyesti

1. Aseta skannauskohde alustalle, ja sulje skannaustelta. Jätä aukko takakaaren oikealle puolelle alustan pyörittämistä sekä kameran siirtämistä varten.
2. Avaa Yawcam ohjelma sekä kansio 3D-scanner\YawcamPictures
3. Kohdistu kamera skannauskohteeseen Webcam kuvaa hyödyntäen ja määritä kameran asetukset Yawcam ohjelman kautta (settings-device-properties) niin, että skannauskohde näkyy selkeästi kameran kuvasta
4. Käynnistä kuvankaappaus File painikkeella Yawcam Control Panelista ja pyöritä skannausalustaa 3s välein kunnes skannauskohde on kuvattu jokaiselta puolelta. Kuvien kaappausta voit seurata YawcamPictures kansioista.
5. Tarkista kaapatut kuvat virheiden varalta ja siirrä ne uuteen kansioon. Kuvat on myös syytä nimetä uudelleen.
6. Siirrä kameraa takakaarella toiseen kulmaan seuraavan kuvasarjan kaappaamiseksi. Älä muuta kameran asetuksia! Lähikuvia otettaessa kameran kohdistusta (focus) on syytä muuttaa yksityiskohtien tarkentamiseksi. Takakaaren merkinnät auttavat kulman muutoksessa. Liian suuri kulman muutos ei toimi. Hyvässä skannauksessa kohde tulee kuvata kauttaaltaan.
7. Kertaa kohdat 4-6 kohde on kuvattu kauttaaltaan.
8. Vie kuvasarjan kuvat 3D-skannausohjelmaan. 123Dcatch tukee 70 kuvaa, Memento 250 ja VisualSFM:ssä ei ole kuvarajaa lainkaan.

Liite 2. Autodesk 123Dcatch, Autodesk Memento sekä VisualSFM 3D-skannausohjelmien käyttö

Yleisiä ohjeita fotogrammetriseen skannaukseen

-Parhaimman skannaustuloksen saamiseksi kuvia on syytä ottaa tasaisin välimatkoin ja useasta eri kulmasta. Tarkoituksena on saada kuvattua skannattavaa kohdetta mahdollisimman yhtenevästi jokaiselta puolelta, jotta kuvien yhtäläisyyksien laskeminen onnistuu paremmin.

-Kuvauspaikan valaistuksen on myös hyvä olla tasainen. Liian kirkas tai liian alhainen valaistus vaikeuttaa yhtenevien pisteiden laskemista. Valaistusten aiheuttamat varjot on pyrittävä pitämään muuttumattomina.

-Skannattavaa kohdetta tai sen ympärillä olevia esineitä ei tule siirtää kuvien ottamisen aikana. Parhaimman tuloksen saavuttamiseksi kameran on kuljettava skannattavan kohteen ympärillä.

123Dcatch

123Dcatch sovellus on ladattavissa Autodeskin 123Dapp sivustolta tai mobiililaitteen kauppapaikalta hakusanalla 123Dcatch. Myös internet yhteys on oltava yhdistettynä.

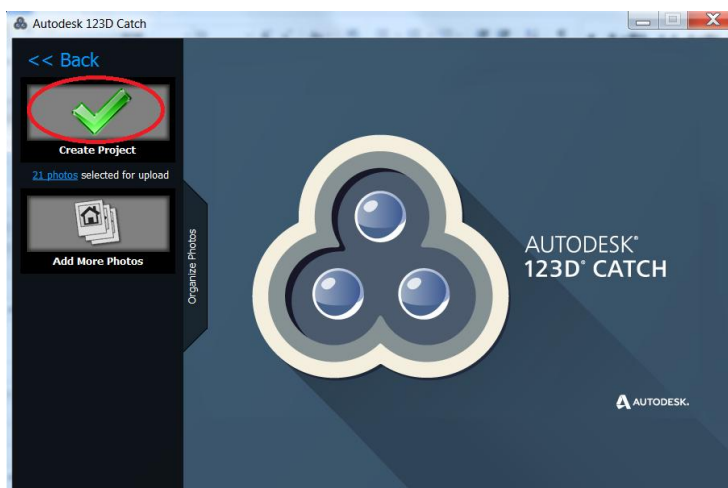
3D-skannaus tapahtuu lataamalla 20-70 valokuvaa kohteesta (mobiilisovelluksessa max. 40) 123Dcatch ohjelmaan kolmiulotteisen mallin laskemiseksi. Skannauksen ensimmäinen vaihe on kuvata skannattavaa kohdetta. Tässä muutamia seikkoja hyvän skannauksen saavuttamiseksi:

Kun maksimissaan 70 kuvaa on otettu, voidaan avata 123Dcatch ohjelma kolmiulotteisen mallin laskemiseksi. Ohjelman aloitusruudusta valitaan ”Create A New Capture”, jonka jälkeen ohjelma saattaa pyytää rekisteröitymään Autodeskin käyttäjäksi.



Kuva 43. Autodesk 123Dcatch

Rekisteröinnin jälkeen ohjelma pyytää valitsemaan skannauksessa käytettävät kuvat. Kuvien valitsemisen jälkeen ohjelma kertoo valittujen kuvien määrän ja päästää jatkamaan, mikäli kuvia on 20-70 kappaletta. Jos "Create Project" kohdassa on vihreä merkki, voidaan 3D-mallin laskelmointi aloittaa painamalla tuota kyseistä painiketta.



Kuva 44. Autodesk 123Catch

Tämän jälkeen projektille on annettava nimi, tunnisteet (tagit) ja kuvaus, minkä jälkeen kuvat siirtyvä Autodeskin pilvipalveluun laskettaviksi. Kuvien lataus ja 3D-mallin laskenta vie useita minuutteja, joskus jopa kymmeniä. Kun 3D-malli on laskettu, aukeaa saatu skannaus 123Dcatch ohjelman erillisessä ikkunassa jatkotoimenpiteitä varten. Mikäli ohjelma suljetaan laskelmoinnin ajaksi, lähetetään valmis 3D-malli annettuun sähköpostiosoitteeseen. Kun 3D-malli aukeaa, on syytä tarkistaa, että malli on ehyt ja halutun mukainen. Mikäli mallissa on ongelmia kuten reikiä ja epämuodostumia, syy on useimmiten otetuissa valokuvissa. Pienet virheet voidaan korjata jälkikäsitteilyllä, mutta jos kohde on erittäin sekava on sitä syytä kuvata uudelleen. Virheellisesti yhdistettyjä kuvia voidaan myös pyrkiä korjaamaan etismällä yhteneviä pisteitä manuaalisesti ohjelman

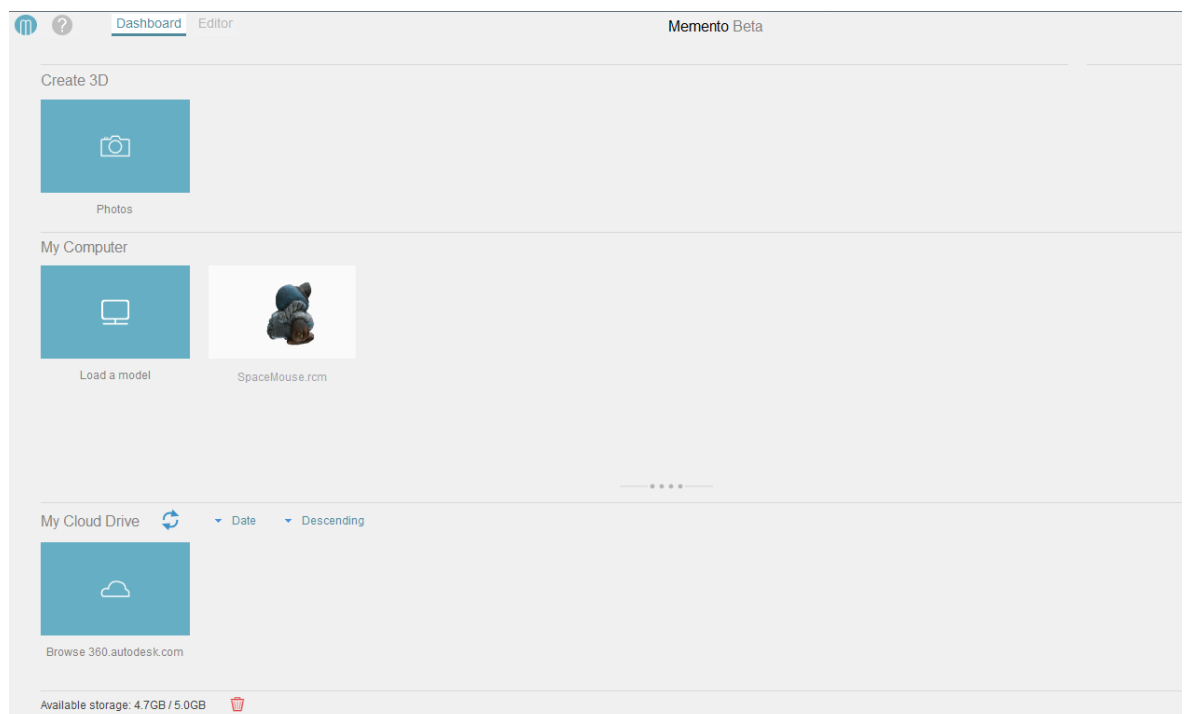
ohjeistusten mukaisesti. Ohjelma ilmoittaa kuvakohtaiset laskuvirheet ikkunan alalaidassa keltaisella kolmiolla kuvien alareunassa. Tässä ikkunassa voidaan myös siivota ylimääräisiä pisteitä pois lassotyökalun avulla skannaustuloksesta.

Täydellistä 3D tulostettavaa mallia ei pelkällä 123Dcatch ohjelmalla saada, vaan skannaustulos vaatii aina jälkikäsitteilyä tähän tarkoitukseen tehdyllä ohjelmalla. Ilmaisohjelmia ovat mm. Autodeskin Meshmixer sekä Netfabb pilvipalvelu ja vapaan lähdekoodin Meshlab sekä Blender. Jälkikäsitteilyä varten skannaustuloksena saatu 3D-malli tallennetaan .OBJ muotoon ”File - Export As” valinnan kautta.

Memento

Memento on ladattavissa osoitteesta memento.autodesk.com ja ohjelman ilmainen beta testi versio ladattiin samaisesta osoitteesta 29.2.2016. Memento on todennäköisesti muuttumassa maksulliseksi ohjelmaksi beta testinsä jälkeen, joten ohjelmaa ei välttämättä voida ladata ilmaiseksi jatkossa.

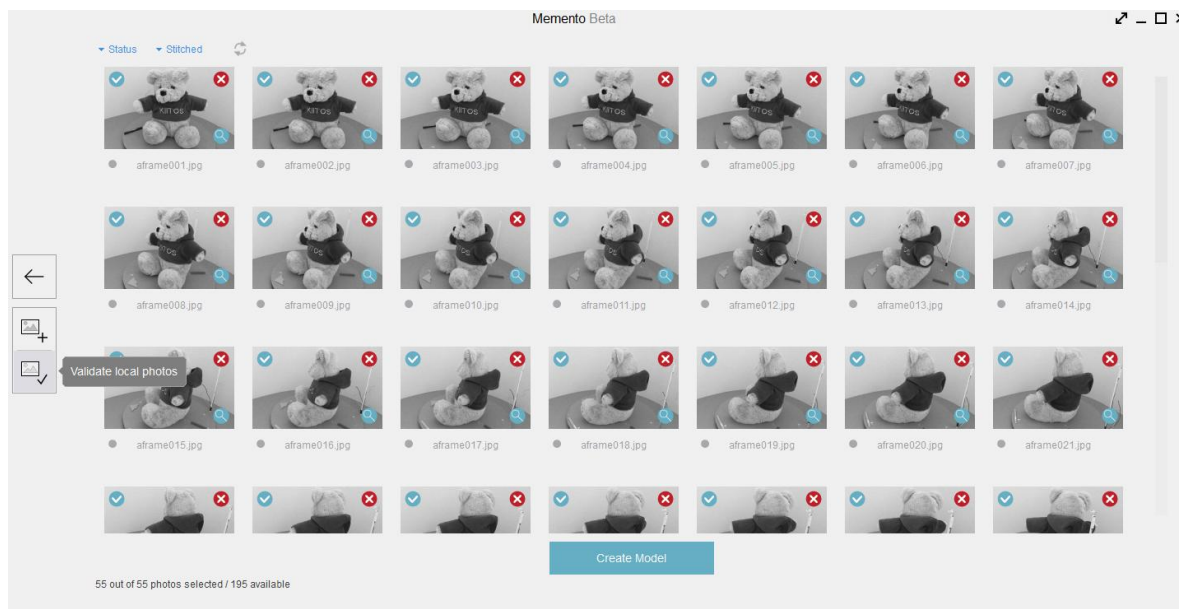
Ohjelman käynnistyttyä ohjelma vaatii toimivaa Autodesk käyttäjä tunnusta. Kirjautumisen jälkeen ohjelma avautuu dashboard ikkunaan.



Kuva 45. Mementon dashboard ikkuna

Skannauksen suorittamiseksi tarvitaan fotogrammetriaan soveltuva kuvasarja, joka koostuu maksimissaan 250 kuvasta. Kuvaukseen liittyviä vinkkejä löydät projektin kappaleesta 3.5 Fotogrammetrinen skanneri tai tämän liitteen Autodesk 123Dcatch osiosta.

3D-mallin muodostaminen aloitetaan valitsemalla dashboard ikkunasta "Create 3D". Tämän jälkeen ohjelma pyytää valitsemaan mallinnukseen käytettävä kuvasarja esimerkiksi tietokoneeltasi. Kun kuvat on valittu tulevat ne näkyviin Mementon ikkunaan alla olevan kuvan mukaisesti. "Create Model" valinnalla kuvat ladataan Autodeskin pilvipalveluun ja 3D-malli muodostetaan kuvien pohjalta. Tätä ennen on kuitenkin syytä valita ikkunan oiekasta reunasta "Validate local Photos", mikä tarkistaa kuvien soveltuvuuden 3D-mallin luomiseksi.

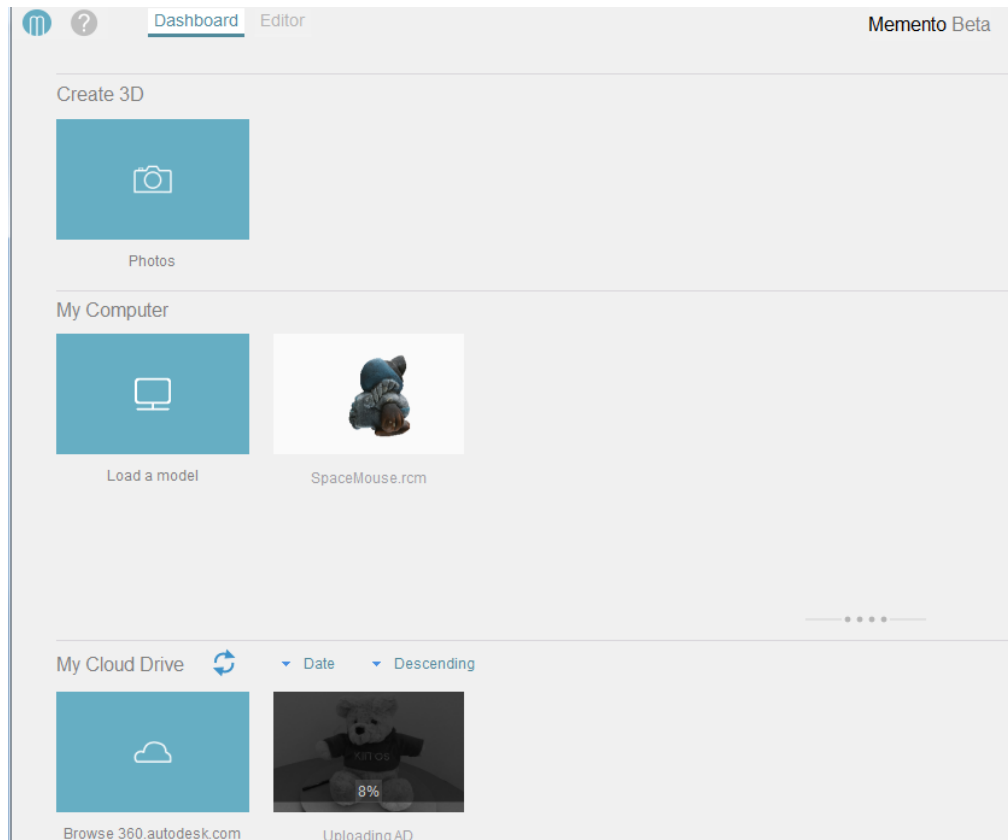


Kuva 46. kuvasarja validaatio Autodesk Mementossa

Kun kuvien tarkastus on valmistunut onnistuneesti, voidaan 3D-mallin rakentaminen aloittaa painamalla "Create Model" painiketta. Mikäli validaatio ei onnistu, on syytä tarkistaa kuvasarja huonojen kuvien varalta.

Tämän jälkeen mallille annetaan nimi ja Memento aloittaa kuvien lataamisen Autodeskin palvelimille, minkä jälkeen varsinaisen 3D-mallin muodostaminen aloitetaan. Prosessin edistymistä voidaan seurata dashboard ikkunan Cloud Drive osiosta. Palvelimen ruuhkautumisesta riippuen mallinnuksessa voi kestää kymmenestä minuutista useaan tuntiin. Kuvien latauksen (upload) jälkeen ohjelman voi sulkea mallinnuksen ajaksi ja

valmis 3D-malli saapuu ladattavaksi sähköpostitse Autodesk tiliisi määritettyyn sähköpostilaatikkoon.



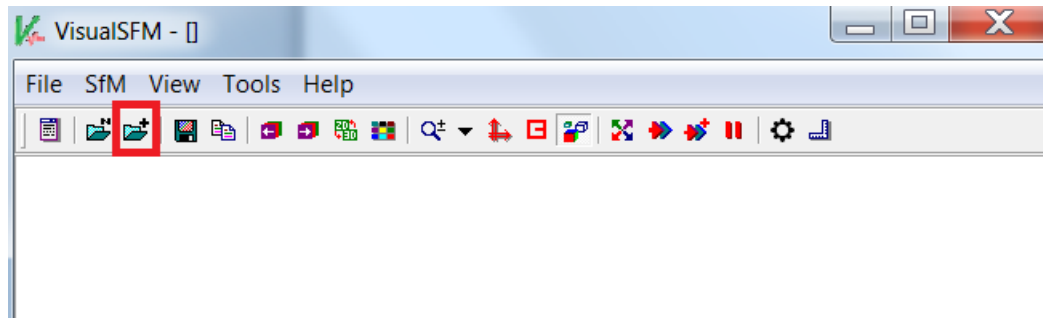
Kuva 47. 3D-mallinnuksen edistyminen Mementossa

Kun valmis 3D-malli on valmis ja ladattu koneelle, voidaan se avata Memento ohjelmalla jälkikäsitteilyä tai exporttausta varten. Tässä projektissa ei tutustuttu Mementon jälkikäsitteily ominaisuuksiin vaan jälkikäsitteily suoritettiin pääosin vapaan lähdekoodin Blender ohjelmistolla. Mementolla luodut 3D-malli on syytä exportata .obj muotoon, jotta niitä voidaan käsitellä Blenderissä tai muissa 3D-mallinnus ohjelmissa.

VisualSFM

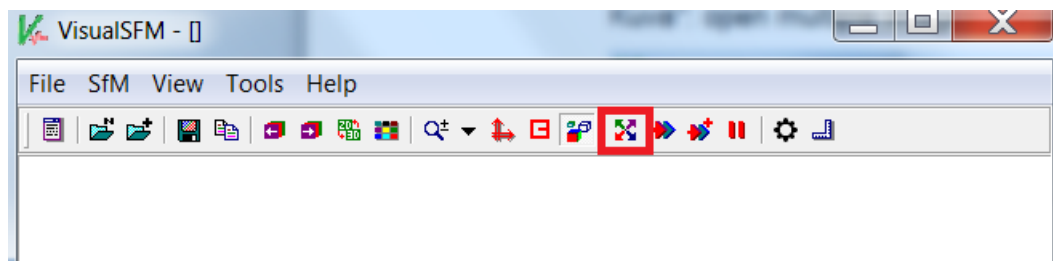
VisualSFM ohjelma on ladattavissa osoitteesta: <http://ccwu.me/vsfm/> sivusto sisältää myös kaiken tarvittavan dokumentaation ohjelman asennuksesta sekä käytöstä, mutta tässä liitteessä käymme läpi ohjelman perustoiminnot onnistuneen 3D-skannauksen suorittamiseksi.

Kun skannaukseen käytettävä kuvasarja on otettu, syötetään kuvat ohjelmaan valitsemalla yläpaneelistä valinta "open multiple images".



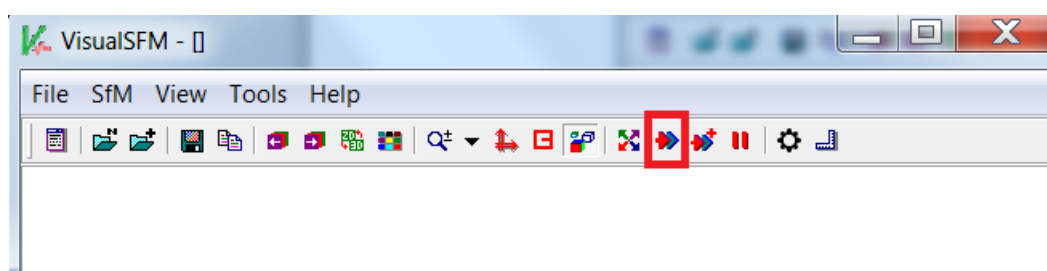
Kuva 48. open multiple images

Kuvien lataamisen jälkeen, kuvat ilmestyvät näkyville yläpalkin alla olevalle tyhjälle alueelle. Tämän jälkeen on ajettava kuvien yhteneväisyyksien määrittäminen "compute missing matches" toiminnolla.



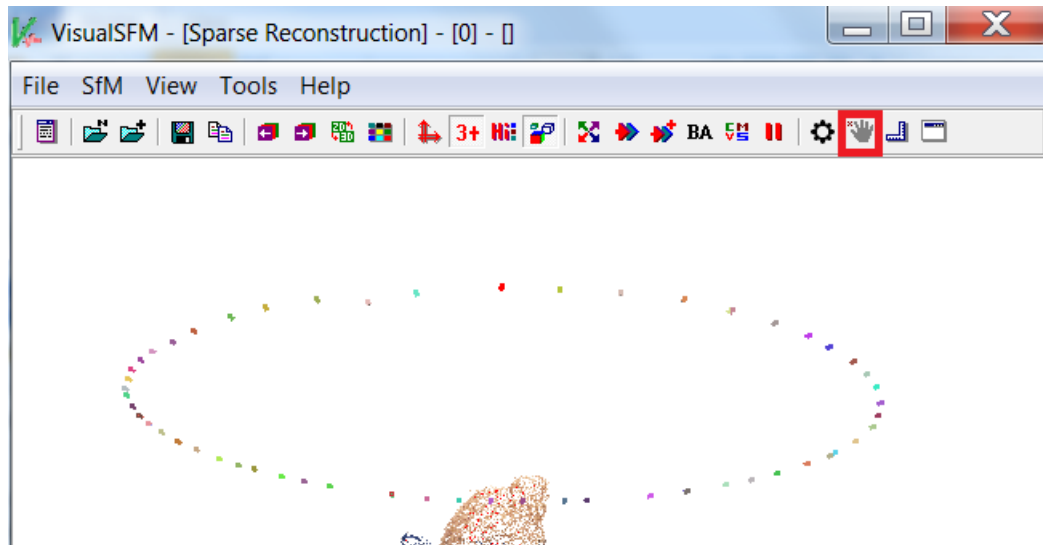
Kuva 49. compute missing matches

Tässä toiminnossa voi kestää useita minuutteja. Eri toimintojen etenemistä voidaan seurata ohjelman oikealla puolella olevasta "log window" ikkunasta. Kun toiminto on valmis, seuraavaksi muodostetaan "sparse pointcloud" "compute 3D reconstruction" toiminnolla.



Kuva 50. sparse point cloud

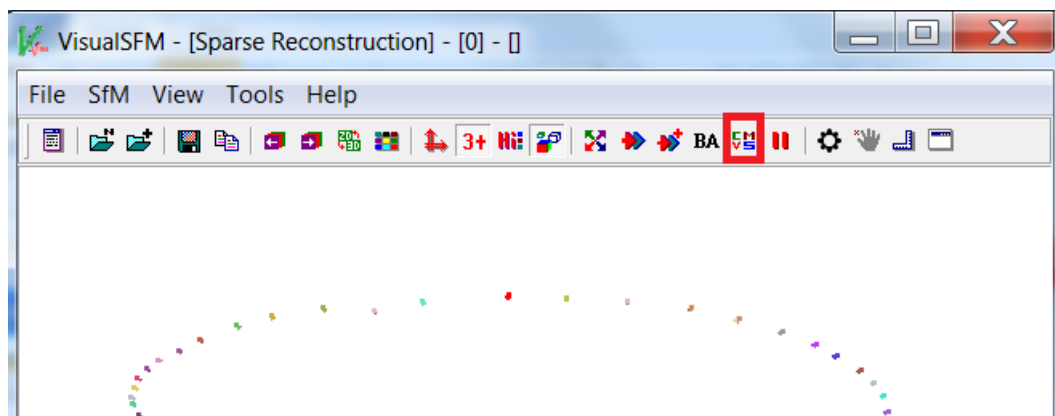
Pistepilven muodostumista voidaan seurata yläpalkin alla olevalla alueella. Pistepilven muodostamisen jälkeen kameroiden sijainti ja pistepilven laatu on syytä tarkistaa. Pistepilvi näkymästä nähdään myös oletetu kameroiden sijainnit kuvakohtaisesti ja mikäli jokin kameroista ei kuulu joukkoon voidaan se poistaa valitsemalla kyseinen kamera ja painamalla "remove selected" painiketta.



Kuva 51. remove selected

Yllä olevassa kuvassa kameroiden sijaintien laskenta on onnistunut onnistuneesti eikä kameroita tarvitse poistaa.

Kun pistepilvi ja kameroiden sijainnit ovat kunnossa, voidaan pistepilvestä muodostaa tarkempi pistepilvi "run dense reconstruction" toiminnolla (CMVS). Toiminnon valitsemisen jälkeen ohjelma pyytää valitsemaan tallennusijainnin ja nimen muodostettavalle kansiolle. Muodostettu kansio on muotoa: nimi.nvm.cmvs.



Kuva 52. dense reconstruction

Kun CMVS rekonstruktio on valmis, saadaan sen tulokset näkyviin painalla TAB painiketta. Pistepilveä ei tarvitse enää erikseen tallentaa; kaikki tarvittavat tiedostot ovat tallentuneet edellä määritettyyn kansioon.

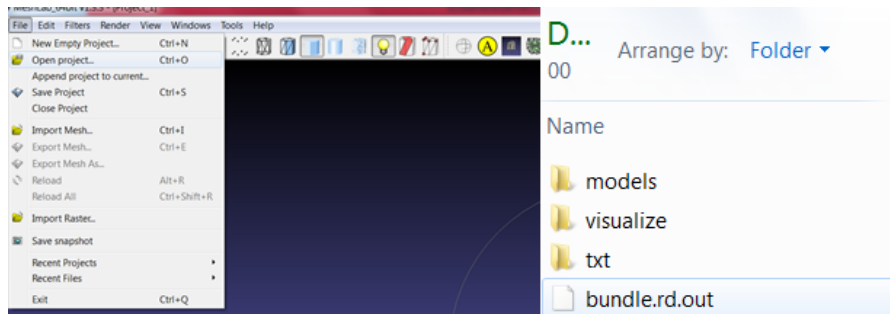
CMVS rekonstruktio luo kansiollienen erilaisia tiedostoja valittuun sijaintiin, jotka sisältävät molemmat pistepilvet sekä otettujen kuvien sijaintitiedot 3D-malliin nähden. Näitä

tiedostoja käytetään lopullisen 3D-mallin muodostamiseen esimerkiksi Meshlab ohjelmalla.

VisualSFM pistepilven muuttaminen 3D-malliksi Meshlabissä

VisualSFM:n tuottaman pistepilven muuttamiseen 3D-malliksi tarvitaan Meshlab ohjelmaa, joka on ladattavissa osoitteesta: <http://meshlab.sourceforge.net/>

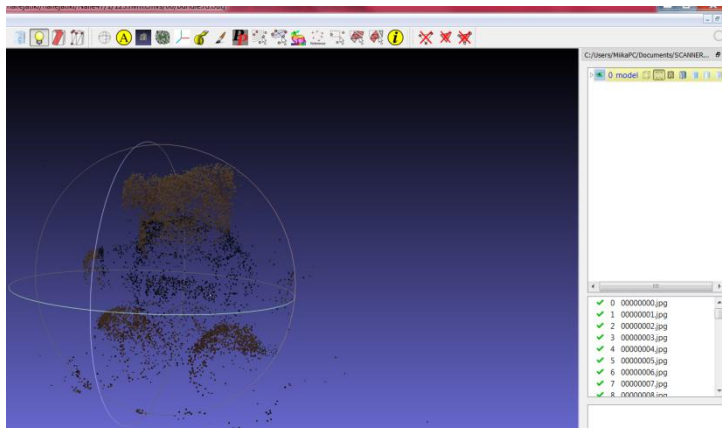
3D-mallin muodostus pistepilvestä aloitetaan avaamalla Open Project valinnalla VisualSFM ohjelman muodostama bundle.rd.out tiedoston. Tämä tiedosto löytyy CMVS rekonstruktion aikana luomasta kansioistasi kansion 00 sisältä. Esimerkki polku: C:\testi.nvm.cmvs\00\bundle.rd.out



Kuva 53. bundle.rd.out

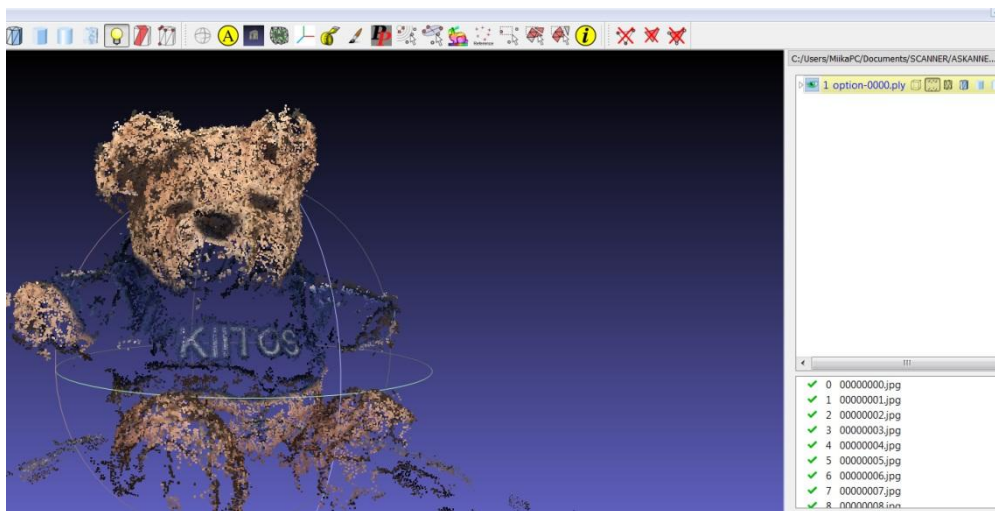
Valittuasi bundle.rd.out tiedoston aukeaa sama kansio sijainti uudelleen, mutta tällä kertaa bundle tiedoston tilalla list.txt tiedoston. Tämä tiedosto sisältää VisualSFM ohjelman muodostaman sparse pointcloud toiminnon tiedot sisältäen käytetyn kuvasarjan, kuvien yhtenevät pisteet sekä niiden pohjalta luodut koordinaatit.

Kun list.txt tiedosto on ladattu, on hyvä tarkistaa, että Meshlab ohjelmaan ilmestyy skannauskohteesi pistepilvi. View – Show Layer Dialog valinnalla saat sivupalkin näkyviin, josta on syytä tarkistaa, että käytetty kuvasarja näkyy listassa vihreineen ruksineen. Pistepilvi malli voidaan poistaa sivupalkista; vain kuvatietoja tarvitaan. Tämän list.txt tiedoston tarkoituksena on saada mallin teksturointiin käytetyt kuvainformaatiot Meshlabiin.



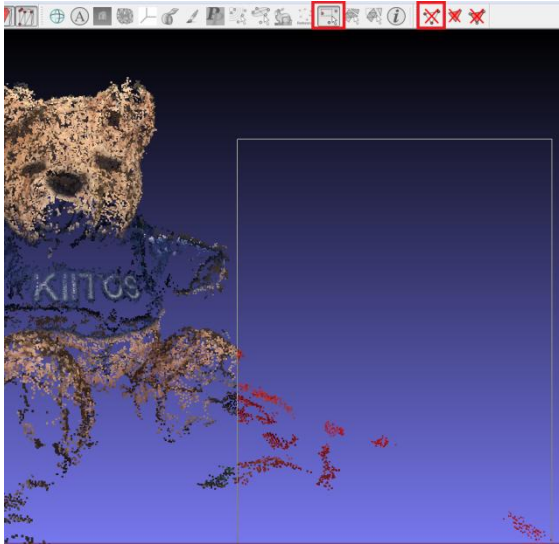
Kuva 54. list.txt Meshlab ohjelmassa

Seuraavaksi tuodaan Meshlabiin varsinainen CMVS:n muodostama dense pointcloud. Tämä tapahtuu valitsemalla File – Import Mesh. Varsinainen tarkempi käytettävä pistepilvi löytyy 00 kansion sisällä sijaitsevasta models kansioista. Esimerkiksi: testi.nvm.cmvs\00\models. Kyseessä on ply tiedosto, joka on yleensä nimeltään option-0000.ply tai vastaava. Kun ply tiedosto on avattu, tulee tarkka pistepilvi näkyviin Meshlabin ruutuun. Jos tiedostoja löytyy useampia esimerkiksi option-0001 ja option-0002, on syytä avata molemmat samanaikaisesti. Mikäli option-0000.ply tiedostoja on useampi kuin yksi, on ne yhdistettävä layer dialog ikkunassa valitsemalla alin meshi hiiren oikealla painikkeella ja valitsemalla ”flatten visible layers”. On myös syytä varmistaa, että ”keep unreference vertices” on valittuna.



Kuva 55. dense point cloud Meshlab ohjelmassa

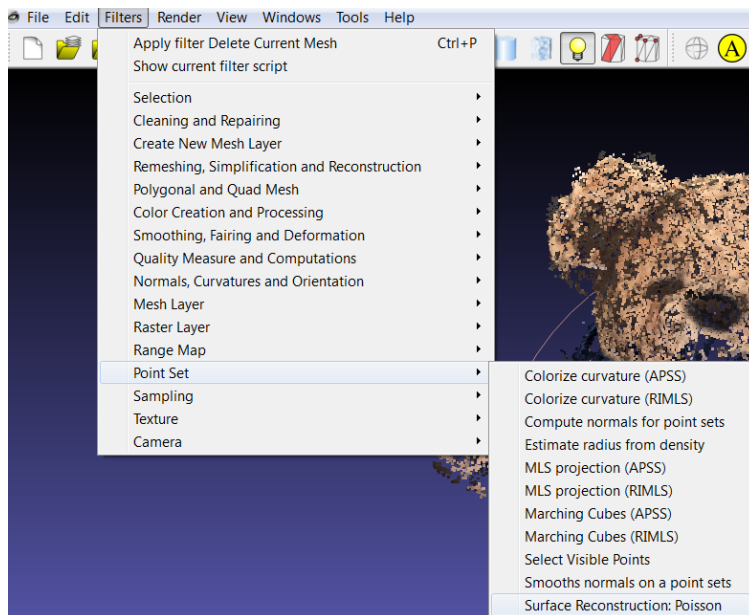
Seuraava vaihe on muodostaa pistepilven pohjalta varsinainen tiivis 3D-malli, mutta tätä ennen on syytä käydä pistepilvi läpi ylimääräisten ei-toivottujen pisteiden varalta.



Kuva 56. pisteiden valinta

Meshlabin yläpalkista löydät valinta työkalun, jonka avulla ylimääräiset pisteet voidaan valita. Valitut pisteet muuttuvat punaisiksi ja poistaminen tapahtuu valinta työkalun oikealla puolella sijaitsevasta punaisesta ruksista (ks. kuva yllä).

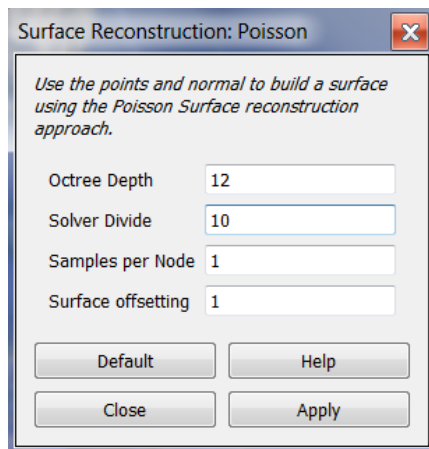
Kun ylimääräiset ja ei-toivotut pisteet on poistettu tapahtuu varsinainen rekonstruktio valitsemalla Filters – Point Set – Surface Reconstruction: Poisson.



Kuva 57. poisson algoritmi Meshlab ohjelmassa

Rekonstruktio vaatii muutamia parametreja ennen prosessin aloittamista. Octree depth vaikuttaa syntyneen 3D-mallin tarkkuuteen, mutta hidastaa prosessia huomattavasti mitä korkeammalle se asetetaan. Solver divider puolestaan auttaa vähentämään octree

depthin kasvaessa syntyvää muistin varausta. Samples per node puolestaan tasoittaa 3D-mallia. (24, Jesse 2013). Skannauskohteelle parhaimmat asetukset löytyvät kokeilemalla, mutta alla olevan kuvan kaltaiset asetukset toimivat hyvänä lähtokohtana 3D-mallin rakentamiseksi. Työn aikana käytettiin octree depth 11 sekä solver divide 7 asetuksia.

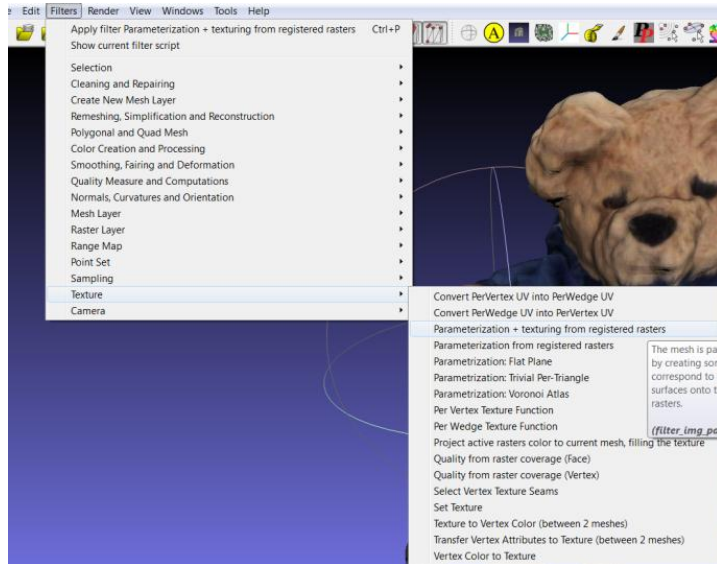


Kuva 58. poisson algoritmin asetukset

3D-mallin määrittämisessä kestää koneen tehoista ja annetuista asetuksista riippuen muutamasta sekunnista useaan minuuttiin.

Kun rekonstruktio on valmis, ilmestyy valmis 3D-malli Meshlabin ikkunaan ilman tekstuureja. Ennen tekstuurien määrittämistä, on mallista poistettava huono geometria ”select non-manifold edges” toiminnon avulla. Toiminto löytyy kohdasta Filters – Selection – Select non-manifold edges. Painamalla apply ohjelma valitsee mallista löytyvät huonoa geometriaa edustavat pisteet. Pisteet poistetaan valitsemalla yläpalkista punaisella ruksilla oleva ”delete the current set” aivan kuten ylimääräisiä pisteitä poistaessa.

Kun huono geometria on korjattu, voidaan mallille luoda tekstuurit list.txt tiedoston tietojen perusteella. Tämä tapahtuu valinnalla Filters – Texture – Parameterization + texturing from registered rasters. Valinnan jälkeen aukeavan ikkunan asetukset voidaan pitää vakiona. Kuvakoon kasvattaminen voi johtaa parempaan lopputulokseen, mutta hidastaa prosessia huomattavasti.

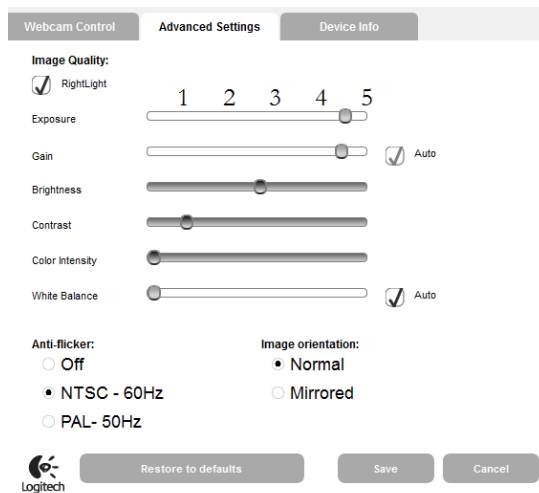


Kuva 59. tekstuurien lataus

Tekstuurien lataamisen jälkeen 3D-malli on valmis ja se voidaan tallentaa File- Export Mesh As -toiminnolla esimerkiksi jatkokäsittelyä varten.

Liite 3. Kuvausympäristön optimointi: valaistus ja kameran asetukset

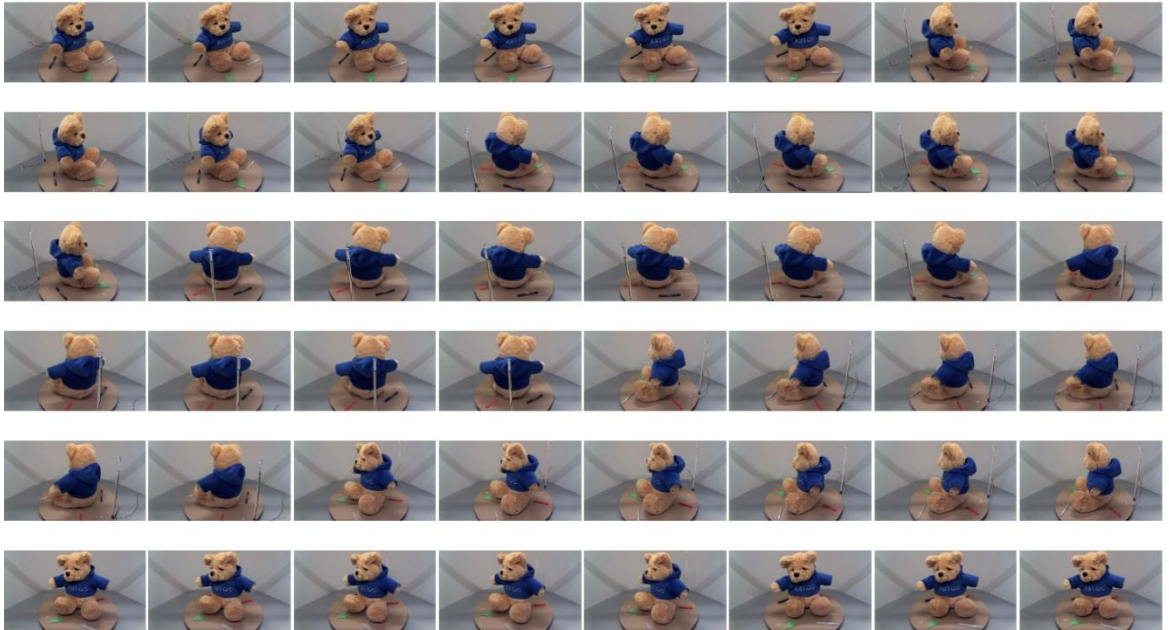
Tässä liitteessä on kuvattu Haaga-Helian 3D- ja robotiikka laboratoriossa sijaitsevan fotogrammisen skannerin kuvausympäristön ja kameran asetusten testauksessa käytetyt kuvasarjat ja tarkemmat kuvaukset käytetystä valaistuksesta ja kameran asetuksista. Kuvatut kameran asetukset ovat suuntaa antavia, sillä käytetyssä kontrollerissa ei ollut lainkaan numeerisia arvoja; asetukset toimivat liukusäätimellä. Liukusäätimen paikka on ilmoitettu murto-osissa vasemmalta oikealle luettuna (esimerkki: Kohdistus alhainen noin 1/5).



Kuva 60. Logitech Cam Controller webcam asetukset Yawcamin kautta. Asetuksista käytetyt murto-osa merkinnät lisätty havainnollistamisen vuoksi.

Kuvasarja 1

Kuvasarjassa 1 käytössä olivat vain laboratorion takavalot, jotka valaisivat kohteen päältä ja edestä. Kameran asetukset olivat seuraavanlaiset: kohdistus alhainen noin 1/5, gain alhainen noin 1/5, exposure keskipitkä noin 3/5 ja muut asetukset vakiona (default settings).

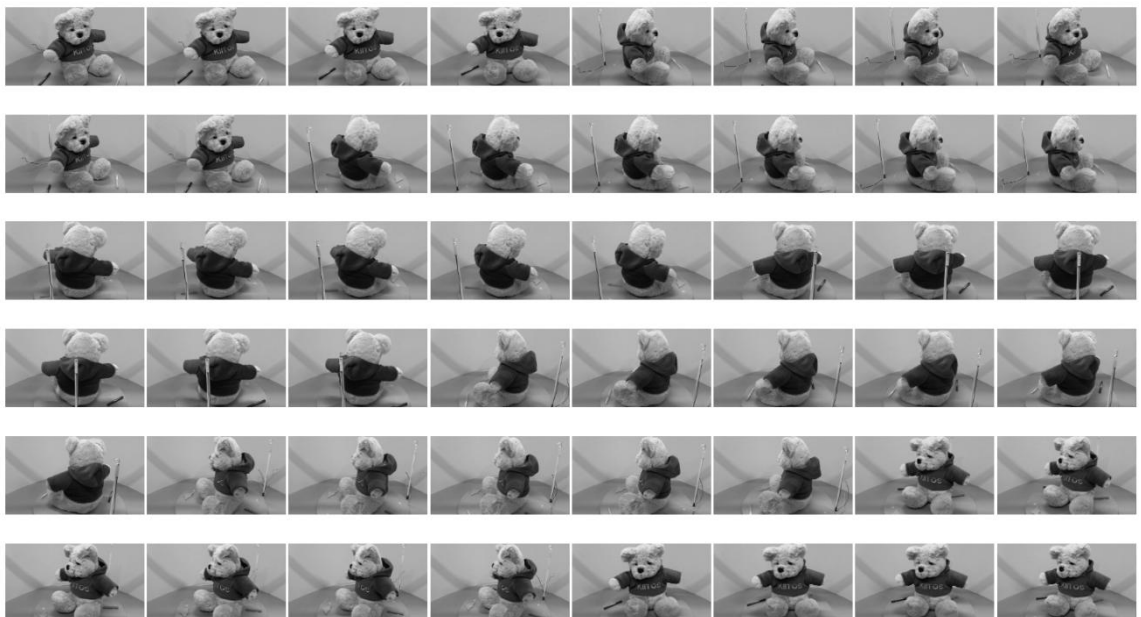


Kuva 61. kuvasarja 1

Valaistuksen takia kuva on tarkka ja virheetön, mutta valo muodostaa voimakkaita varjoja kohteeseen ja kohteen takana sijaitsevaan valkoiseen tasoon.

Kuvasarja 2

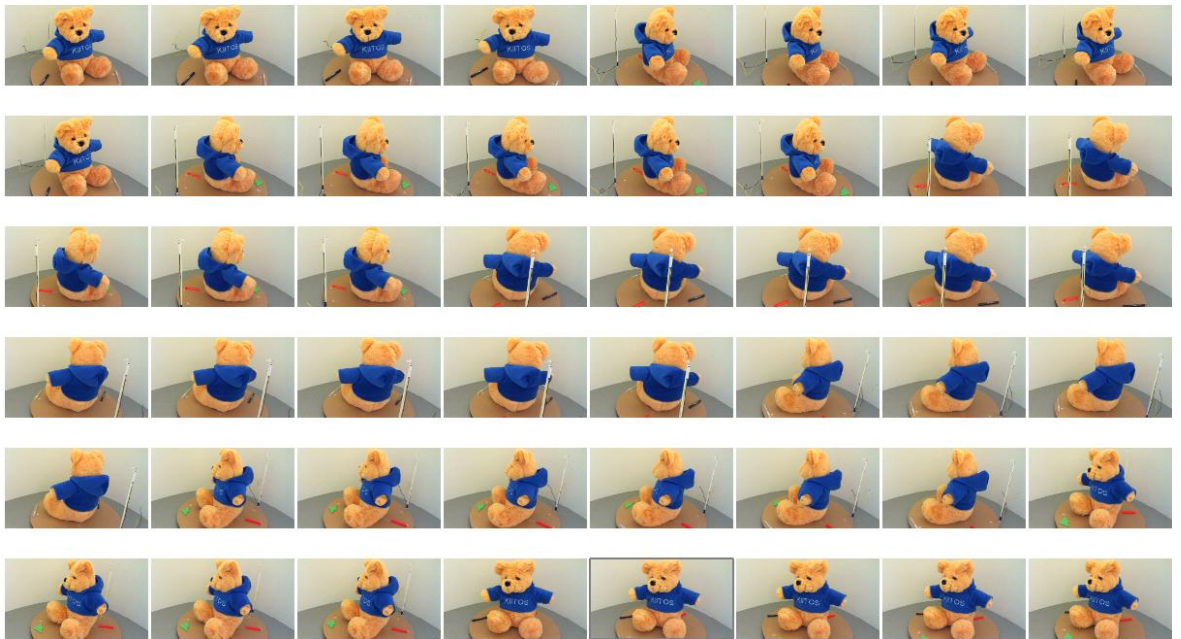
Kuvasarjassa 2 valaistus oli sama kuin kuvasarjassa 1. Kameran asetukset olivat myös identtiset, mutta kameran värikylläisyys (color intensity) asetettiin nolnaan mustavalkoisen kuvan saamiseksi.



Kuva 62. kuvasarja 2

Kuvasarja 3

Kuvasarjassa 3 valaistuksena toimi vain laboratorion etuvalot, skannattavana oleva nalli sijaitsi siis täysin varjossa, sillä kohteen takana sijaitseva valkoinen taustalevy esti etuvalojen suoran pääsyn kohteen pinnalle. Kohteen ollessa varjossa, ei kohteen pinnalle tai sen ympärille päässyt syntymään lainkaan varjoja. Kuvan pimeyden vuoksi kameran asetukset säädettiin voimakkaammiksi: kohdistus alhainen noin 1/5, exposure runsas noin 5/5, gain noin puolessa välissä 2.5/5, valoisuus puolivälissä 2.5/5, kontrasti vakio ja värivoimakkuus hieman tavallista suurempi noin 2/5.

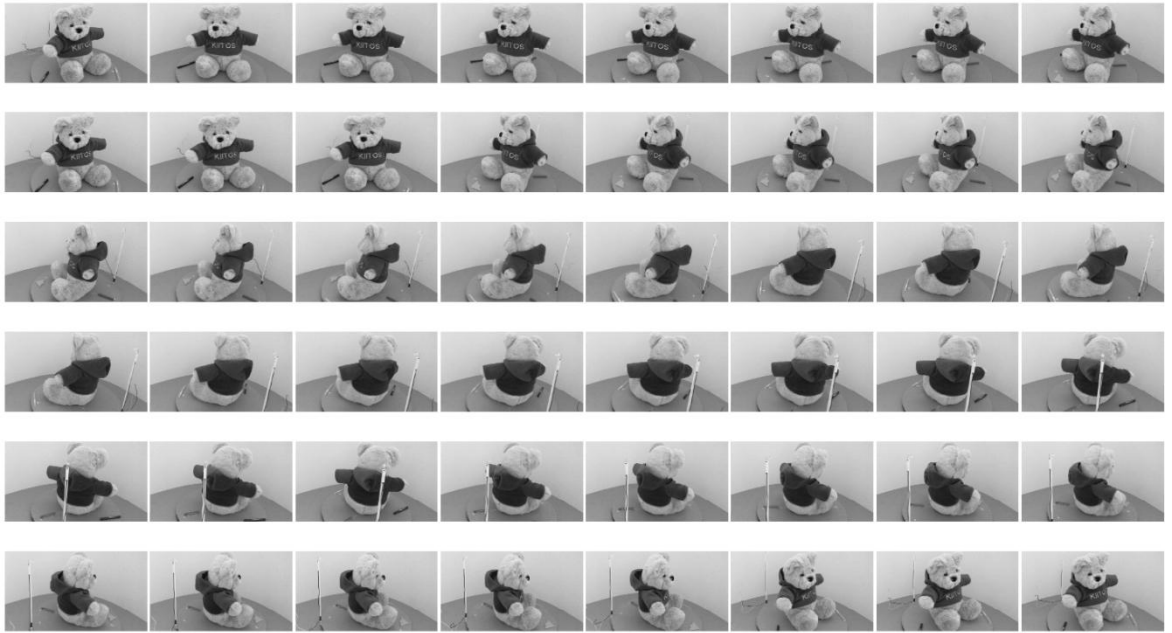


Kuva 63. kuvasarja 3

Kohteen varjoisan paikan ja kameran runsaan valoituksen ansiosta kuvasarjassa ei näy lainkaan varjoja, mutta kuvan laatu kärsii runsaasta valoituksesta ja muuttuu hieman rakeiseksi.

Kuvasarja 4

Kuvasarja 4 otettiin samassa valaistuksessa kuin kuvasarja 3 ja samoilla kameran asetuksilla värivoimakkuutta lukuunottamatta. Värivoimakkuus laskettiin jälleen nolnaan mustavalkoisen kuvan saamiseksi.

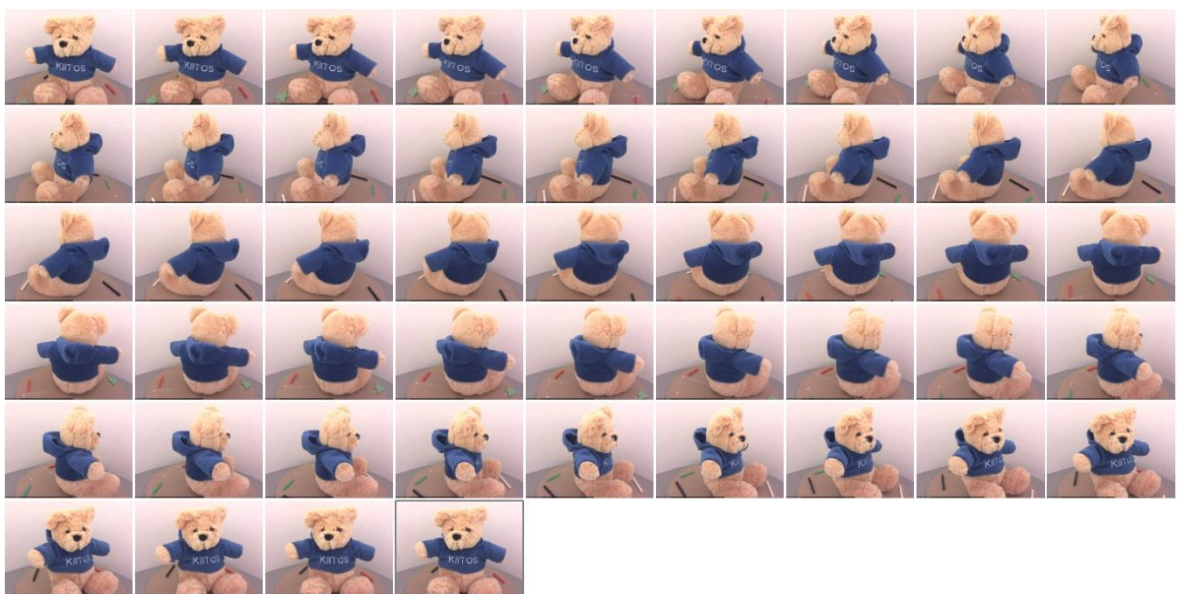


Kuva 64. kuvasarja 4

Kuvasarja 5

Kuvasarjassa viisi laboratorio oli täydessä valaistuksessa, mutta skannausalueen varjostamiseen käytettiin itse rakennettua valotelettä, jonka tarkoituksena oli pehmentää ympäristöstä heijastuvaa valoa ja häivyttää skannauskohteeseen ja sen lähistölle muodostuvia varjoja.

Kameran asetukset olivat seuraavanlaiset: valoitus 3/5, gain 2/5 ja muut asetukset vakiona.

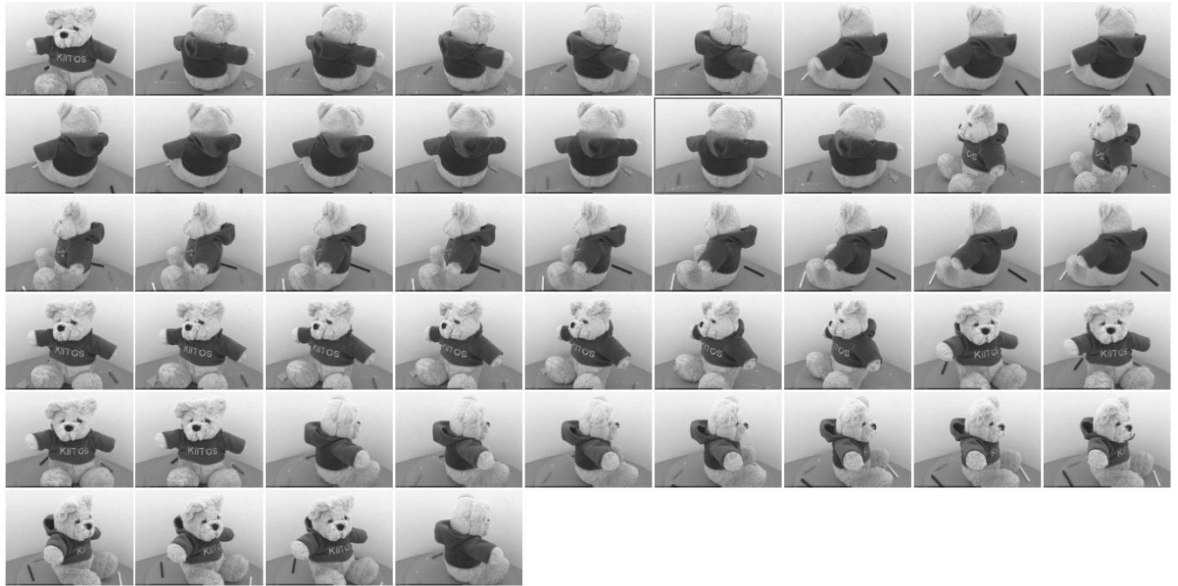


Kuva 65. kuvasarja 5

Kuvasarja 6

Kuvasarja otettiin samoissa olosuhteissa kun kuvasarja 5 valoteltassa, mutta kuvat otettiin mustavalkoisena.

Kuvasarja 6

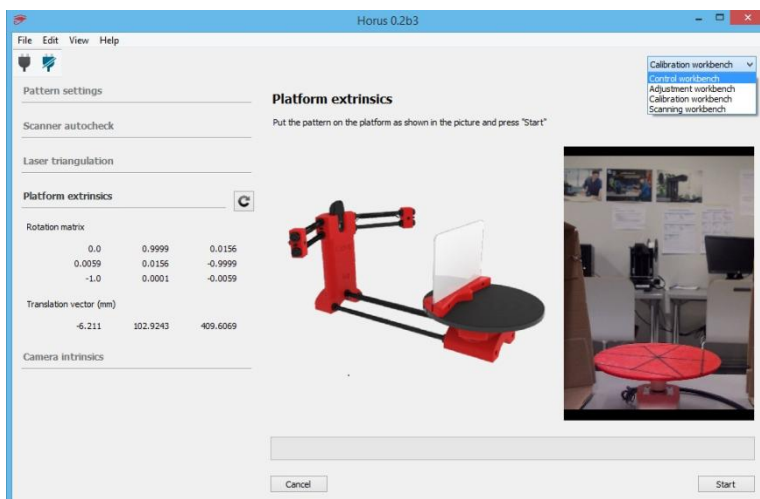


Kuva 66. kuvasarja 6

Liite 4. Kalibroinnin suoritus Horus ohjelmassa

Kun skannerin laserit ovat kohdistettuna, varsinainen kalibrointi tapahtuu täysin skannausohjelmistona käytettävän Horus ohjelman sisällä.

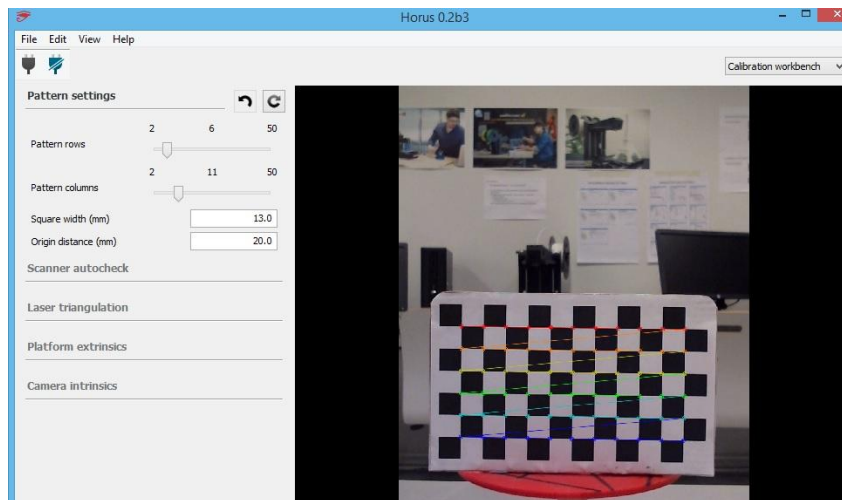
Kalibrointi tapahtuu Horus ohjelman Calibration Workbench valikossa (valinta löytyy käyttöliittymän oikeasta yläkulmasta pudotusvalikosta) aikaisemmin mainittua kalibrointi levyä hyödyntäen.



Kuva 67. calibration workbench Horus ohjelmassa

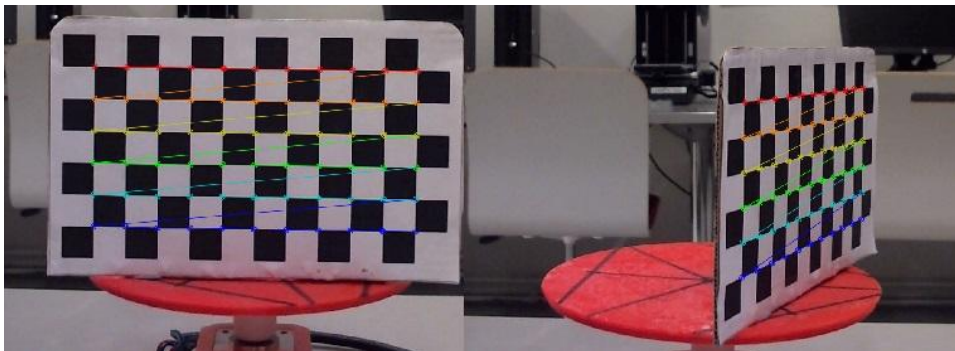
Kalibroinnin aikana ei käytetä valotelttaa, runsas mahdollisimman varjoton valaistus sopii mainiosti.

Kalibrointi aloitetaan asettamalla shakkikuviota muistuttava kalibroitikuvio pyörivälle alustalle calibration workbenchin osoittamalla tavalla kohdistettuna kameraa kohti. Pattern settings –osiossa määritetään käytetyn kalibroitikuvion ominaisuudet. Square width tarkoittaa kalibraatiokuvion yhden ruudun leveyttä millimetreissä, kun taas origin distance kertoo alimman ruudun yläreinan etäisyyden pyörivästä alustasta. Työssä rakennetulla skannerilla käytettiin arvoja 13mm ruudun leveys sekä 20mm etäisyys pyörivästä alustasta.



Kuva 68. Pattern settings asetukset

Kalibrointi ikkunan oikealla puolella näkyy reaaliaikaista kuvaa skannerin kamerasta; oikeanlaisessa valaistuksessa kameran kuvasyöttöön kalibrointilevyn shakkikuvion päälle ilmestyy väriruudukko, joka ilmaisee, että kalibrointi kuvio on tunnistettu. Kuvion tunnistaminen tulee tapahtua myös lähes 90 asteen kulmassa, ja tämä voidaan testata pyörittämällä alustaa itse käsin ja seuraamalla kuvasyötöstä värikuvion säilymistä. Mikäli värikuvio säilyy lähes 90 asteen käännöksen jälkeen, on valaistus ja kameran asetukset oikeanlaiset kalibraation suorittamiseksi.

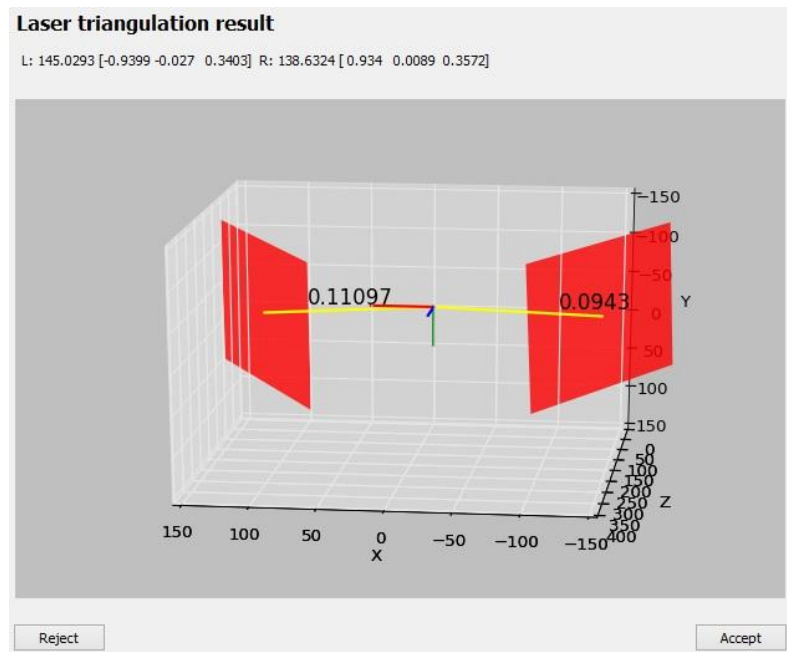


Kuva 69. tunnistuskuvio kalibraatiolevyllä kameranäkymässä

Värikuvion tulee näkyä yllä olevan kuvan mukaisesti lähes 90 asteen kulmassa. Mikäli näin ei ole, on kameran valoitusasetuksia syytä muuttaa esimerkiksi Horus ohjelmiston adjustment workbench:ssä.

Pattern settings –asetusten määrittämisen jälkeen ajetaan Scanner autocheck toiminto, joka kestää muutaman sekunnin. Tämä tarkistaa pyörivän alustan oikeanlaisen pyörimis suunnan ja ohjeistaa kääntämään sitä tarvittaessa.

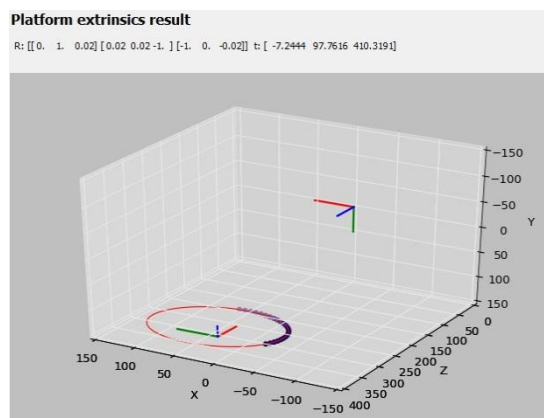
Seuraavaksi ajetaan laser triangulation. Toiminto on automaattinen ja kalibroinnin tulokset tulevat näkyviin muutamien sekunttien kuluessa.



Kuva 70. laser triangulation –kalibroinnin tulokset

Ylläolevassa kuvassa on kuvattu hyvä kalibrointi tulos. Kuvion punaiset tasot kuvaavat laserlinjojen pistehajautusta ja niiden arvot tulee olla noin +- 0.1; muutamien yksiköiden vaihtelut ovat vielä hyväksyttäviä. Kuvassa näkyvät L: ja R: arvot saavat poiketa toisistaan maksimissaan 30 yksikköä hyvässä kalibroinnissa. (26, BQ).

Viimeinen kalibrointi vaihe on platform extrinsics, jossa ohjelma määrittää matriisin pyörivän alustan liikkeistä skannauksen aikana.



Kuva 71. platform extrinsics kalibrointi tulokset

Alustan kalibraatiota suorittaessa kalibrointi kuvion tunnistaminen lähes 90 asteen kulmassa on tärkeää. Mikäli valaistus on huono ja kuviota ei tunnisteta, jää alustan kalibrointi liian "suljetuksi", mikä saattaa johtaa huonoihin skannaustuloksiin.

Calibration workbenchissä on vielä yksi valinta: camera instrincs, mutta tätä kalibrointi vaihetta ei tarvitse suorittaa.

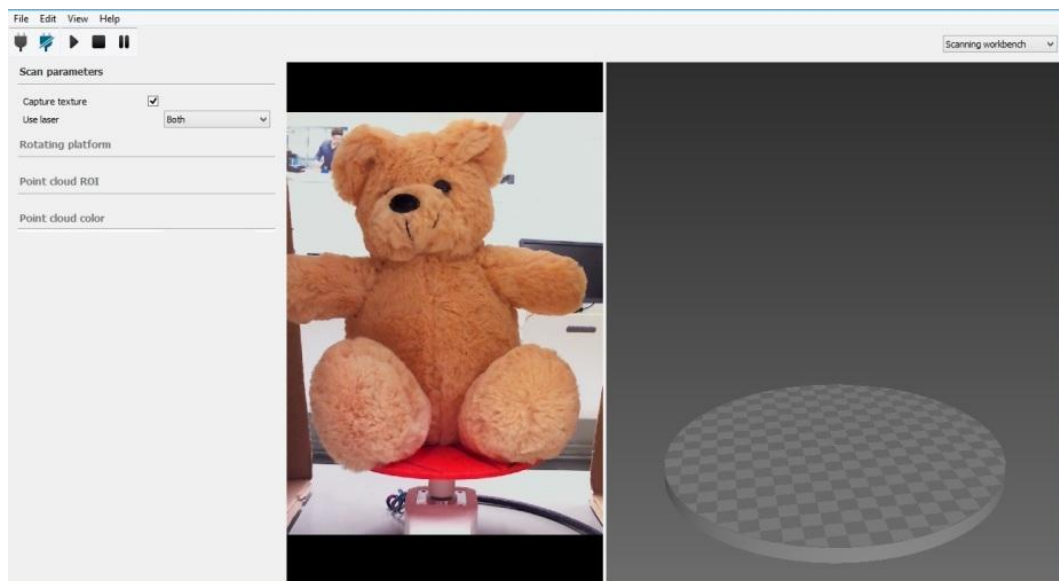
Mikäli kalibroinnin aikana ilmenee ongelmia tai kalibrointi tulokset eivät ole hyväksyttäviä, on kameran ja lasereiden asetuksia syytä tarkistaa Adjustment workbenchissä.

Tarkempaa tietoa skannauksen optimoinnista löytyy BQ:n virallisesta dokumentaatiosta Guide for Optinum Scanning: https://static-bqreaders.s3.amazonaws.com/file/ciclop/Horus_Guide_for_Optinum_Scanning_EN.pdf

Liite 5. Skannauksen suoritus Horus –ohjelmassa ja 3D-mallin muodostaminen Meshlab:ssä

Varmista ennen skannausta, että skannerin webkamera on sijoitettu 90 asteen kulmaan ja mahdollisimman suoraan. Horus ohjelmisto kääntää kuvasyötön automaattisesti 90 asteen kulmaan ja tästä syystä kameran on oltava samalla tavalla kuin alkuperäisessä Ciclops kokoonpanossa.

3D-skannauksen suoritus Horus ohjelmalla tapahtuu ohjelmiston Scanning Workbench –välilehdestä. Valinta löytyy ohjelman oikeasta yläkulmasta. Ennen skannausta on syytä tarkistaa kameran ja laserlinjojen oikeanlainen näkyvyys Adjustment Workbenchistä. Asetukset tulee useimmiten säätää kappale kohtaisesti, joten asetusten kanssa työskentellessä on syytä tutustua BQ:n viralliseen dokumentaatioon: Horus: Guide for Optinum Scanning, Dokumentaatio löytyy osoitteesta: https://static-bqreaders.s3.amazonaws.com/file/ciclop/Horus_Guide_for_Optimum_Scanning_EN.pdf

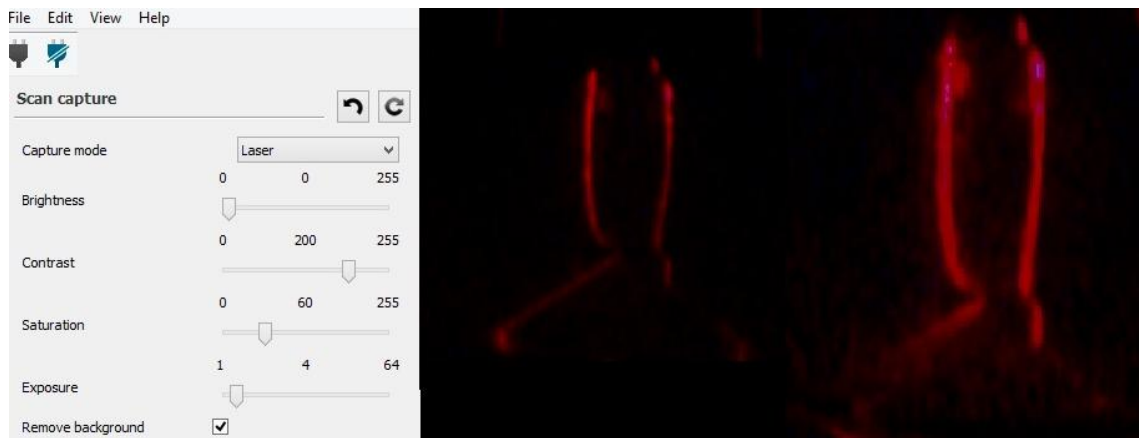


Kuva 72. Scanning Workbench Horus ohjelmistossa

Scanning Workbench -välilehti sisältää 4 valikkoa: scan parameters, rotating platform, point cloud ROI sekä point cloud color.

Scan parameters valikossa määritetään skannauksessa käytetyt laserit ja valitaan skannataanko kohteesta tekstuurit. Tekstuuri skannaus selkeyttää syntynyttä pistepilveä, mutta lopullisessa 3D-mallissa tekstuureita ei voida kuitenkaan projektissa

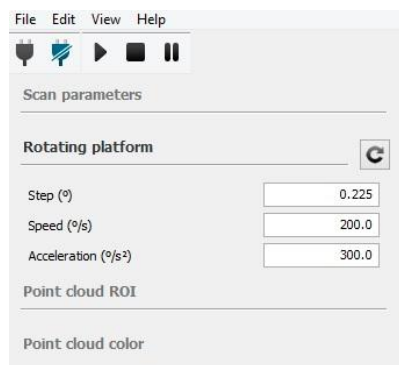
kerättyjen tietojen mukaan käyttää. Ilman tekstuureita skannaus on huomattavasti nopeampaa, eikä kameran asetuksilla ole niin suurta vaikutusta lopputulokseen kuin tekstuurien kanssa skannatessa. Adjustment workbenchissä Scan capture osiosta vain Laser capture valinnalla on väliä.



Kuva 73. laserlinjojen asetukset

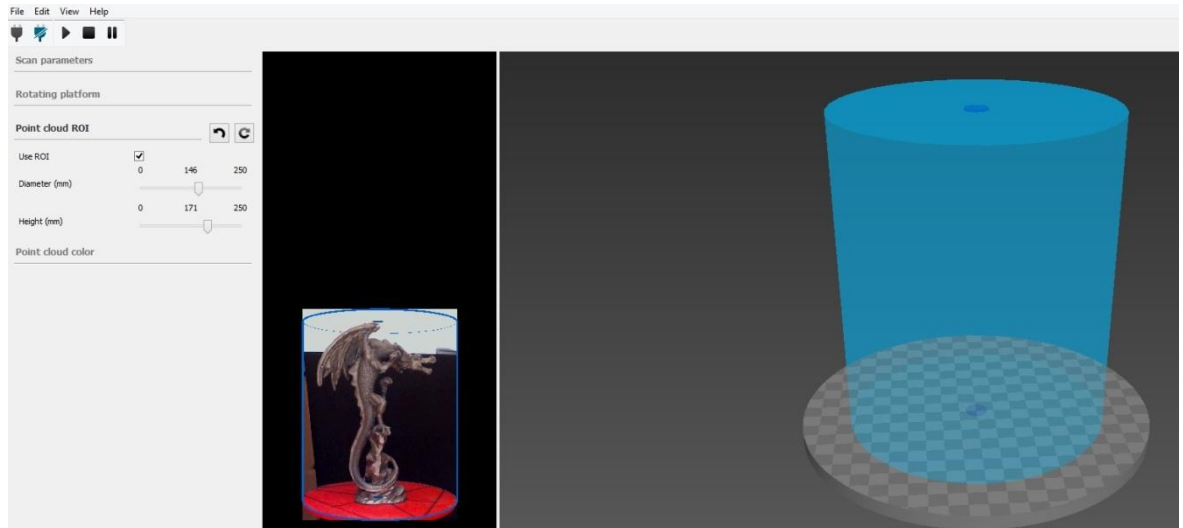
Yllä olevassa kuvassa on esitetty Adjustment Workbench näkymästä löytyvä scan capturen laser valinta. kuvan oikealla puolella on esitetty hyvät (vasen) ja huonot (oikea) laser asetukset. Laserlinjan on oltava näymässä voimakas, mutta ohut ja selkeä.

Rotating platform asetuksista määritetään pyörivän alustan nopeus. Alustan nopeus vaikuttaa suoraan skannaustulosten tarkkuuteen ja skannausaikaan. Step asetusta säätämällä määritetään kuinka suuria askelia alusta ottaa skannauksen aikana ja näin ollen kuinka monta "kuvaa" kamera ottaa täyden 360 asteen skannauksen aikana. Minimi arvo, jolla saadaan tarkin skannaustulos on 0.1125 astetta. Askelten suuruus on oltava vähintään minimiarvo tai suurempaa askelta käytettäessä minimiarvon kerroin esimerkiksi 0.225 tai 0.45. (26, BQ).



Kuva 74. step asetukset

Point Cloud ROI määrittää skannauksessa käytetyn alueen suuruuden. Asetuksia muuttamalla voidaan esimerkiksi poistaa skannauksesta taustalla olevia kohteita joihin laserit saattavat osua. ROI kannattaa määrittää sopivan kokoiseksi aina skannauskohdetta vaihdettaessa turhien pisteiden välttämiseksi.



Kuva 75. Point Cloud ROI

Point Cloud color asetuksilla määritetään tekstuuriittomien skannausten pistepilven väri. Asetuksella on väliä vain jos skannaus suoritetaan ilman tekstuureita.

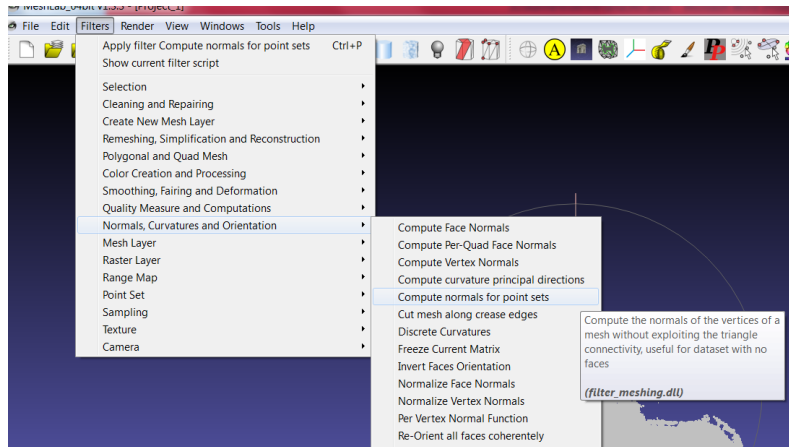
Varsinainen skannaus aloitetaan painamalla vasemmasta yläalaidasta löytyvää nuolipainiketta. Skannauksen valmistuttua pistepilvi on mahdollista tallentaa vasemmasta yläalaidasta File -valikosta Save model -valinnalla. Horus 3D-skannaus tuottaa kohteesta vain pistepilven ja valmis 3D-malli on muodostettava rekonstruktion avulla Meshlab ohjelmalla.

3D-mallin muodostaminen Meshlabilla

Aivan kuten fotogrammetrisen skannerin kanssa VisualSFM ohjelmistolla, on Horus 3D-skannausohjelmiston kanssa käytettävä Meshlab ohjelmaa valmiin 3D-mallin muodostamiseksi. 3D-rekonstruktointiin käytetään VisualSFM ratkaisun tapaan poisson algoritmia.

Laser skannauksen muodostama pistepilvi eroaa kuitenkin fotogrammetrisellä menetelmällä saadusta pistepilvestä. VisualSFM ohjelman tuottama tiedosto sisälsi pistepilven lisäksi myös kuvainformaatiota kappaleen tekstuureista, mikä mahdollisti pistepilven normaalien määrittämisen automaattisesti ohjelman tuottaman tiedoston

pohjalta. Horus ohjelman tuottama pistepilvi ei kuitenkaan sisällä samanlaista tietomäärää ja tästä syystä normaalien määrittäminen on suoritettava käsin Meshlab ohjelmassa. Tämä tapahtuu ”calculate normals for point-sets” -toiminnolla.



Kuva 76. calculate normals for point-sets

Arvot 10, 50 ja 100 tuottivat parhaimmat tulokset projektin aikana. Laskennan jälkeen normaalit on syytä tarkistaa Render – Show normal/curvature toiminnolla. Projektin aikana normaalien laskennassa ilmeni paljon ongelmia ja osa vektoreista ilmentyi laskennan päätteeksi väärinpäin, mikä aiheutti ongelmia rekonstruktioinnissa. Normaalien laskenta pistepilvestä riippuen voi vaatia useampia testejä. ”Flip normals w.r.t viewport” –toiminto auttoi joissakin tapauksissa.

Mikäli skannauskohteesta on otettu useampi yhdistettävä skannaus, on normaalien laskeminen suoritettava jokaiselle pistepilvälle erikseen ennen pistepilvien yhdistämistä Meshlab ohjelmassa. Kun normaalit on laskettu ”compute normals for point-sets” - valinnalla, voidaan pistepilvestä muodostaa 3D-malli poisson reconstructionin avulla.

Kattavat ja tarkemmat ohjeet löytyvät BQ:n virallisesta dokumentaatiosta: Horus: guide to post processing. Osoite dokumentaatioon on: https://static-bqreaders.s3.amazonaws.com/file/ciclop/Horus_Guide_to_post-processing_of_the_point_cloud_EN.pdf