

Sovellukset fotogrammetriatekniikan hyödyntämiseen

Kolmiulotteista mittaamista kuvista



Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö

Riihimäki, Tieto- ja viestintäteknikka

Syksy, 2019

Aleksi Jokinen

Tieto- ja viestintäteknikka
Riihimäki

Tekijä	Aleksi Jokinen	Vuosi 2019
Työn nimi	Sovellukset fotogrammetriatekniikan hyödyntämiseen	
Työn ohjaaja	Antti Laakso	

TIIVISTELMÄ

Opinnäytetyön keskeinen tavoite on tutkielmatyylisesti selvittää erilaisten sovellusten hyödyntämistä osana fotogrammetriatekniikkaa. Tutkielmassa käsitellään fotogrammetrian sekä siihen assosioitavien sovellusten toimintaa teoriassa sekä niiden hyödyntämistä käytännössä.

Teoriaosuus käsittelee fotogrammetrian kehitystä sekä toimintaa tänä päivänä.

Käytännön osuudessa puolestaan tarkistellaan vertailunomaisesti sovellusten toimintaa, teknillisiä poikkeavuuksia, hyötyjä ja haittoja sekä saavutettua lopputulosta. Kuvaamisessa ei käytetä studioympäristöä.

Avainsanat fotogrammetria, kamera, kuvaus, mallinnus, renderöinti

Sivut 38 sivua, joista liitteitä 4 sivua

Information and Communication Technology
Riihimäki

Author	Aleksi Jokinen	Year 2019
Subject	Applications for photogrammetry 3D-modelling	
Supervisor	Antti Laakso	

ABSTRACT

The objective of the thesis was to examine the use of various applications as a part of photogrammetry technology in a treatise-style. This discusses the activities of photogrammetry and the associated applications in theory as well as how to utilize them in practice.

The theory section describes the development and progression of photogrammetry in the current day.

The empirical part in turn reviews and compares application performance, technical anomalies, the advantages and disadvantages of different applications as well as the results achieved through these comparisons. Studio environment is not used in photo shooting.

Keywords camera, modeling, photogrammetry, photography, rendering

Pages 38 pages including appendices 4 pages

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	1
2	FOTOGRAMMETRIA.....	2
2.1	Kehityksen suurimmat historialliset askeleet	2
2.2	Perusteet	3
2.2.1	Ilmakuvaus.....	4
2.2.2	Stereokuvaus	5
2.2.3	Lähikuvaus	5
2.2.4	Digitaalinen fotogrammetria	5
2.3	Sovellukset.....	5
3	VALMISTELU	6
3.1	Tarvittavat oheislaitteet ja niiden ominaisuudet.....	6
3.2	Sovellukset	6
3.2.1	ReCap Photo	6
3.2.2	Meshroom	7
3.2.3	3DF Zephyr.....	8
3.2.4	Trnio.....	8
4	DATAN HANKINTA	9
4.1	Kuvattavan kohteen valinta	9
4.2	Kuvaaminen.....	9
5	VARSINAINEN PROSESSI	10
6	3D-MALLIN RENDERÖINTI	11
6.1	ReCap Photo.....	11
6.2	Meshroom	15
6.3	3DF Zephyr	16
6.4	Trnio	19
7	OHJELMISTOJEN VERTAILU.....	21
7.1	Laitteistovaatimukset.....	21
7.2	Tehokkuus	22
7.2.1	Nopeus.....	22
7.2.2	Käytettävyys	23
7.2.3	Mallinnuksen kompleksisuus.....	24
7.2.4	3D-mallien renderöinti	25
7.2.5	Trnio.....	25
7.2.6	Meshroom	27
7.2.7	3DF Zephyr.....	28
7.2.8	ReCap.....	29
8	JOHTOPÄÄTÖKSET	30

8.1.1	Autodesk ReCap.....	30
8.1.2	Meshroom	31
8.1.3	3DF Zephyr.....	31
8.1.4	Trnio.....	31
	LÄHTEET	33

Liitteet

Liite 1	Opinnäytetyössä käytetty laitteisto
Liite 2	Sovelluskohtaiset laitteistovaatimukset

1 JOHDANTO

Fotogrammetrian synty juontaa juurensa aina 1400-luvulle asti, jolloin Leonardo Da Vinci kirjoitti perspektiivistä. Tämän jälkeen useat eri aikansa tieteilijät kehittivät teoreemaa. Vuonna 1867 käsite sai nimekseen fotogrammetria, kun saksalainen insinööri Albrect Meydenbauer julkaisi artikkelin saksalaisessa arkkitehtiyhteisön lehdessä otsikolla fotogrammetria.

(Luhmann, Robson, Kyle & Böhm, 2013)

Tänä päivänä fotogrammetria on osana arkipäiväistä elämäämme niin paljon, että emme edes välttämättä huomaa sen käyttöä. Teknologisen kehityksen ansiosta tekniikkaa käytetään muun muassa videopeleissä, virtuaalitodellisudessa, elokuvissa, rakentamisessa, kartoittamisessa, taltioimisessa, lääketieteessä, rekonstruoinnissa ynnä muussa. Käytännössä mahdollisuudet fotogrammetrian hyödyntämiseen ovat rajattomat.

(Luhmann, Robson, Kyle & Böhm, 2013)

Vaikkakin fotogrammetrialla on lähes loputtomat mahdollisuudet ja sitä käytetään yhä useammalla eri tieteenalalla, on se terminä useimmalle mystinen. Yksinkertaisuudessaan sen voisi ilmaista näin; muodostetaan kohteesta otetuista kuvista kolmiulotteinen digitaalinen jäljennös.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tutkimuksenomaisesti selvittää ja vertailla muutamia tällä hetkellä käytössä olevia fotogrammetriaohjelmistoja ja niiden muodostamia lopputuloksia. Koska käsitteenä fotogrammetria on niin laaja, työssä paneudutaan vain lähikuvaukseen käytännössä. Teoriaosuus puolestaan antaa hieman kuvaa myös muista fotogrammetrisistä tekniikoista. Työskentely suoritetaan normaaleissa olosuhteissa ilman studioympäristöä.

2 FOTOGRAMMETRIA

2.1 Kehityksen suurimmat historialliset askeleet

Fotogrammetriaan liittyvät keskeiset osat juontavat juurensa aina ennen ajanlaskumme alkua. Itse fotogrammetriatekniikka tuli tutuksi vasta paljon myöhemmin. Alla olevaan taulukkoon on koottu kehityksen kannalta tärkeimpiä askelia vuoden mukaan.

Taulukko 1. Fotogrammetrian historia

500 eKr. Kameran hämärtämä (500 eKr. Kiinassa, 350 eKr. Aristoteles, 1000 Al-Haytham, 1500 Leonardo Da Vinci).
1430. Matemaattinen kuvaus. Rooma.
1500. Yritys selvittää maalaajan silmäpiste perspektiivimaalauksesta. Leonardo Da Vinci
1540. Linssi. Gerolamo Cardano.
1604. Ensimmäinen matemaattinen teoria kameran hämärtämisestä. Kepler.
1611. Optisen kuvan heijastaminen prismaa käyttäen. Wollastonin patentoima myöhemmin vuonna 1806.
1726. Topografinen kartta Sveitsin vuoristoista käyttäen perspektiivikuvia. Kappeler.
1793. Hydrografia. Kulma- ja etäisyysmittauksista muodostetut kartat rantaviivoista. Beautemps-Beaupré.
1826. Ensimmäinen valokuva. Niépce.
1836. Daggetyypia. Ranskan akatemia.
1849. Metrofotografia. Kuvattavan kohteen mittaaminen kuvista. Laussedat.
1881. Preussin kuninkaallinen fotogrammetriainstituutti. Meydenbauer.
1885. Ensimmäinen tallennettu arkeologinen esine Persepolisistä muinaisista raunioista.
1889. Ensimmäisen fotogrammetriakäsikirjan julkaiseminen. Koppe.
1911. Ensimmäinen ilmakehän kuva. Scheimpflug.

(AliceVision, 2019)

2.2 Perusteet

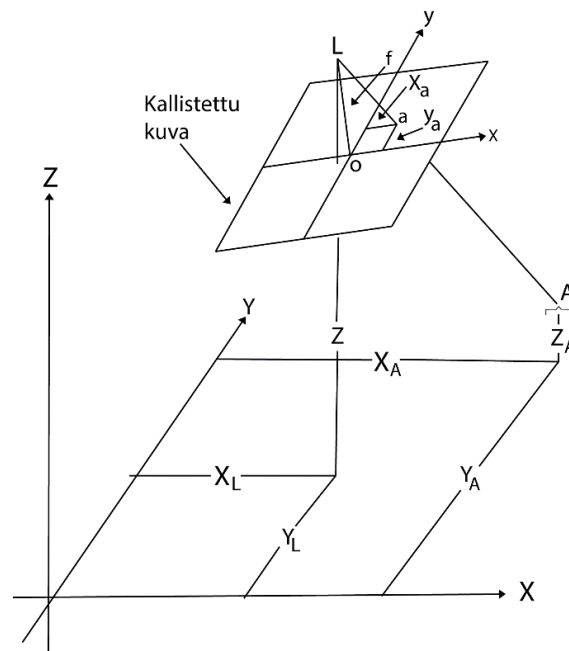
"photo" valo
 "gram" piirros
 "metry" mittaus

Fotogrammetria käsittää kuvanmittaus- ja tulkintamenetelmiä, joiden avulla objektin muoto ja sijainti voidaan muodostaa yhdestä tai useammasta kyseisen objektin valokuvasta. Käytännössä fotogrammetrisia menetelmiä voidaan soveltaa kaikissa tilanteissa, joissa kohde voidaan tallentaa kuvaamalla ja siitä on mahdollista muodostaa mittauksia.

Fotogrammetrisen mittauksen ensisijaisena tarkoituksena on esineen kolmiulotteinen jälleenrakentaminen digitaalisessa tai graafisessa muodossa ja sen ominaisuuksien analysoiminen ilman fyysistä kosketusta.

(Luhmann, Robson, Kyle & Böhm, 2013)

Yksi fotogrammetrian tärkeimmistä matemaattisista säännöistä on kuvassa 1 näkyvä kollineaarisuusehto, jonka mukaan kohde, sen kuva valokuvalla ja kameran projektiokeskus sijaitsevat samalla suoralla. Kameran optiikka kuitenkin muodostuu linsijärjestelmästä, jonka läpi kulkiessaan kohteesta heijastuva valonsäde taittuu monia kertoja ennen kuvaan päätymistä. Joten oikeastaan kollineaarisuusehto ei toteudu tällöin. Ajattelun sekä matematiikan kannalta on kuitenkin parempi kuvitella linsijärjestelmän tilalle yksi piste, jonka kautta kaikki kuvalle tulevat valonsäteet kulkevat. Tätä pistettä kutsutaan kameran projektiokeskukseksi. (Vinni, 2003)



Kuva 1. Kollineaarisuusehto (Mukaiillen Wolf, Dewitt & Wilkinson, 2014)

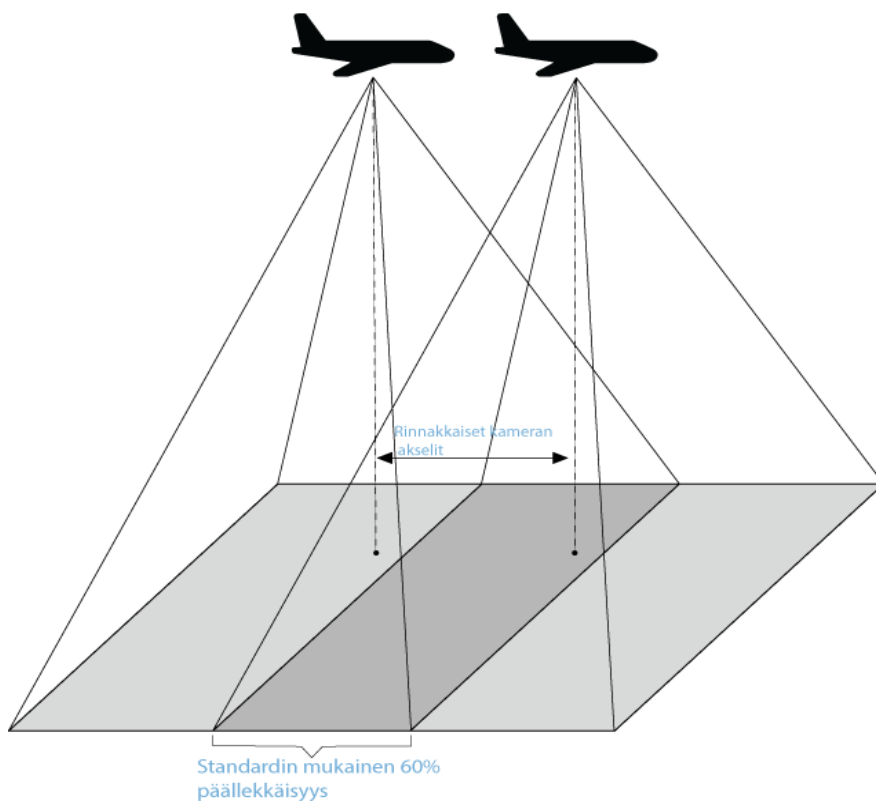
Fotogrammetrisessä analyysissä muodostetaan digitaalinen topografinen malli, joka voidaan visualisoida tietokonegrafiikan avulla. Fotogrammetrialla voidaan mitata, dokumentoida tai monitoroida lähes mitä tahansa mitä kuvaan on tallennettu. Fotogrammetria voidaan jakaa useampaan haaraan perustuen kuvattavan kohteen sekä kameran välimatkaan.

2.2.1 Ilmakuvaus

Ilmakuvaus (kuva 2) viittaa tyypillisesti vaaka- tai pystysuorassa otettuihin kuviin, joiden välimatka kameraan on yli 300 metriä. Kameran etäisyys kohteesta kaupallisessa ilmakuvauksessa on 305 metriä maaston yläpuolella. Tarkan korkeuden sekä 153 millimetrin polttovälin linssiä käyttäen saadaan 1:2000 mittakaavassa oleva kuvaus. Suurin osa suurikokoisista ilmakuvista hankitaan kaupallisten urakoitsijoiden kautta ja ne ovat yleensä saatavana paperisina tai digitaalisessa muodossa.

(Lucas, Spielmann, Hester, Kenworthy & Santucci, 2006)

Ilmakuvaus eli Ilmafotometria mahdollistaa 3D-koordinaattien tarkan kartoittamisen maassa käyttämällä 2D-koordinaatteja, jotka mitataan stereoilmakuville.



Kuva 2. Stereoilmakuvaus. (Mukaiillen Knight, 1998)

Ilmakuvausta hyödynnetään pääsääntöisesti tien- ja maanrakennukseen, metsänarvointiin, maankäytön tutkimuksiin, erilaisten alueiden ja ympäristöjen kartoittamiseen, mallintamiseen sekä digitalisointiin.

2.2.2 Stereokuvaus

Fotogrammetriassa käytettävien matemaattisten funktioiden lisäksi tärkein keino luoda tarkkoja 3D-mittauksia on stereokuvaaminen. Yhden kuvan avulla on lähes mahdotonta määrittellä kohteen kolmiulotteista muotoa, sillä parallaksin mittaamiseen tarvitaan aina vähintään kaksi kuvaa. Myöskin perspektiivi aiheuttaa vääristymiä kohteesta ja niitä ei voi korjata, jos kolmatta ulottuvuutta ei pystytä hahmottamaan. (Vinni, 2003)

2.2.3 Lähikuvaus

Lähikuvausta käytetään objekteihin, joiden välimatka kameraan on muutaman senttimetrin taikka muutaman sadan metrin päässä. Hyödyllinen, kun mitattavaan objektiin ei päästä fyysisesti käsiksi. Objekti voi olla vaarallinen (hehkuvan kuuma, myrkyllinen). Objektin olomuoto ei ole kiinteä tai se on hyvin pieni kooltaan. Objektin suora fyysinen mittaus vaikuttaisi mitattavaan kohteeseen ja sen ominaisuuksiin tai häiritsisi tapahtumia sen ympäristössä. Lähikuvausta on hyvä käyttää myös silloin, kun tarvitaan reaaliaikaisia mittauksia. (Luhmann, Robson, Kyle & Böhm, 2013)

2.2.4 Digitaalinen fotogrammetria

Yleisesti käytetty termi, kun mitattava kohde tallennetaan kameralla digitaaliseen muotoon. Kuvien analysointiin käytetään tietokonetta asiaankuuluvien oheislaitteiden sekä ohjelmistojen kanssa. Kuvia voidaan mitata yksitellen kaksikulotteiselta näytöltä tai sopivalla laitteistolla muodostaa stereonäkymä, jonka avulla voidaan suorittaa kolmiulotteisia mittauksia. (Lammi, 1992)

Tänä päivänä fotogrammetria on lähes yksinomaan digitaalista fotogrammetriaa. Kuvien käsittely, mittaus, analysointi sekä editointi suoritetaan tietokoneilla. (Vinni, 2003)

2.3 Sovellutukset

Fotogrammetriaa käytetään muun muassa arkkitehtisessä tallennuksessa, rakennuskohteiden tarkkuusmittauksessa, rakennusvaurioiden dokumentoinnissa, taiteellisten ja teknisten mallien mittaamisessa, robotiikassa (liikkuvan prosessin luominen digitaalisesti), biometrisissä sovelluksissa (lääketieteessä tietokoneohjatut kirurgiset toimenpiteet), liikenneonnettomuuksien jälleenrakentamisessa, 3D-tulostamisessa, peleissä, elokuvissa sekä monissa muissa sovelluksissa. Jos kuvat on otettu siihen suunnatuilla erikoiskameroilla, fotogrammetrinen käsittely on suhteellisen yksinkertaista. Tekniikan kehittyessä amatöörielokuvien geometrinen käsittely on nyt kuitenkin mahdollista matemaattisten algoritmien ja tehokkaan ohjelmiston avulla. Tätä prosessointitekniikkaa käytetään yhä laajemmin, etenkin nyt kun kuvaaminen on yleistynyt matkapuhelimien ja kameroiden ansiosta entisestään. (Kraus, 2011)

Yhä useampia fotogrammetriasovelluksia julkaistaan markkinoille kaupallisina sekä avoimen lähdekoodin versioina. Useimmiten sovellukset sisältävät yksityiskohtaiset ohjeet kuvien ottamiseen sekä erilaisia tutoriaaleja, joiden avulla kokematonkin henkilö voi saada luotua hyvälaatuisen ja tarkan fotogrammetrisen 3D-mallinnuksen.

3 VALMISTELU

3.1 Tarvittavat oheislaitteet ja niiden ominaisuudet

Fotogrammetrisen mallin luomiseksi tarvitaan vähintään.

- Kamera
- Tietokone
- Fotogrammetriatyökalu
- 3D-editointityökalu
- Ympäristö kuvaamiselle

Ominaisuuksiltaan parempilaatuisia 3D-malleja saadaan helpommin ja nopeammin luotua ammattilaisjärjestelmäkameran sekä tehokkaan tietokoneen avulla. Käytettävä sovellus sekä editointitaidot vaikuttavat myöskin huomattavasti lopputulokseen.

3.2 Sovellukset

3.2.1 ReCap Photo

Alun perin nimeltään Project Memento. Autodeskin yritys rakentaa fotogrammetriatyökalu alusta alkaen. Mementon ollessa vielä betaversio, oli se ilmainen ja saatavilla sekä Macille että PC:lle. Jo tässä vaiheessa vaihtoehtona renderöinnille oli pilviprosessointi (edelleen ainutlaatuinen ominaisuus muihin sovelluksiin verrattuna).

Projektin edettyä pois betavaiheesta vuoden 2017 alussa, vaihdettiin sen nimeksi ReMake, ja sitä markkinoitiin itsenäisenä fotogrammetriatyökaluna esineiden ja pienten ympäristöjen taltioimiseen. (Lievendag, 2018)

Sovelluksen avulla voidaan luoda 3D-malleja tuoduista valokuvista ja laserkeilauksista. Mahdollistaa valmiin pistepilven tai verkon tuottamisen CAD- ja BIM-työkaluja varten. ReCap Photon avulla voidaan luoda 3D-esityksiä nykyisistä paikoista ja esineistä ym. käsittelemällä otettuja valokuvia. Sovellus mahdollistaa lähikuvauksen sekä kaukokuvauksen hyödyntämisen.

Automaattinen laserkeilauksen rekisteröinti luo skannaustiedoista muutamassa minuutissa tarkan ja skaalattavan kolmiulotteisen pistepilven. Sisältää myös automaattisen siivoustyökalun, jonka avulla voidaan poistaa ei-toivotut objektit pistepilvestä. Mahdollistaa mallinnuksen luomisen jopa tuhatta kuvaa käyttäen. (Autodesk Inc. 2019)

Laadukkaita mallinnuksia voidaan luoda laitteella kuin laitteella, sillä ReCap Photo ei käytä paikallisen tietokoneen resursseja mallinnukseen, vaan tämän sijaan hyödyntää omia renderöintifarmejaan verkon yli.

3.2.2 Meshroom

AliceVisionin kehittämä ilmainen avoimen lähdekoodin työkalu. Täysin integroitu ohjelmisto 3D-rekustruointiin, kuvamallinnukseen sekä kameran seurantaan. Avoimen lähdekoodin lähestymistapa antaa käyttäjille mahdollisuuden saavuttaa korkea integraatioaste sekä helppo räätälöinti mihin tahansa prosessiin sekä studiokäyttöön.

Sovelluksen työprosessin jokainen vaihe on täysin käyttäjän kustomoitavissa, mikä mahdollistaa vielä yksityiskohtaisemman editoinnin kuin muissa vastaavissa fotogrammetriasovelluksissa. Meshroomin työprosessi etenee seuraavasti.

Luonnollisten ominaisuuksien poiminta. Ensimmäinen vaihe, jonka tavoitteena on poimia erottuvat pikseliryhmät, jotka ovat jossain määrin muuttumattomia kameran näkökulmien vaihtumisessa kuvaamisen aikana. Tällä vähennetään ylimääräistä työtä. Toimii periaatteeltaan kuin videon puskurointi, jokaista yksittäistä pikseliä ei ladata uudestaan, jos niiden kohdalla data ei ole muuttunut.

Kuvien sekä ominaisuuksien yhteensopivuus. Tarkoituksena löytää kuvia, jotka näyttävät samoilta kohtausalueilta. Tällä tavoin koitetaan löytää kuvia, jotka jakavat jotakin sisältöä ilman kaikkien ominaisuusosumien selvittämistä. Yksinkertaistaa kuvakokonaisuutta ja näin ollen mahdollistaa tehokkaamman laskennan mallin muodostamisessa. (AliceVision, 2019)

Rakenne liikkeestä. Tavoitteena ymmärtää kaikkien syötekuvien tarjoamien havaintojen taustalla oleva geometrinen suhde ja päätellä kohtausrakenne eli 3D-pistepilvi kaikkien kameroiden asennoilla kuvattavan kohteen ympärillä. Jälleenrakennusprosessi, joka laskee ensin kahden näkymän tuottaman rekonstruoinnin, jota jatketaan iteratiivisesti lisäämällä uusia näkymiä. (AliceVision, 2019)

Syvyyskarttojen arviointi. Jokaista annettua kuvaa kohden valitaan N määrä parhaita sekä lähimpiä kameroita. Tämän jälkeen valitaan rinnakkaiset tasot optisen akselin leikkauksen perusteella. Mahdollistaa tarkemman sekä paremman syvyyden 3D-mallin eri kohtia varten. (AliceVision, 2019)

Meshing. Luodaan näkymästä tiheä geometrinen pintaesitys, pisteverkko. (AliceVision, 2019)

Teksturointi. Jos muodostetussa pisteverkossa ei ole UV-karttoja, laskee sovellus ne automaattisesti. Sovellus toteuttaa UV-peruskarttamenetelmän tekstuuritilan minimoimiseksi. Mahdollista myös käyttää vaihtoehtoista menetelmää, joka ei ole AliceVisionin kehittämä. Kun sovellus on luonut UV-kartat kohteesta kullekin kolmiolle, käytetään kärkipisteisiin liittyviä näkyvyystietoja tekstuuriehdokaiden hakemiseksi. (AliceVision, 2019)

Lokalisaatio. Perustuu rakenteen arvioimiseen liikkeestä. Luo animoidun kameran liikkeen 3D-rekonstruktioon ja sijoittaa kamerat valmiiseen paikkoihin scenessä. Aivan kuten kuvanottohetkellä. (AliceVision, 2019)

3.2.3 3DF Zephyr

Erittäin käyttäjäystävällinen sekä lähes täysin automatisoitu sovellus. Mahdollistaa parametrien syöttämisen version mukaan. Käyttöliittymä toteutettu kevyeksi ja helposti omaksuttavaksi. Toimintaperiaatteeltaan erittäin samankaltainen ReCapin kanssa. Poikkeaa tässä tutkielmassa muista sovelluksista mahdollisuudella luoda 3D-malli kuvien lisäksi myös videosta. Sovellus leikkaa syötetyn videon pieniin segmentteihin ja luo näistä kuvat, joita hyödyntää mallinnuksessa. Automaattinen työkalu poistaa videosta taltioidut kuvat, jotka ovat liian sumeita, samanlaisia tai muuten huonoja.

Työprosessi mahdollistaa prosessointiasetusten muuttamisen itselleen mieleiseksi, rajoittavana tekijänä mallinnukseen käytettävän laitteiston teho. 3DF Zephyr sisältää myös ominaisuuden, joka mahdollistaa useamman eri projektin luomisen samaan aikaan. Erittäin hyödyllinen jos luotavia malleja on enemmän kuin yksi.

3.2.4 Trnio

Tutkielman ainut vain mobiilialustoille suunniteltu fotogrammetriatyökalu. Käyttö suunniteltu enemmänkin fotogrammetrian kokeilemiseen ja oppimiseen kuin ammattilaiskäyttöön. Luo matalan polygonimäärän malleja. Integroitu toimimaan yhdessä Sketchfabin kanssa. Hyödyntää pilviprosessointia 3D-mallin luomiseksi. Tiedostot voi tallentaa .PLY-muodossa ja editoida myöhemmin tietokoneella esimerkiksi Meshlabia tai Blenderiä käyttäen. Sovellukseen integroidut aputyökalut tekevät kuvien ottamisesta helppoa ja vaivatonta.

4 DATAN HANKINTA

4.1 Kuvattavan kohteen valinta

Kuten aiemmin tässä työssä mainittiin, kuvattava kohde voi olla lähes mikä tahansa asia, joka voidaan tallentaa kuvaamalla. Tämän tutkielman tarkoituksena on selvittää miten eri sovellukset hyödyntävät fotogrammetriatekniikkaa. Käytännön osiossa paneudutaan lähikuvaamiseen, joka rajoittaa kuvattavaa kohdetta.

Laitteiston, tekijän osaamisen ja selvyiden vuoksi työhön kuvattavaksi kohteeksi valikoitui Vans-merkin punainen kenkä. Geometrisesti kenkä on lähes yksivärinen sekä pinnaltaan suhteellisen tasainen.

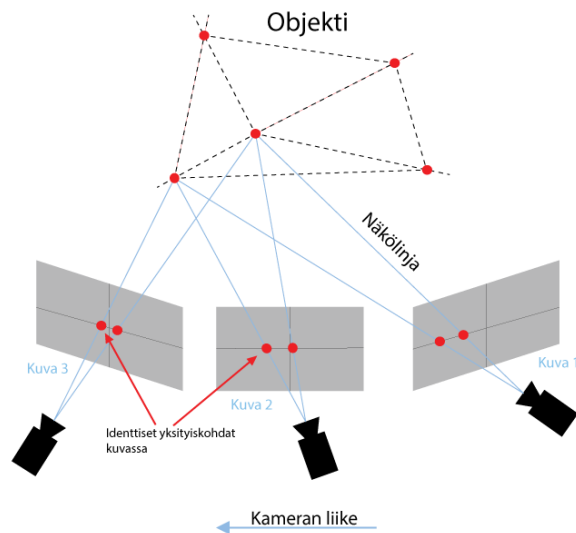
Hyvänä huomioitavana asiana on ottaa useampi erillinen setti kuvattavasta kohteesta vaihtelevien kuvamäärien kanssa. Näin voidaan mahdollistaa epäonnistuneen kuvauksen takia huonon mallinnuksen rekonstruointi käyttäen eri kuvia tai yhdistelemällä niitä.

4.2 Kuvaaminen

Kohteen kuvaamiseen vaikuttavia tekijöitä on useita. Kuvattava objekti tulisi sijoittaa siten että sen ympärillä olisi mahdollisimman tasainen valaistus. Kaikki kuvat on hyvä ottaa samoilla kameran asetuksilla, jolloin fotogrammetriasovellus kykenee muodostamaan 3D-mallin helpommin. Ihmissilmä ei välttämättä huomaa pientä valotuseroa kahden kuvan välillä, mutta nämä pienetkin poikkeavuudet voivat vaikuttaa lopputulokseen radikaalisti.

Tietokone työskentelee kuitenkin sille annettujen parametrien varassa. Jos josain on pienikin poikkeavuus voi algoritmi joko jättää poikkeavuuden huomioimatta, käyttää sitä muun datan joukossa tai olla kykenemätön luomaan hyvää lopputulosta. Tämä on sidoksissa fotogrammetriasovellusten omiin tekniikoihin, joita hyödynnetään.

Hyvälaatuisen fotogrammetriamallin tuottamiseksi tulee objektista ottaa mahdollisimman paljon kuvia korkeimmalla mahdollisella resoluutiolla. Jokaisen objektin pinnan tulee olla vähintään kahdessa, mielusti useammassa kuvassa (kuva 3). Vaikka kuvia tulisi ottaa mahdollisimman paljon, pitää myös huomioida kuvien välissä liikkuminen. Yhdessä pisteessä seisominen tuottaa panoraaman, mikä ei auta 3D-mallin luonnissa.



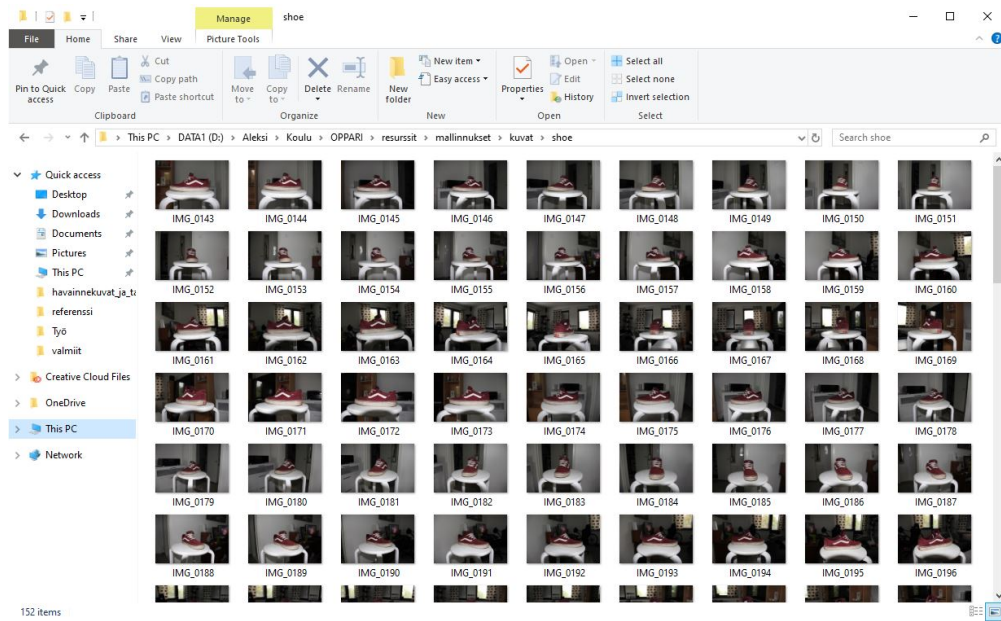
Kuva 3. Objektiin identittiset yksityiskohdat useammassa kuvassa. (Mukaillen Clemson University, 2019)

5 VARSINAINEN PROSESSI

Kengän yleinen muoto on helpohko tallentaa mutta saadakseen siitä yksityiskohdat kuten kengännauhat ja merkit tarkasti näkyviin täytyy kuvien olla riittävän tarkkoja ja hyvin otettuja. Vaikkakaan ideaalia kuvausympäristöä eli tasavaloista studiota ei työssä hyödynnetty, saatiin otetuista kuvista varteenotettavan hyviä.

Kuvauspaikkana työssä käytettiin tekijän olohuonetta, joskin sen pieni koko aiheutti hieman hankaluuksia kuvaamisen suhteen. Kaksi ensimmäistä kuvauskerää eivät tuottaneet tulosta huonon valaistuksen sekä eri etäisyyksien päästä otetuilla kuvilla. Olohuoneeseen tehtiin hieman enemmän tilaa, jotta objektiin ympärillä kuvaaminen mahdollistui sekä valaistus korjattiin käyttämällä kameran salamavaloa.

Valmiiseen 3D-malliin otettiin yhteensä 152 kuvaa (kuva 4) seuraavilla asetuksilla: Resoluutio 5184x3456 pikseliä. Valotusaika 1/60 s. ISO 400. Polttoväli 18mm. Otettujen kuvien tiedostokoko vaihteli neljästä lähes kuuteen megatavuun.



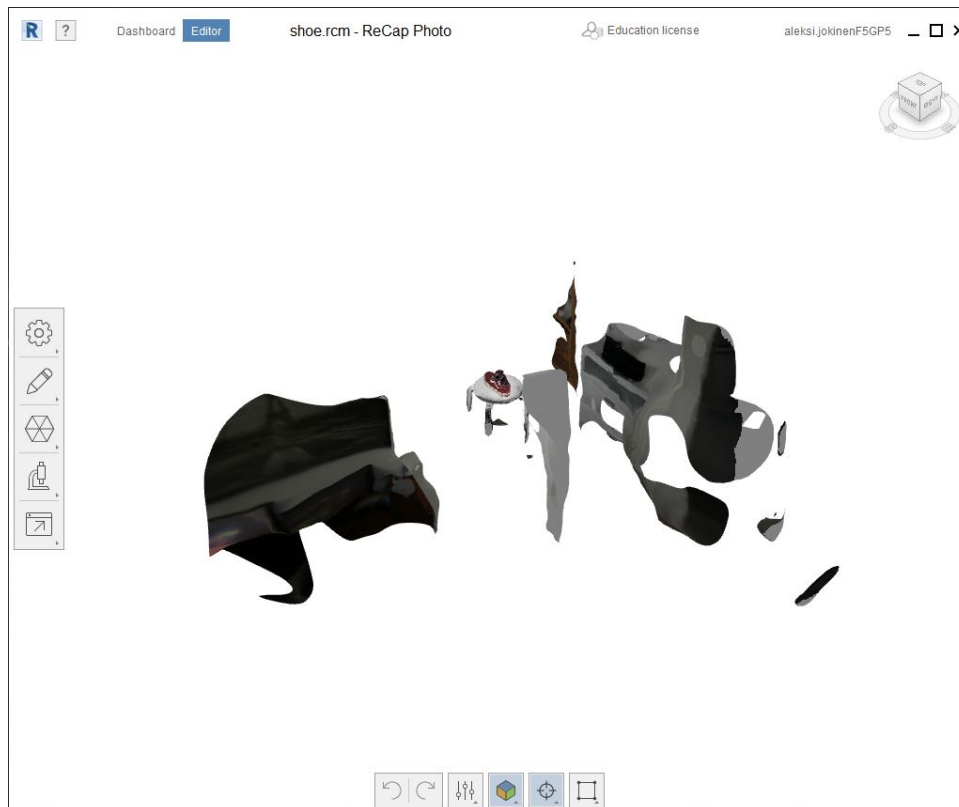
Kuva 4. Näkymä otetuista kuvista.

6 3D-MALLIN RENDERÖINTI

6.1 ReCap Photo

Työn ainut pilviprosessointia hyödyntävä ohjelmisto. Työssä käytössä ollut käyttäjätili omaisi opiskelijalisenssin, jonka vuoksi mallinnuksen renderöintiä ei voitu tehdä välittömästi vaan jouduttiin niin sanotusti jonottamaan, kunnes palvelussa oli tarpeeksi tilaa prosessoida sille syötetyt kuvat. Valmiin mallin saaminen kesti noin viisi tuntia, joskin jonojen pituus vaihtelee aika ajoin muutamista minuuteista jopa useisiin päiviin asti.

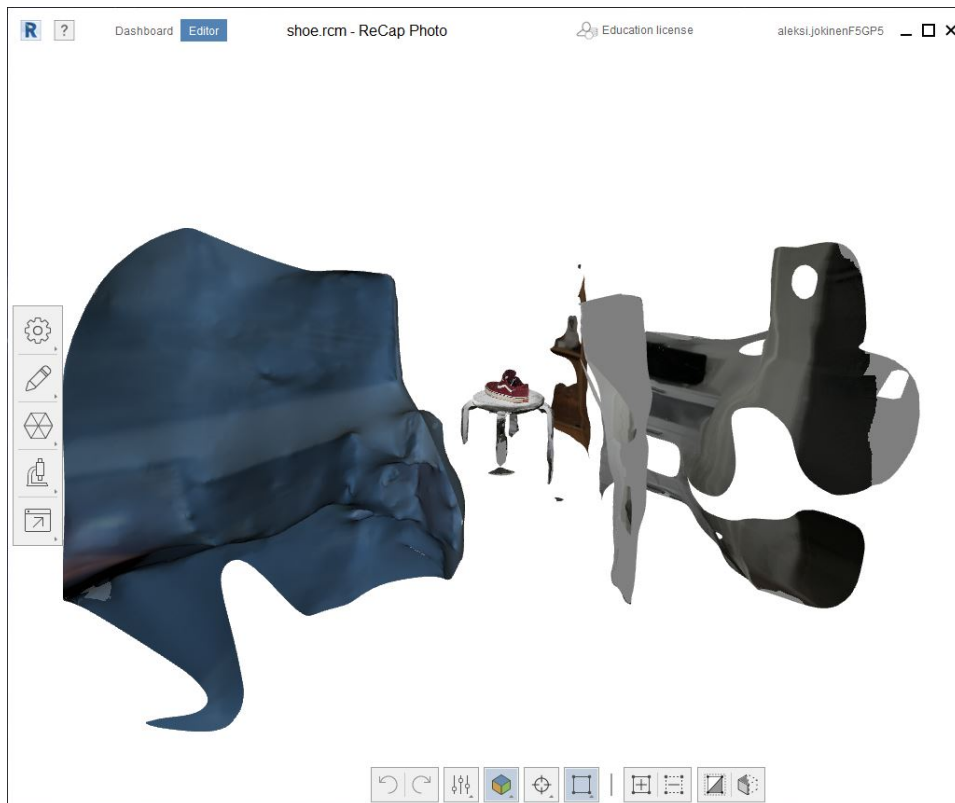
ReCap Photo hyödynsi kaikkia sille syötettyjä kuvia (152 kappaletta) ja muodosti niistä parhaimman näköisen lopputuloksen muihin sovelluksiin verrattuna. Tämä sovellus kuten muutkin loivat myös ympäristöä, jota tallentui kuvaushetkellä kuviin kuten kuvassa 5 on nähtävissä.



Kuva 5. Valmis malli ReCapin omassa editointitilassa.

Kuten kuvassa näkyy, kengän ympärillä on paljon ylimääräisiä virtuaalisia artefakteja. ReCapin sisäiset omat editointityökalut sekä mahdolliset parametrien muutokset ovat hieman rajoittuneita.

Näillä työkaluilla voidaan niin sanotusti vain esikäsitellä mallinnusta esimerkiksi pienempään kokoon muuttamalla polygonien määrää ja leikkaamalla tai täyttämällä mallista löytyviä defektejä (kuva 6). Jos valmista 3D-mallia täytyy editoida laajemmin, on suositeltavaa muokata työtä 3D-mallinnukseen tehdyssä ohjelmistossa.



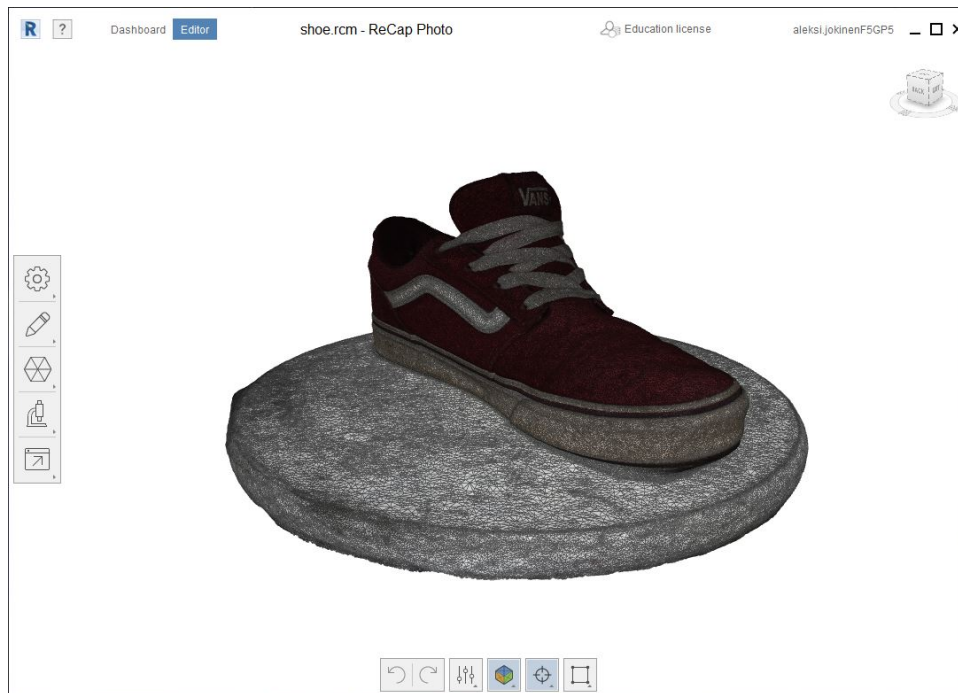
Kuva 6. Ylimääräisten artefaktien maalaaminen ja poistaminen.

Ennen artefaktien poistamista mallinnuksen ympäriltä ReCap raportoi verteksien eli kärkien(pisteiden) kokonaismääräksi 661,471 kappaletta. Särmiä(face) mallinnuksesta löytyi 1 211 696 kpl. 3D-mallin siistinnän jälkeen data oli kuvan 7. mukainen.

Mesh report	
Vertices:	304,026
Faces:	553,121
Surface area:	1,281 m ²
Volume:	1,878.651 m ³

Kuva 7. 3D-mallinnuksessa olevien verteksien, särmien, pinta-alan ja volyymin määrät ja koot siistinnän jälkeen.

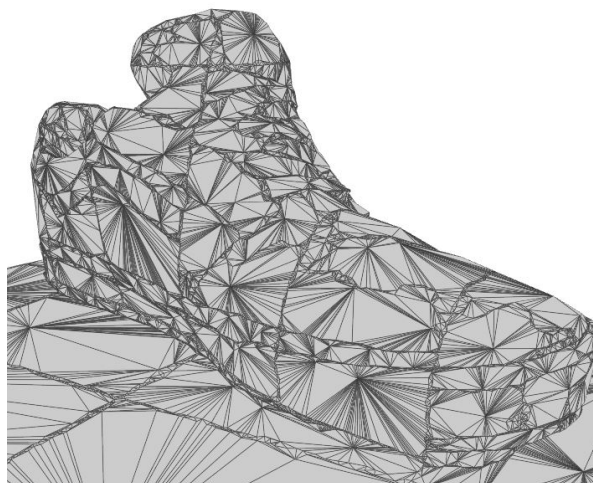
Nopealla ja helpolla siistinnällä mallinnuksen kokoa saatiin siis pienennettyä 45.96 prosenttia. ReCap mahdollistaa myös verteksien sekä särmien yksinkertaistamista pienentämällä niiden määrää halutulla prosentilla. Liian suuri pienennys voi vaikuttaa mallinnuksen ulkonäköön ja muotoon, mutta tämä on hyödyllinen ominaisuus esimerkiksi silloin kun halutaan fotogrammetrinen malli tuoda vaikkapa peliin assetiksi pienemmällä koolla. 3D-mallinnuksen tarkempaa käsittelyä varten ohjelmisto tarjoaa erityylyisiä näkymiä. Kuvassa 8. oleva oletusnäkyminen avattaessa näyttää mallinnuksen tekstuureineen, joka voidaan tarvittaessa vaihtaa esimerkiksi näyttämään tekstuureiden lisäksi myöskin 3D-mallin wireframe eli polygoneista muodostuva verkko.



Kuva 8. Kenkä, jossa näkyvissä tekstuuriin lisäksi myös 3D-mallin wireframe.

Fotogrammetrialla toteutetut mallinnukset ovat geometrisesti erittäin kompleksia ja kuten aiemmin mainittiin, on ReCapin avulla mahdollista pienentää mallin särmiä määrää.

Ohjelmisto tarjoaa myös ominaisuuden säilyttää parhaanlaatuinen geometria tekstuuriin menettämisen hinnalla. Työtä varten luodun mallinnuksen särmiä määrää pystytään pienentämään 553 tuhannesta särmästä aina vain viiteen tuhanteen särmiin asti (kuva 9). Automaattinen särmiä määrän pienennys ei kuitenkaan yleisesti tuota mallinnusta, jota olisi mahdollista jatko käsitellä.



Kuva 9. 3D-malli viidellä tuhannella särmillä.

Mallinnuksen vieminen eri muotoihin ReCapissa on kattava. Ohjelmisto mahdollistaa integroidut ominaisuudet kuvan sekä videon muodostamiseen 3D-mallista sekä perinteisen mallinnuksen tallentamisen jatkokäsittelyä varten muilla ohjelmistoilla. Kuvan tallentamisen vaihtoehdot pikseleiden määrälle vaihteleva

1024-8192 leveyspikselin välillä. Videona mallinnus voidaan tallentaa jopa 4K-resoluutiolla.

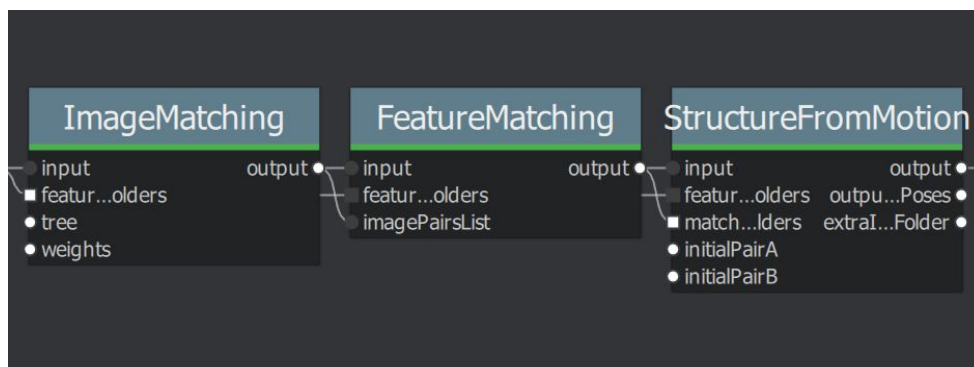
Mallinnuksen tallentaminen ohjelmistossa on mahdollista useaan eri muotoon. Mallinnus voidaan myöskin tallentaa suoraan optimoituna tietyille 3D-ohjelmistolle kuten 3ds Max, jolloin se tallentuu .FBX-muotoon. Muita mahdollisia tiedostomuotoja joiksi työ voidaan tallentaa ovat: .OBJ, .OBJ(Quads), .PLY, .PTS sekä .STL 3D-tulostamista varten.

6.2 Meshroom

Opinnäytetyön ainut täysin ilmainen avoimen lähdekoodin fotogrammetriasovellus. Helpoimmillaan mahdollistaa kuvien syöttämisen ohjelmaan ja yhden napin painalluksen. Suorittaa 3D-mallinnuksen rekonstruktion paikallisesti käyttäen tietokoneen omaa laskentatehoa. Työn liitteessä mainitut tietokoneen komponentit, joita mallinnuksen luomiseen käytettiin, saivat luotua valmiin 3D-mallin noin kahdessa tunnissa.

Meshroomin automaattinen kuvien ja kameroiden tarkastus hylkäsi syötetystä kuvamäärästä noin kolmanneksen. Valmiin lopputuloksen muodostamiseen käytettiin siis 105 kameraa 152 sijasta. Tästä huolimatta ohjelmisto kykeni luomaan varsin varteenotettavan 3D-mallin.

Meshroom mahdollistaa mallinnuksen parametrien muokkaamisen liukuhihnatyyppisellä ratkaisulla, jossa erilaisia siihen liittyviä numeraalisia arvoja on mahdollista muokata (kuvassa 10). Tällä tavalla mallinnuksen editointi ei ole helpoimmasta päästä sillä loppukäyttäjän tulisi tietää miten arvon muuttaminen oletuksesta vaikuttaa 3D-mallin luontiin.



Kuva 10. Meshroomin "liukuhihnamalli" (eng. pipeline).

Valmis 3D-malli on mahdollista tallentaa tulevaa työskentelyä varten vain Meshroomin omaan .mg(Meshroom Graphs) tiedostomuotoon. Mallinnus pystytään viedä kuitenkin muihin ohjelmiin, sillä se tallentuu sekä .mtl- että .obj tiedostomuotoihin. Tällöin tulee muistaa, että jälkikäsitteilyn suorittaminen mallinnukseen poistaa mahdollisuuden avata se myöhemmin Meshroomissa.



Kuva 11. Vasemmalla kuva kengästä ja oikealla Meshroomin luoma 3D-malli.

6.3 3DF Zephyr

Erittäin käyttäjäystävällisellä ja intuitiivisella käyttöliittymällä varusteltu 3DF Zephyr mahdollistaa 3D-mallinnuksen luomisen helposti ja virtaviivaisesti. Ohjelmistolle syötetään halutut kuvat ja määritellään projektiin halutut parametrit ohjattun luomisen avulla. Ohjattu luominen avustaa alusta asti valmiiseen mallinnukseen saakka ja toimii niin ikään myös tutoriaalina henkilölle, joka käyttää ohjelmistoa ensimmäistä kertaa. 3D-mallin luominen ohjelmistolla tapahtuu seuraavasti.

Luodaan uusi projekti. Heti projektin luomisen yhteydessä ohjattu luominen kertoo käyttäjälle, miten kuvat, joita aiotaan käyttää, tulisi ottaa. Ensimmäisessä ikkunassa on mahdollista valita vaihtoehtoiksi 3D-mallin luominen automaattisesti projektin luonnin jälkeen, tekstuuriin luominen pintojen muodostamisen jälkeen, kuvien maskeeraus ylimääräisen taustan eliminoimiseksi sekä verkosta valmiiksi laskettujen kamerakalibrointien hakemisen.

Vaihtoehtojen valinnan jälkeen ohjelmalle syötetään joko objektista otetut kuvat tai vaihtoehtoisesti siitä kuvattu video taikka panoraamakuva. Kuvien syötön jälkeen niiden ottamiseen käytetyn kameran tallentama metadata näytetään ja halutessaan käyttäjä voi muokata kameran kalibrointia kuvakohtaisesti kuten alla olevassa kuvassa 12. näkyy.

Camera	Calibration
IMG_0143.JPG	Adjusted (Canon EOS 60D - 18 mm / 0x0033 5184 x 3456 px)
IMG_0144.JPG	Adjusted (Canon EOS 60D - 18 mm / 0x0033 5184 x 3456 px)
IMG_0145.JPG	Adjusted (Canon EOS 60D - 18 mm / 0x0033 5184 x 3456 px)
IMG_0146.JPG	Adjusted (Canon EOS 60D - 18 mm / 0x0033 5184 x 3456 px)
IMG_0147.JPG	Adjusted (Canon EOS 60D - 18 mm / 0x0033 5184 x 3456 px)
IMG_0148.JPG	Adjusted (Canon EOS 60D - 18 mm / 0x0033 5184 x 3456 px)
IMG_0149.JPG	Adjusted (Canon EOS 60D - 18 mm / 0x0033 5184 x 3456 px)

Kuva 12. Kuvatiedostoja sekä niissä olevat muokattavissa olevat parametrit (kalibrointi).

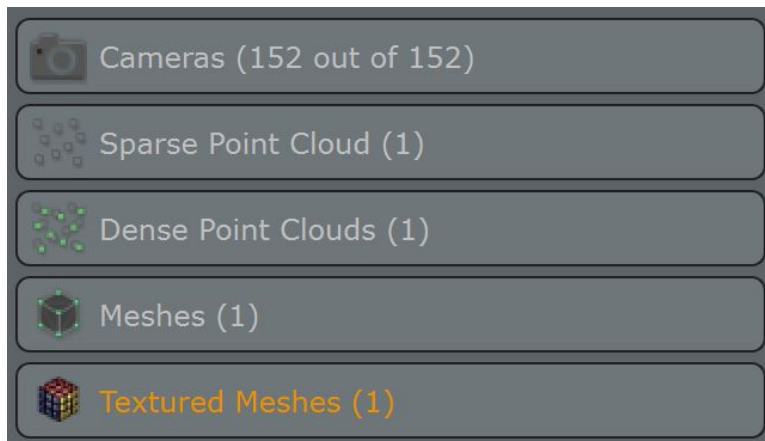
Edellisessä kuvassa olevat tiedot, joita ohjelmisto hyödyntää ovat kameran merkki sekä malli, polttoväli sekä otetun kuvan resoluutio pikseleinä. Jos jokaisen syötetyn kuvan metadata on yhtenäistä, tarvetta kalibroinnin muuttamiselle ei ole.

Seuraavaksi avautuvassa dialogissa voidaan ohjelmistolle määritellä kuvatun kohteen tarkempia tietoja kuten minkälaisesta kohteesta on kyse. Tämän avulla ohjelmisto pystyy käyttämään erilaisia algoritmeja muodostaakseen tietyn tyyppisestä kohteesta 3D-mallin paremmin. Vaihtoehtoina kuvatun kohteen tyyppille ovat; **yleinen**, tukee yleisimpiä kuvattuja kohteita, joita rekonstruoida. **Lähikuvaus**, sopii yleistä paremmin selvästi läheltä kuvattuihin kohteisiin, joiden pieniin yksityiskohtiin tahdotaan panostaa. Toimii parhaiten, kun kaikki kuvat on otettu samoilla kameran asetuksilla ja saman etäisyyden päästä. Tätä vaihtoehtoa käytettiin juurikin edellä mainittujen seikkojen takia. Kolmas vaihtoehto kohteen tyyppille on **ilmakuvaus**, hyödyllinen silloin kun kuvat kohteesta on otettu esimerkiksi dronella. Lisävaihtoehtoina löytyy myös **urbaani**, rakennuksien ynnä muiden rekonstruointiin sekä **ihmiskeho**, kun kuvattava kohde on ihminen taikka osa siitä.

Sopivan kategorian valinnan jälkeen ohjelmalle voidaan myös vielä määritellä kuinka tarkasti mallinnus tulisi luoda. Tämä vaikuttaa suoraan valmiin mallin generointiin vaadittavaan aikaan. Työssä käytettiin hitainta vaihtoehtoa eli deepasetusta, joka käyttää enemmän iteraatioita mallinnuksen säätötoistoon, avainpisteiden luontiin sekä kameroiden luomiseen.

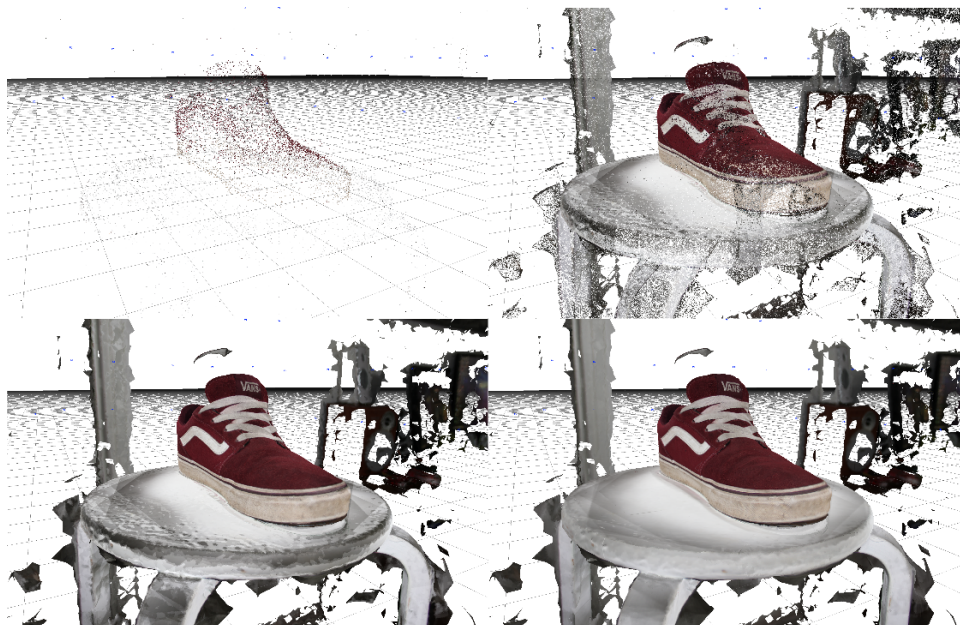
Halutessaan kokeneempi käyttäjä pystyy myös muokkaamaan ja määrittelemään useita erilaisia parametreja manuaalisesti numeraalisten arvojen muodossa. Työssä tätä optiota ei käytetty sillä valmisvaihtoehtojen mukaisesti luotu mallinnus onnistui hyvin eikä tekijällä ollut tarpeeksi kokemusta tai tietämystä parametrien muokkaamisesta kyseisessä ohjelmassa.

Valmiin 3D-mallin luominen kesti noin kolme tuntia. Ensimmäinen vaihe, jonka 3DF Zephyr suorittaa on kameroiden rekonstruointi objektin ympärille. Ohjelmiston aikaisemman käytön ja kokeilun perusteella oletusarvo hyödynnettyjen kuvien ja kameroiden sijainnin määrästä oli kaksi kolmasosaa kuten Meshroomia käytettäessä tapahtui. Tämän sijaan kuitenkin 3DF Zephyr käytti kuitenkin kaikkia sille syötettyjä kuvia kuten alla olevassa kuvassa 13. näkyy.



Kuva 13. Projektin navigointinäkymä. Kuvassa näkyvissä syötetyt kuvat ja miten monta niistä käytettiin mallinnuksessa (152/152).

Kuten muissakin työssä käytetyistä ohjelmista, myös 3DF Zephyr seuraa tiettyä kaavaa mallinnuksen luomiseksi. Kameroiden sijainnin määrittelyn jälkeen ohjelma muodostaa harvennetun pistepilven. Tämän jälkeen algoritmi laskee harvennetun pistepilven avulla mallinnukselle tiheän version pistepilvestä. Kun tiheä pistepilvi on saatu muodostettua, siitä luodaan verkko mikä viimeiseksi vielä teksturoidaan. Poikkeuksena muihin ohjelmiin, 3DF Zephyr mahdollistaa jokaisen vaiheen erillisen tarkastelun mallinnuksen valmistuttua. Alla olevassa kuvassa 14. näkyy eri vaiheet mallinnuksen luonnissa.



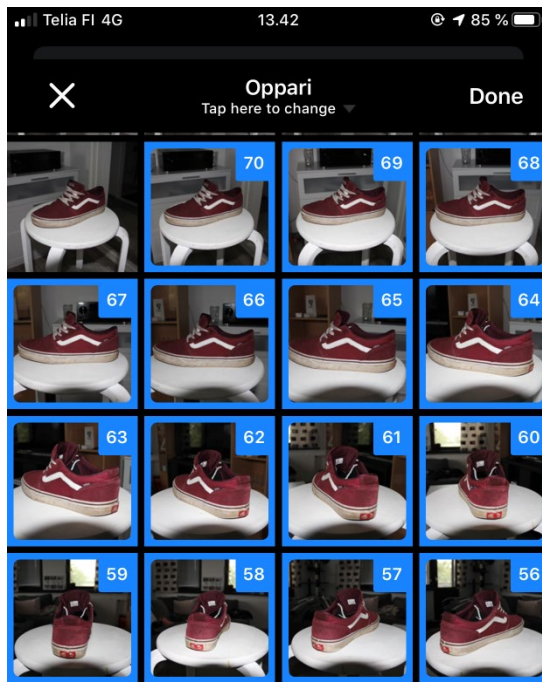
Kuva 14. 3D-mallinnus sen neljässä eri vaiheessa (Järjestyksessä harva ja tiheä pistepilvi ylhäällä sekä verkko ja teksturoitu versio alempana.)

Perinteisten ominaisuuksien lisäksi 3DF Zephyrissä on myös integroitu animointityökalu, jonka avulla mallinnuksesta voidaan luoda video esimerkiksi vaikkapa sketchfab.com-palveluun näytettäväksi. Animaattorin sekä sen editointityökalun käyttämisestä työssä ei käsitellä sillä muut ohjelmat eivät mahdollista videon luontia eikä tämän ominaisuuden käsittely ole työssä tehtävän vertailun kannalta relevanttia.

6.4 Trnio

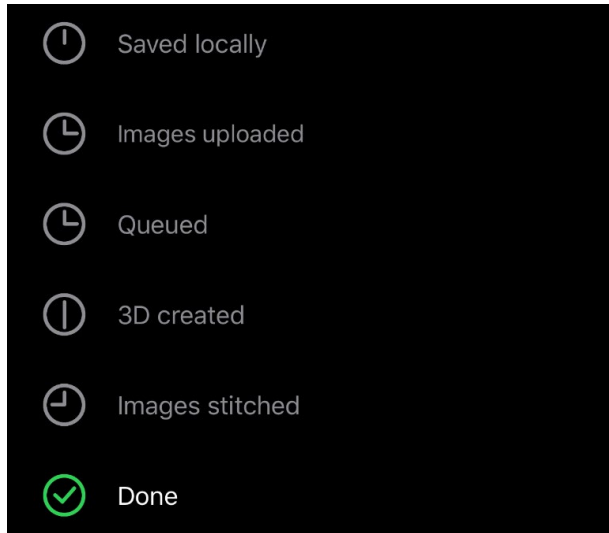
Koska työssä käsitellään kolmea eri tietokonepohjaista fotogrammetriasovellusta, päätettiin vertailun vuoksi myös mukaan sisällyttää yksi puhelimelle suunniteltu sovellus. Kengästä otetut kuvat, joita työssä on käytetty, kopioitiin puhelimeen (iPhone 8 plus) ja vietiin Trnio-sovellukseen. Sovelluksen rajoituksena on 70 kuvan maksimimäärä (kuva 15). Otetuista kuvista jouduttiin siis hylkäämään hieman yli puolet (53.95%).

Käytettävyydeltään Trnio on helppo ja nopea. Prosessointi tapahtuu puhelimen omalla suorittimella, jonka vuoksi ohjelmaan syötetyt kuvat kompressoidaan erittäin pieniksi. Kokonaisuudessa 70 kuvan mallinnuksen luominen kuvien syö-
töstä valmiiseen 3D-malliin asti käytetyllä puhelimella vei aikaa vain 9 minuuttia.



Kuva 15. Kuvien valinta ja syöttäminen. Ohjelma tukee maksimissa 70 kuvaa kerralla.

Kun kuvat on syötetty ohjelmalle, ilmaisee ohjelma käyttäjälle mikä työskentelyn status on (kuva 16). Ensimmäinen vaihe on tallentaa kuvat puhelimen muistista sovellukseen väliaikaisesti. Tämän jälkeen ohjelmisto alkaa muodostamaan 3D-mallia liittämällä kuvat yhteen oman algoritminsa avulla. Toimintaperiaatteen toimii samalla tavalla kuin muutkin fotogrammetriasovellukset.



Kuva 16. Ohjelmiston eri vaiheet 3D-mallin muodostamisessa.

Kun ohjelma on luonut mallinnuksen, sitä on mahdollista katsoa 3D-ympäristössä puhelimen näytöltä (kuva 17). Vaihtoehtoisesti 3D-mallia voidaan tarkastella Augmented Reality-tilassa (AR), eli sijoittaa mallinnus esimerkiksi omaan olohuoneeseen käyttäen puhelimen omaa kameraa.



Kuva 17. Valmis 3D-malli.

Kuten edellisestä kuvasta näkee, on Trniolla tehty 3D-malli suhteellisen huonolaatuinen verrattuna tietokoneilla käytettäviin ohjelmistoihin, jotka ovat paljon kehittyneempiä. Puhelimelle tämä sovellus on kuitenkin toteutettu hyvin ja ottaen huomioon mobiililaitteen rajoitukset ei mallinnus loppujen lopuksi ole niin huono kuin voisi olettaa.

Mallinnuksen tallennus sekä vieminen voidaan toteuttaa sovelluksesta suoraan sketchfab.com palveluun tai vaihtoehtoisesti ladata .obj-muotoisena.

7 OHJELMISTOJEN VERTAILU

Mahdollisimman kattavien tuloksien saamiseksi, vertailukohtina ohjelmistojen välillä käytetään teknisten ominaisuuksien lisäksi myös niiden helppokäyttöisyyttä, luotujen tiedostojen kokoa, käyttöliittymän ulkonäköä sekä hintoja. Ensimmäisessä vertailussa kohteina ovat tietokoneella käytettävät ReCap, 3DF Zephyr sekä Meshroom. Tämän lisäksi näkökulman sekä vertailukohtien saamiseksi käydään myös läpi mobiililustoille suunnattua Trnio-sovellusta.

7.1 Laitteistovaatimukset

Ohjelmistojen väliset laitteistovaatimukset poikkeavat toisistaan niiden ominaisuuksien kuten ReCapin pilviprosessoinnin vuoksi. Liitteessä 2. listataan valmistajan ilmoittamat suositus- sekä minimivaatimukset sujuvaan työskentelyyn. Vaatimusten alittaminen ei kuitenkaan välttämättä tarkoita automaattisesti, että kyseistä ohjelmistoa ei voisi käyttää. Esimerkkinä Autodeskin ReCap, jossa minimi keskusmuistin määräksi on asetettu 64 gigabittiä.

Työssä käytetyssä järjestelmässä on 24 gigabittiä DDR3-pohjaista muistia. Tämä ei kuitenkaan vaikuttanut oleellisesti mallinnuksen luontiin sillä muistiin ladatut tiedostot työskentelyä varten eivät vaatineet kovinkaan paljoa keskusmuistia. Voidaan olettaa keskusmuistin määrän olevan relevanttia mitä isommasta sekä yksityiskohtaisemmasta mallinnuksesta on kyse. Parhain tapa selvittää järjestelmän ominaisuuksien kelpoisuus ohjelmiston käyttöön on ladata ilmainen kokeiluversio. Järjestelmävaatimukset eivät siis ole suoranaisesti vaatimuksia vaan enemmänkin suosituksia, joita on hyvä seurata.

7.2 Tehokkuus

Yksi tärkeimmistä selvitettävistä vertailukohdista ohjelmien välillä on niiden tehokkuus ja nopeus mallinnuksen luonnissa. Tuloksissa otetaan huomioon eri ohjelmistojen käyttämä datan määrä työssä luodun kengän mallintamiseen.

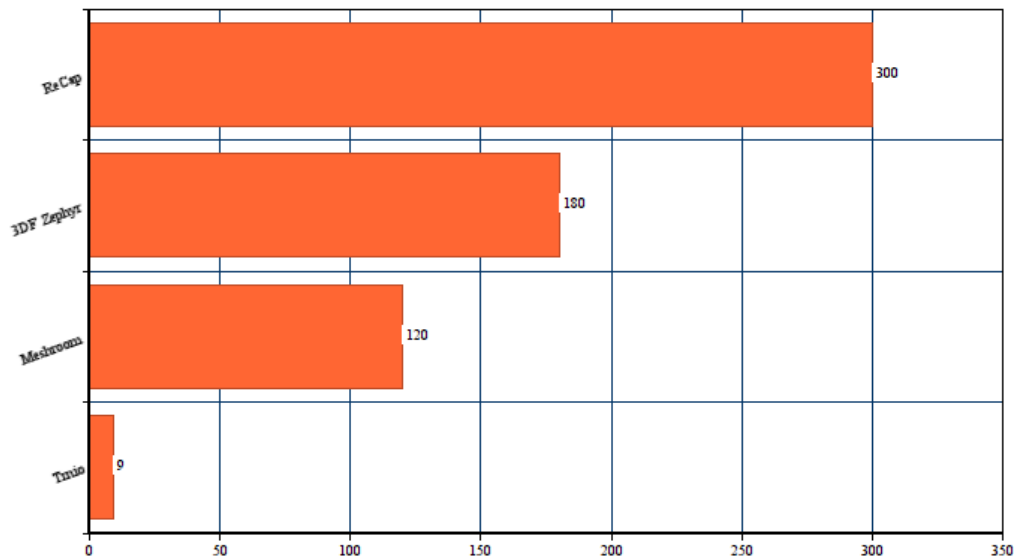
Ohjelmille syötetyt kuvat olivat kooltaan yhteensä 721MB ja niitä oli 152 kappaletta. ReCap ei ilmoittanut hyväksytyjen kuvien määrää. Meshroom hyväksyi syötetyistä kuvista 105 kappaletta, 3DF Zephyr kaikki 152 kappaletta ja Trnio käytti 70 kuvan maksimimäärää, jota sovellukselle voidaan syöttää per mallinnus.

Näiden erojen perusteella sekä vain yhden mallinnuksen suorittamisella ei voida todeta tarkasti ohjelmistojen välisiä eroja. Perspektiivin ja vertailun suorittamiseksi kuitenkin on selvää, että vertailtavista ohjelmistoista tässä työssä osiossa parhaiten suoriutui 3DF Zephyr. Lopputuloksen kannalta käytettyjen kuvien määrä ei korreloi kuitenkaan viimeistelyyn mallinnukseen ja sen ulkonäköön.

7.2.1 Nopeus

Jokaisen eri ohjelmiston käyttämä aika mallinnukseen vaihtelee suuresti riippuen käytettyjä parametrejä. Työssä mallinnuksen luonnissa asetuksia ei muuteltu vaan ne pidettiin sellaisena kuin ne ovat. ReCapin nopeutta ei pystytä määrittelemään sillä ohjelmisto toimii jonotusperiaatteella ja käyttää pilviprosessointia. Mainittakoon kuitenkin mallinnuksen valmistumiseen kulunut aika työtä tehdessä mikä oli viisi tuntia. Meshroom käytti aikaa vastaavasti kaksi tuntia ja 3DF Zephyr kolme tuntia. Trnio puolestaan suoritti koko toimenpiteen yhdeksässä minuutissa.

Nopeuden puolesta ylivoimaisesti parhain ohjelmisto oli Trnio, tämä ei kuitenkaan vertailussa juurikaan ole relevanttia ohjelmien välisten poikkeavuuksien sekä lopputuloksen kannalta.



Kuva 18. Eri sovellusten käyttämä aika 3D-mallin luonnissa (minuutteina).

7.2.2 Käytettävyys

Käytettävyydellä työssä tarkoitetaan ohjelmistojen luomien mallinnuksien kompleksisuutta, kokoa, jatkoeditoinnin mahdollisuutta sekä yhteensopivuutta muiden ohjelmistojen kanssa. Vertailussa käytetty ohjelmisto on Autodeskin kehittämä 3ds Max 2019.

Valmiiden mallinnusten tiedostokoot ovat seuraavanlaiset:

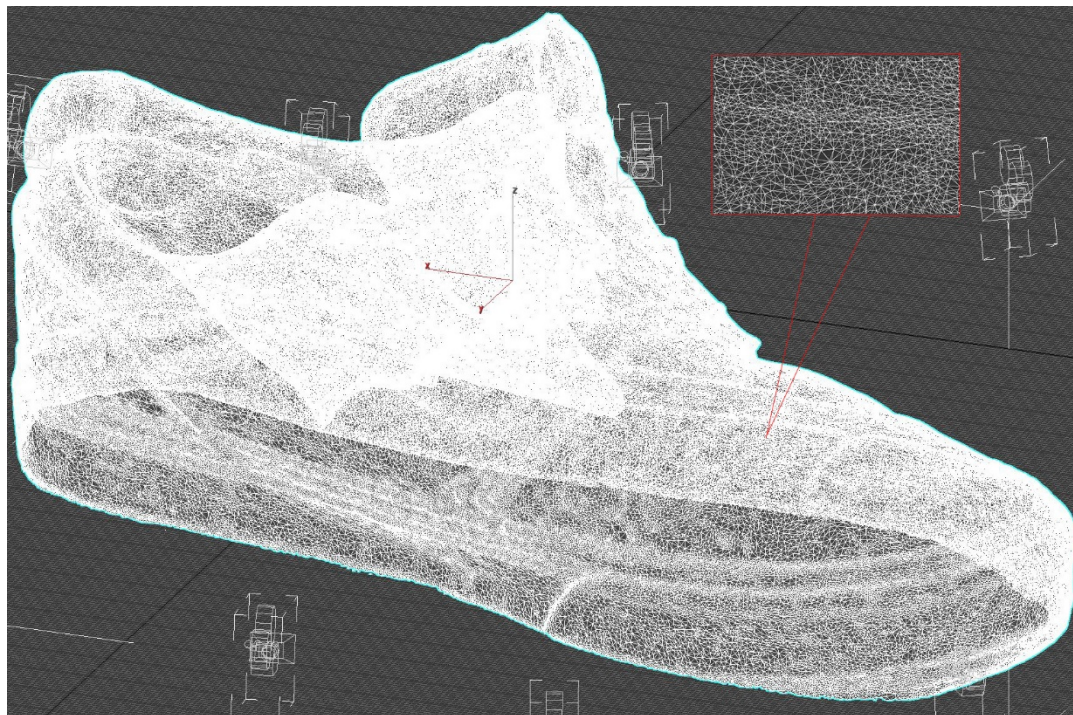
ReCap 25.6mb (.fbx), Meshroom 18.5mb (.fbx), 3DF Zephyr 92.0mb (.obj), Trnio 15.3mb (.obj).

Koska tiedostomuodot poikkeavat toisistaan otetaan vertailuun mallien koko vietyinä 3ds Max-ohjelmistoon ja tallennettuna .max-muotoon (3dsMax scene file). Tässä muodossa mallinnukset ovat kooltaan ReCap 17.4mb, Meshroom 22.5mb, 3DF Zephyr 80mb sekä Trnio 7.56mb.

Tiedostokoot vaihtelevat erittäin paljon. Kuten voidaan olettaa, suurimman kompression kuville ja niitä pienimmän määrä käyttänyt Trnio loi mallin, joka oli kooltaan pienin. Tiedostokoot eivät kuitenkaan ole yhdessäkään mallinnuksessa järin suuria ottaen huomioon nykypäivän tallennuskapasiteetin tai otettujen kuvien koon, joista mallinnukset tehtiin.

7.2.3 Mallinnuksen kompleksisuus

Kompleksisuudella tarkoitetaan mallinnuksesta löytyvien polygonien sekä verteksien määrää. Polygonit ovat monikulmiota, jotka ovat yhdistettynä toisiinsa verteksien avulla kuten kuvassa 19 näky. Yhdessä ne muodostavat verkon(mesh) joka toimii 3D-mallin tukirankana.



Kuva 19. Polygoneista sekä verteksistä muodostuva verkko.

Alla taulukossa 2. näkyy polygonien ja verteksien määrät eri ohjelmistoilla luoduissa 3D-malleissa. Työkaluna käytettiin 3ds Max-ohjelmiston statistiikkaa.

Taulukko 2. Polygonien ja verteksien määrät

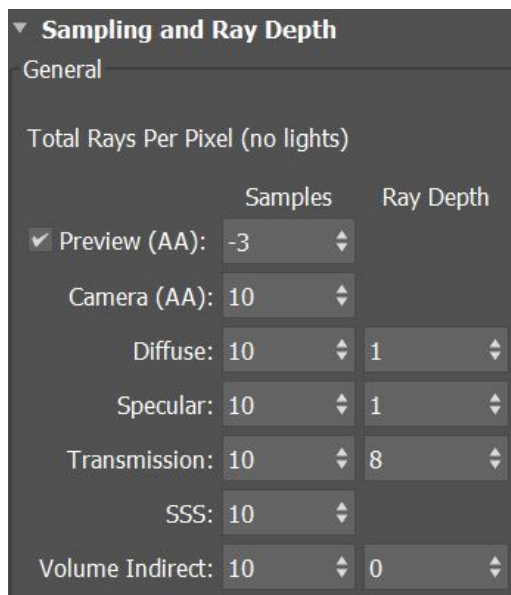
Ohjelmisto	Polygonit	Verteksit
ReCap	389 018	195 187
Meshroom	393 533	197 295
3DF Zephyr	880 867	444 298
Trnio	66 761	33 894

Fotogrammetrinen mallintaminen luo lähes poikkeuksetta aina erittäin kompleksia 3D-malleja. Polygonit ovat vaikeasti muokattavissa olevia sillä ne eivät ole esimerkiksi kolmion tai neliön mallisia, jolloin yksityiskohtainen editoiminen on helpompaa.

Tämän lisäksi luodut mallit ovat erittäin raskaita ja niiden käyttäminen esimerkiksi pelin assettina ei ole kovin käytännöllistä. Lisäksi 3D-mallin renderöintiin vaikuttaa huomattavasti kompleksisuus. Jokainen polygoni ja verteksi renderöidään, mitä enemmän niitä 3D-mallissa on, sitä kauemmin renderöinnissä kuluu aikaa. Opinnäytetyössä 3D-mallista luotiin vain kuvia, joten mallien kompleksisuutta ei tarvinnut yksinkertaistaa.

7.2.4 3D-mallien renderöinti

Vertailun viimeisessä osiossa tarkastellaan miltä 3D-mallit näyttävät renderöitynä käyttäen Autodeskin 3ds Max 2019-ohjelmistoa. Renderöintimoottorina käytettiin Arnoldia. Kuvien resoluutioksi määriteltiin 1920x1080 pikseliä. Tämän lisäksi asetuksia muutettiin alla olevan kuvan 20 mukaisesti. Muut parametrit jätettiin sellaiseksi kuin ne oletusarvoisesti ovat.



Kuva 20. Käytetyt renderöintiasetukset.

Kuvien renderöinnissä mallinnuksen alle sekä taustalle lisättiin kaksi harmaata pintaa taustaksi. Renderöintiaika kuvakohtaisesti seurasi tähänastista trendiä, kompleksisimman 3DF Zephyrin 3D-mallin renderöintiin kului aikaa noin kuusi tuntia. ReCap ja Meshroom mallien luontiin aikaa puolestaan meni hieman yli neljä tuntia ja Trnio luoman mallin renderöintiin noin kolme tuntia. Lisäksi jokaisesta 3D-mallista renderöitiin myös lisätyllä valolla versio A360-renderöintipalvelua käyttäen.

7.2.5 Trnio

Renderöintejä vertaillessa ja analysoidessa on selvää, että mobiilipohjainen Trnio suoriutui kaikista heikosten muista työssä käytetyistä ohjelmista. Mallinnus on täynnä artefakteja ja näyttää kuin se olisi digitaalisesti korruptoitunut. Tärkeää huomioitavaa kuitenkin on valmiiden kuvien syöttäminen Trnioon. Muihin ohjelmistoihin syötettiin kaikki otetut 152 kuvaa kun Trnio puolestaan tukee maksimissaan vain 70 kuvaa. Tämän lisäksi kyseessä on puhtaasti vain iOS-laitteille kehitetty mobiilipohjainen sovellus. Valitut ohjelmalle syötetyt kuvat eivät mitään ilmeisemmin olleet sopivia minkä vuoksi mallinnus epäonnistui.



Kuva 21. Trnion luoma 3D-mallinnus renderöitynä.

Kyseessä kuitenkin on erilaisten fotogrammetristen sovellusten vertailu, tehdään Trniolla vielä eksklusiivisesti sillä skannattu mallinnus käyttäen puhelimen omaa kameraa sovelluksen ollessa päällä.



Kuva 22. Trnio-sovelluksella itsessään otetut kuvat ja niistä renderöity 3D-mallinnus käyttäen Autodeskin A360-verkkorenderöintiä.

7.2.6 Meshroom

Täysin ilmainen ja avoimeen lähdekoodiin pohjautuva Meshroom loi myös mallinnuksen, jossa on silmiinpistäviä defektejä ja eroja varsinaiseen kuvattuun kohteeseen. Lopputulos on kuitenkin erittäin hyvä ottaen edellä mainitut seikat huomioon. Työssä tehdyn testin perusteella voidaan todeta Meshroomin mahdollistavan erittäin laadukkaitakin 3D-mallinnuksia, joskin yksityiskohtaiset läheltä kuvatut objektit saattavat aiheuttaa defektejä kuten työssä selvisi.



Kuva 23. Meshroomin luoma 3D-mallinnus renderöitynä paikallisesti.



Kuva 24. 3D-malli renderöitynä käyttäen A360-verkkorenderöintiä.

7.2.7 3DF Zephyr

3DF Zephyrillä luotu skannaus on erittäin yksityiskohtainen ja tarkka muutamaa pikku defektiä lukuun ottamatta. Kengän kyljessä valkoisen osan alapuolella on kaksi pientä defektien muodostamaa pistettä. Tämän lisäksi osa kengästä on yksityiskohtaisempaa kuin muu osa. Kengännauhat, valkoinen alapohja ja iltti* ovat osittain paljon tarkempia kuin muut kengän osat.

*(Nauhakengässä kengän nauhahalkion alla oleva suojakappale, kengän kieli)
(Suomisanakirja, 2019)



Kuva 25. 3DF Zephyrin luoma 3D-mallinnus renderöitynä paikallisesti.



Kuva 26. 3D-malli renderöitynä käyttäen A360-verkkorenderöintiä.

7.2.8 ReCap

Työssä parhaiten suoriutunut ohjelma ReCap loi lähes virheettömän rekonstruoinnin annetuista kuvista. Tarkemmalla tarkastelulla renderöidystä kuvasta on erittäin vaikeaa hahmottaa mitään defektejä. Huomioitavaa kuitenkin on 3D-mallin epätarkkuus tarkastellessa mallinnusta läheltä. 3DF Zephyr oli kaikista ohjelmista tarkin muodostaessaan kengän päällystä (kanvaasia ja mokkaa).



Kuva 27. ReCapin luoma 3D-mallinnus renderöitynä paikallisesti.



Kuva 28. 3D-malli renderöitynä käyttäen A360-verkkorenderöintiä.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työssä käytettyjen sovellusten, niiden analysoinnin sekä vertailun perustella voidaan tehdä työhön kohdistuvia suppeita päätelmiä ohjelmistojen toimivuudesta yleisesti.

Päätelmissä ei kuitenkaan huomioida sitä, kuinka kuvat vaikuttavat tuotettuihin 3D-malleihin, tämän sijasta keskitytään puhtaasti vain ohjelmien toimintaan sekä niiden hintoihin. Työn tekijän johtopäätös parhaasta ohjelmasta on 3DF Zephyr vaikkakin parhaan mallinnuksen oletusasetuksilla tuotti ReCap.

Alla olevissa osioissa selvitetään sovellusten hyviä ja huonoa puolia. Nämä ovat kuitenkin puhtaasti työn tekijän mielipiteitä ja päätelmiä. Jokaista tietokonepohjaista ohjelmistoa on mahdollista koekäyttää erilaisilla kokeiluversioilla ennen varsinaista ostoa.

8.1.1 Autodesk ReCap

Toiminnaltaan kevytrakenteinen. Käyttöliittymä pelkistetty ja yksinkertainen. Työskentely kuvien syöttämisestä valmiiseen mallinnukseen asti helppoa ja vaivatonta. Ei mahdollista juurikaan mallin editoimista itse sovelluksen sisällä, tukee kuitenkin kattavasti 3D-mallin viemistä (export) muihin ohjelmistoihin, joissa suorittaa jälkikäsitteilyä. Sisältää myöskin mahdollisuuden optimoida vietävä malli suoraan tiettyyn ohjelmaan, jolloin jälkikäsitteily vielä helpompaa.

Ei mahdollista mallinnuksen prosessointia paikallisesti vaan verkon yli palvelun omilla palvelimilla. Tämän lisäksi isompien töiden prosessointi Autodeskin verkossa (pakollinen) vaatii maksetun tilauksen lisäksi myöskin ”pilvikrediittejä” (eng. cloud credits), joita tulee käyttää fotogrammetrisen mallinnuksen luomiseksi. Toimii kuukausimaksullisella tilauksella, ohjelmaan ei voi ostaa pysyvää lisenssiä. Hinta ohjelmistolle 48,40 € kuukaudessa, yhden vuoden tilauksella 405,35 € ja kolmen vuoden tilauksella 1 095,05 €. Mallinnusten prosessoinnin kustannukset määräytyvät projektin kuvatiedostojen määrän mukaan. 1-300 kuvaa 12 krediittiä, 301-700 kuvaa 30 krediittiä ja 701-1000 kuvaa 55 krediittiä. Yhden krediitin hinta on yksi euro. Kokeilu sekä opiskelijaversioissa krediitit eivät ole käytössä. Opiskelijaversioiden lisenssi voimassa kolme vuotta kerrallaan.

Yleisesti ohjelmisto on tehokas ja tuottaa hyvälaatuisia mallinnuksia huonomistakin kuvista. Huonoa ohjelmistossa on puute ostaa pysyvä lisenssi, tilausmaksun lisäksi prosessointiin käytettävät maksulliset krediitit ja paikallisen prosessoinnin puute.

8.1.2 Meshroom

Avoimeen lähdekoodiin pohjautuva ilmainen ohjelmisto. Ei sisäänrakennettuja tutoriaaleja eikä editointimahdollisuuksia itse sovelluksessa. Kattava dokumentaatio Github-palvelussa. Erittäin kevyt ja pienikokoinen työkalu, mikä osaa hyödyntää käytettävissä olevaa prosessointitehoa. Soveltuu loistavasti käyttäjälle, joka omaa jo aikaisempaa kokemusta fotogrammetriasta sekä ymmärtää miten tulkita mahdollisia virhekoodeja tai muokata parametrejä numeraalisesti.

8.1.3 3DF Zephyr

Työssä tarkastelluista ohjelmistoista kaikista käyttäjäystävällisin. Työskentely alusta loppuun ohjattu. Mahdollistaa erityyppisten asetusten valinnan perustuen fotogrammetrisen mallin tyypille sekä kehittyneemmän käyttäjän tarkempien parametrien määrittysten. Kattavat jälkikäsitteilytyökalut sekä animaattori videota varten.

Käytännössä tällä sovelluksella pystyy ensikertalainenkin luomaan hyvälaatuisen mallinnuksen ja editoimaan sen viimeiseen muotoonsa ilman kolmannen osapuolen 3D- tai vastaavia jälkikäsitteilyohjelmistoja. Mahdollista ostaa neljä eri versiota. Jokainen lisenssi pysyvä kertaluontoinen maksu. Ilmaiset päivitykset vuodeksi ja tämän jälkeen mahdollista ostaa päivitystuki vuodeksi kerrallaan 20% lisenssin hinnasta.

3DF Zephyr Free ilmaisversio ohjelmistosta, kuvien määrä rajattu 50 kappaleeseen, tuki vain yhdelle näytönohjaimelle, perus viemis- sekä editointityökalut.

3DF Zephyr Lite hinta 149.00 €. Maksimikuvamäärä 500 kappaletta. Tukee kahta samanaikaista näytönohjainta prosessoinnissa(SLI). Perus+ viemis- sekä editointityökalut.

3DF Zephyr Pro hinta 2400.00 €. Rajaton kuvamäärä. Täysi tuki näytönohjaimien määrälle sekä mallinnuksen viennille. Kehittyneet editointityökalut. Lisäksi tässä versiossa Control points & measurements ominaisuus sekä tuki laserskannauksille.

3DF Zephyr Aerial hinta 3900.00 €. Samat ominaisuudet kuin Pro versiossa ja tämän lisäksi sisältää GIS, CAD & Survey työkalut.

8.1.4 Trnio

iOS -käyttäjärjestelmillä varusteltuihin puhelimiin. Hinta 2.99 €. Tämä ohjelmisto otettiin mukaan vertailuun perspektiivin vuoksi. Ei sovellu ammattilaiskäyttöön vaan enemmänkin nopeiden mallinnusten luontiin tilanteessa kuin tilanteessa. Erittäin helppokäyttöinen ja nopea sovellus. Sopii hyvin esimerkiksi referenssimallien luomiseksi joiden pohjalta tehdä itse 3D-mallinnus. Huonoa ohjelmistossa on salamavalon käytön puuttuminen. Tämä evää mahdollisuuden kuvamiseen pimeällä.

Lopputuloksena voidaan sanoa jokaisen ohjelmiston toimineen kuin ne on suunniteltu, hieman vaihtelevin lopputuloksin. Riippuen fotogrammetrisen mallinuksen käyttötarkoituksesta voidaan viimeistelty malli saada luotua jo itse fotogrammetriasovelluksessa ilman tarvetta jälkikäsitteilylle.

Työn tekeminen opetti tekijälleen paljon uusia asioita ja vahvisti entisestään aikaisempaa kokemusta fotogrammetriasta. Työhön olisi voitu ottaa myös muitakin fotogrammetriasovelluksia, näin ei kuitenkaan tehty sillä jo neljän sovelluksen opetteleminen, dokumentaation luku sekä itse varsinainen käyttö vei todella paljon aikaa muun taustatutkimuksen lisäksi. Aikataulun lisäksi resurssit eivät olisi riittäneet useamman kuin neljän ohjelmiston tarkasteluun ja käyttöön.

Tekijä toivoo tämän opinnäytetyön lisäävän lukijan mielenkiintoa fotogrammetriaa ja sen erilaisia tekniikoita kohtaan sekä kokeilemaan tätä kehittyvää alaa luodakseen digitaalisen version kuvaamastaan objektista.

LÄHTEET

- 3Dflow. (2019). System Requirements. Haettu 7.10.2019 osoitteesta <https://www.3dflow.net/zephyr-doc/en/SystemRequirements.html>
- AliceVision. (2019). *Photogrammetry history*. Haettu 29.8.2019 osoitteesta <https://alicevision.org/#history>
- Apple. (2019). *Trnio, App Store Preview*. Haettu 7.10.2019 osoitteesta <https://apps.apple.com/us/app/trnio/id683053382>
- Autodesk Incorporated. (2019). *Recap overview*. Haettu 2.9.2019 osoitteesta <https://www.autodesk.com/products/recap/overview>
- Autodesk. (2019). *System requirements for Autodesk ReCap Pro 2019, ReCap Photo 2019, and ReCap Pro app for iPad*. Haettu 7.10.2019 osoitteesta <https://knowledge.autodesk.com/support/recap/troubleshooting/caas/sfdcarticles/sfdcarticles/System-requirements-for-Autodesk-ReCap-Pro-2019-ReCap-Photo-2019-and-ReCap-Pro-app-for-iPad.html>
- Clemson University. (2019). *Photogrammetry*. Haettu 16.10.2019 osoitteesta <https://www.clemson.edu/centers-institutes/conservation/equipment/photogrammetry.html>
- Knight, J. (1998). *Stereoscopy & Height Measurement (RSCC)*. Haettu 10.10.2019 osoitteesta <http://geography.middlebury.edu/data/gg1002/Readings/Week2/StereoscopyHeightMeasurement.pdf>
- Kraus, K. (2011). *Photogrammetry: Geometry from Images and Laser Scans*. Saksa: Walter De Gruyter.
- Lammi, J. (1992). *Design and Implementation of a Stereo Workstation for Photogrammetric Work in GIS-Environment*. Espoo: Teknillinen korkeakoulu
- Lievendag, N. (2018). *Autodesk Recap Photo Review*. Haettu 2.9.2019 osoitteesta <https://3dscanexpert.com/autodesk-recap-photo-photogrammetry-3d-scanning-review/>
- Lucas, S., Spielmann, J., Hester, M., Kenworthy, J., Santucci, V. (2006). *Americas Antiquities: 100 Years of Managing Fossils on Federal Lands*. Yhdysvallat: New Mexico Museum of Natural History and Science
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S. & Böhm, J. (2013). *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging*. Saksa: Walter de Gruyter.

Sketchfab. (2019). Tutorial: Meshroom for Beginners. Haettu 7.10.2019 osoitteesta <https://sketchfab.com/blogs/community/tutorial-meshroom-for-beginners/>

Suomisanakirja. (2019). Iltti. Haettu 8.10.2019 osoitteesta <https://www.suomisanakirja.fi/iltti>

Trnio Incorporated. (2019). *How to get started*. Haettu 9.9.2019 osoitteesta <http://www.trnio.com/tutorial>

Vinni, P. (2003). *Kuva kertoo enemmän kuin tuhat sanaa – Mitä on fotogrammetria?* Haettu 28.8.2019 osoitteesta <http://www.kotikone.fi/faryan/Teksteja/JatkokurssiB.htm>

Wolf, P., Dewitt, B. & Wilkinson, B. (2014) *Elements of Photogrammetry with Applications in GIS, Fourth Edition*. Yhdysvallat: McGraw-Hill Education

Kamera

Canon EOS 60D järjestelmäkamera

Canon EF-S 18-135mm f/3.5-5.6 IS STM objektiivi

Canon EW-73B vastavalosuoja

Tietokone

Windows 10 Home (64-bit)

Intel Core i7 4770K (OC 4.1GHz)

Nvidia GeForce GTX 1070 (OC 8GB)

24GB DDR3 RAM

ReCap

Suosittelut järjestelmävaatimukset Autodesk ReCap Photo 2019 ohjelmistolle valmistajan mukaan ovat:

Käyttöjärjestelmä

Windows 10 (64-bit), Windows 8 (64-bit), Windows 7 Enterprise, Ultimate tai Professional (64-bit).

Proessori

Useampi i7 tai Intel Xeon prosessori.

Keskusmuisti

128 GB.

Näytönohjain

Yksi tai useampi Nvidia Quadro M6000 tai Nvidia GeForce GTX 970:stä lähtien uudempiin malleihin.

Minimivaatimukset työskentelyyn:

Käyttöjärjestelmä

Samat käyttöjärjestelmät kuin suositelluissa.

Proessori

2.0GhZ tai nopeampi 64-bittinen (x64) prosessori.

Keskusmuisti

64GB.

Näytönohjain

Nvidia GFX kortti 4 gigabitin VRAM-muistilla. (Kortin tulee tukea DirectX 11:sta). (Autodesk, 2019)

Meshroom

AliceVision ei suoranaisesti ole määritellyt ohjelmalleen tarkkoja järjestelmävaatimuksia. Sketchfab.com palvelun mukaan vaatimukset kuitenkin ovat seuraavanlaiset:

Käyttöjärjestelmä

Uudemmat Windows- sekä Linux-käyttöjärjestelmät (64-bittiset).

Näytönohjain

NVIDIA CUDA-tuettu ohjain (jossa laskenta ≥ 2.0).

Muisti

Suosittelua määrää 32GB, vaihtelee itse määritelyjen parametrien mukaisesti. (Sketchfab, 2019)

3DF Zephyr

Suosittelut järjestelmävaatimukset:

Käyttöjärjestelmä

Windows 10 (64-bit), Windows 8.1 (64-bit), Windows 8 (64-bit), Windows 7 tai Vista (64-bit).

Prosessori

Neliytiminen Intel- tai AMD-prosessori.

Keskusmuisti

32GB.

Näytönohjain

DirectX 9.0c yhteensopiva Nvidia-kortti, jossa vähintään 2GB muistia (jossa laskenta ≥ 3.0)

Minimivaatimukset työskentelyyn:

Käyttöjärjestelmä

Samat kuin suositelluissa.

Prosessori

Kaksiytiminen 2.0GHz tai vastaava prosessori.

Keskusmuisti

16GB.

Näytönohjain

DirectX 9.0c yhteensopiva Nvidia-kortti, jossa vähintään 1GB muistia. (3Dflow, 2019)

Trnio

Mobiilisovellus, jota mahdollista käyttää vain Applen tuotteilla. Alustan vuoksi vaatimukset täysin erilaiset kuin tietokoneilla käytettävissä ohjelmistoissa. Sovellus kuitenkin otettu mukaan vertailun vuoksi.

Vaatii iOS 11.3 tai myöhemmällä käyttöjärjestelmällä varustetun iPhoneen, iPadin tai iPod touchin.
(Apple, 2019)