

FOTOGRAMMETRIAN JA 3D-SKANNAUKSEN
HYÖDYNTÄMINEN 3D-MALLINNUKSESSA

Mika Uitto

Tietojenkäsittely ja tietoliikenne (ICT)
Tekniikan koulutusohjelma
Insinööri (AMK)

2017

Tietojenkäsittely ja tietoliikenne(ICT)
Tekniikan koulutusohjelma
Insinööri (AMK)

Tekijä	Mika Uitto	Vuosi	2017
Ohjaaja(t)	Kenneth Karlsson		
Työn nimi	Fotogrammetrian ja 3D-skannauksen hyödyntäminen 3D-mallinnuksessa		
Sivu- ja liitesivumäärä	55 + 6		

Tavoitteena oli tehdä 3D-malleja valokuvista monen näkymän stereo-teknologiaa hyödyntävällä ohjelmalla. Myös 3D-skannausta tutkittiin rajallisesti. Opinnäytteessä käsitellään kuvamittaukseen ja 3D-skannaukseen liittyviä teknologioita ja niitä hyödynnetään jatkossa 3D-tulostukseen ja mallien käyttöön peliympäristöissä. Kyseiset menetelmät liittyvät vahvasti digitaaliseen valokuvaukseen, joten teoriaosio keskittyi myös yksityiskohtaisesti siihen.

Objektit valokuvattiin ja kuvat tuotiin 3DF Zephyr-ohjelmaan. Kuvat käsiteltiin ja ne rajattiin sisältämään vain halutut kohdat kuvista, minkä jälkeen rakennusvaihe alkoi. 3D-skannausta tutkittiin rajallisesti yhden objektin skannauksella. Lähteinä käytettiin ohjelmien käyttöoppaita, alaan liittyviä tutkimuksia sekä digitaaliseen valokuvaukseen liittyviä oppaita.

3DF Zephyr pystyi rakentamaan monimutkaisia malleja. Ohjelman käsittelynopeus oli vahvasti rajoitettu ohjelman Lite-versiossa ja teknologian tärkeimpiä puolia oli jätetty Pro-lisenssiin. Riippumatta näistä rajoituksista lopputulos oli yllättävän hyvä. Malliin jäi muutamia isompia aukkoja, joita ohjelma ei kyennyt laskemaan. 3D-skannaus oli onnistunut. Skannaus osoitti, että se on monen näkymän stereo -teknologian haastaja. Päätelmänä oli, että jatkossa tarvitaan ohjelman täysi lisenssi ja että nämä teknologiat korvaavat enenemässä määrin osan perinteisestä 3D-mallintamisesta.

Avainsanat fotogrammetria, monen näkymän stereo, 3D-skannaus, digikuvaus

School of Technology, Communication and
Transport
Information and Communication Technology
Bachelor of Engineering

Author	Mika Uitto	Year	2017
Supervisor	Kenneth Karlsson		
Subject of thesis	Photogrammetry and 3D-scanning based 3D-modelling		
Number of pages	55 + 6		

Objective was to make 3D models from photographs with multi-view stereo technology based program. Thesis discusses technologies associated with photogrammetry and 3D scanning. These models will be used in virtual environments and 3D printing. Used methods strongly rely on digital photography so main subjects of digital camera's attributes were explained in detail.

Objects were photographed and then they were imported to 3DF Zephyr. Pictures were processed and masked in reconstruction program before actual building phase. 3D scanning was briefly studied with one scan of an object. Manuals of programs, literature of studied fields and a guide for digital photography were used for sources.

3DF Zephyr were able to build complex models. Program's processing speed was strongly limited in lite version. Also main methods of used technology were not in use. Regardless of those limitations the result was quite good object but it was not fully reconstructed. There were few large holes in model on those areas that program wasn't able to calculate. 3D scan was successful. It pointed out that it is a challenger of multi-view stereo method. Conclusion were that full licence of reconstruction program is needed and that both technologies are getting close to partly replacing traditional 3D modelling.

Key words photogrammetry, multi-view stereo, 3D-scanning, digital photography

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	7
2	FOTOGRAMMETRIA	9
2.1	Historia.....	9
2.1.1	Alkuvaiheet.....	9
2.1.2	Digitaalinen fotogrammetria	11
2.2	Ortokuvaus	11
2.3	Mosakointi.....	13
3	DIKIKUVAUS.....	15
3.1	ISO-asetukset	15
3.2	Kuvakanta.....	15
3.3	Himentimen asetukset	18
3.4	RAW- ja JPEG-tiedostomuodot	19
3.5	Objektiivi	21
4	MONEN NÄKYMÄN STEREO.....	22
4.1	Kameran parametrien syöttäminen	25
4.2	Kuvakollaasi.....	25
5	3DF ZEPHYR	26
5.1	Laitevaatimukset	26
5.2	Kuvaustekniikan suositukset.....	27
5.3	Käyttöliittymä	27
5.4	Projekti.....	29
5.4.1	Kuvien tuetut tiedostomuodot.....	30
5.4.2	Kameroiden kalibroinnit.....	30
5.5	3D-rekonstruktio	30
5.6	Harva- ja tiheäpistepilvi.....	33
5.7	Meshin luonti.....	36
5.8	Tekstuurien luonti	37
5.9	Import- ja Export-formaatit	39
6	MUSEON ESINEIDEN TYÖSTÄMINEN.....	41
6.1	Kuvausvaihe	42
6.2	Kuvien käsittely.....	43

6.3	Rekonstruktio.....	46
7	3D-SKANNAUS.....	49
7.1	Artec Eva 3D-skanneri.....	49
8	POHDINTA.....	52

ALKUSANAT

Haluan kiittää yhteistyöstä Rovaniemen ammattikorkeakoulun pLAB-ohjelmisto-laboratoriota, Lapin Yliopistoa sekä Lapin ammattiopistoa ja LAO3D-hanketta.

Erityisesti kiitän Kotiseutuyhdistys Rovaniemen Totto ry:tä ja Kerttu Oikarista. He tarjosivat Pöykkölän kotiseutumuseolta historiallisesti mielenkiintoiset esineet työni kuvattaviksi kohteiksi.

1 JOHDANTO

Erilaiset 3D-tekniikat, skannauksesta fotogrammetrian hyödyntämiseen 3D-mallinnuksessa, ovat kehittyneet viime vuosina lupaavasti. Laitteistot ja niiden ohjelmistot lupaavat pistepilvidatan nopean muuntamisen kiinteäksi 3D-malliksi tekstuureineen. Käsien tehtävä kolmiulotteisten objektien mallinnus on työlästä ja aikaa vievää. Fotorealistien 3D-mallien kysynnällä on jatkuvasti kasvava tarve. Niitä käytetään lääketieteestä arkkitehtuuriin. Tietokoneiden laskentatehon nousu ja digikameroiden korkeatasoiset kuvat mahdollistavat 2D-kuvien muuntamisen 3D-objekteiksi. Miksi näitä teknologioita ei siis käytetä pääsääntöisesti mallinnuksessa? Mitä rajoituksia näillä laitteilla ja ohjelmistoilla on? Voivatko ne korvata perinteisen 3D-mallintamisen nyt tai jatkossa tai tukea sitä?

Rovaniemen kotiseutumuseon ja Lapin ammattikorkeakoulun pLAB-ohjelmistolaboratorion tulossa oleva hankkeeseen liittyen päädyttiin tutustumaan fotogrammetria ohjelmaan ja 3D-skannaukseen. Asiakkaan toiveena oli museon esineistön digitalisoiminen ja sitä kautta objektien 3D-tulostaminen ja hyödyntäminen museon ympäristöön suunnitteilla oleviin peleihin. Lapin ammattikorkeakoulun kanssa yhteistyössä toimiva Lapin ammattiopisto lupasi käyttöön 3D-skannerin. pLAB hankki fotogrammetriaan erikoistuneen ohjelmiston. Käytössä oli myös laboratorion digitaalikamera, jolla kuvasin museon esineistön ohjelmaa varten. Kuvaukset tapahtuivat Lapin yliopiston tiloissa.

Tehtävänä oli tutkia kuinka kyseiset laitteet ja ohjelmat toimisivat perinteisen 3D-mallinnuksen tukena ja mahdollisena korvaajana. 3DF Zephyr fotogrammetriaohjelmisto hankittiin Lite-versiolla ja sen ollessa uusi ohjelma myös pLAB-ohjelmistolaboratorion henkilökunnalle, työhöni kuului ohjelmistoon käyttöön ja ominaisuuksiin perehtyminen. Tehtävään kuului selvittää onko ohjelman käyttö 3D-malleja luodessa käytännöllistä ajallisesti ja taloudellisesti.

Opinnäytteessä käsitellään kuvamittaukseen ja 3D-skannaukseen liittyviä teknologioita ja niitä hyödynnetään jatkossa 3D-tulostukseen ja mallien käyttöön muun muassa peliympäristöissä. Käytettäviä teknologioita oli fotogrammetria ja 3D-skannaus. Tehtävänä oli selvittää onko ohjelmistolaboratorion asiakkaan objekteja mahdollista kuvata ja mallintaa kyseisillä menetelmillä tarkasti. Haasteena oli

se, että kaikki neljä objektia oli pinnoiltaan ja tekstuureiltaan hyvin erilaisia, heijastavista pinnoista mustiin, puisiin ja kankaisiin. Tekstissä kerrotaan menetelmien teorit ja vertaillaan niitä kokonaisuuksina perinteiseen mallintamiseen.

Kuvattavaksi objekteiksi saatiin Rovaniemen kotiseutumuseon irtaimistosta historiallisia esineitä. Esineinä olivat vanhanaikainen kirjoituskone, kansallispuku, langan kerimiseen käytetty rukki sekä vahvasti Pöykkölän historiaan liittyvä Tottokoru. Esineet valittiin historiallisen sekä käytettävien teknologioiden näkökulmasta. Kuvattavien esineiden haluttiin olevan erikokoisia sekä materiaaliltaan teknologiaa haastavia.

Kuvamittaukseen käytettävät laitteet vaativat kohteilleen ihanteellisen valaistuksen sekä kuvaustekniikan. Opinnäytetyössä käydään siksi läpi myös valaistukseen ja digikuvaukseen liittyviä seikkoja.

Tehtävänä oli myös selvittää onko fotogrammetria ja 3D-skannaus menetelmät jatkossa resursseja säästäviä verrattaessa perinteisempään 3D-mallinnukseen ja tekstuurien tekoon.

3D-skannauksessa käytettiin Lapin ammattiopistolta saatua Artec Eva 3D-käsiskanneria. Skanneria pääsin käyttämään rajallisesti.

Opinnäytetyön alku käy läpi fotogrammetrian perusidean ja sen miten alkuajoista on päästy nykyaikaiseen digikuvaukseen. Sen jälkeen siirrytään ohjelmiston läpikäyntiin, jonka alussa käydään läpi teoria ennen ohjelman toiminnallisuuksia. Työssä käydään läpi rajallisesti myös 3D-skannauksessa käytettävät eri tekniikat. Tulokset osio esittelee työntekovaiheen. Päätelmät sisältävät ajatuksia siitä mitä tuloksia saatiin ja onko tutkittavat teknologiat tarpeeksi laadukkaita korvaamaan tai tukemaan 3D-mallintamista.

Opinnäytteessä ei käydä läpi 3D-tulostusta tai pelimoottoreiden toimintaa ja kriteereitä objekteille vaikka näihin saatetaan viitata. Myöskään videokuvasta mallien tekoa ei tutkita.

2 FOTOGRAMMETRIA

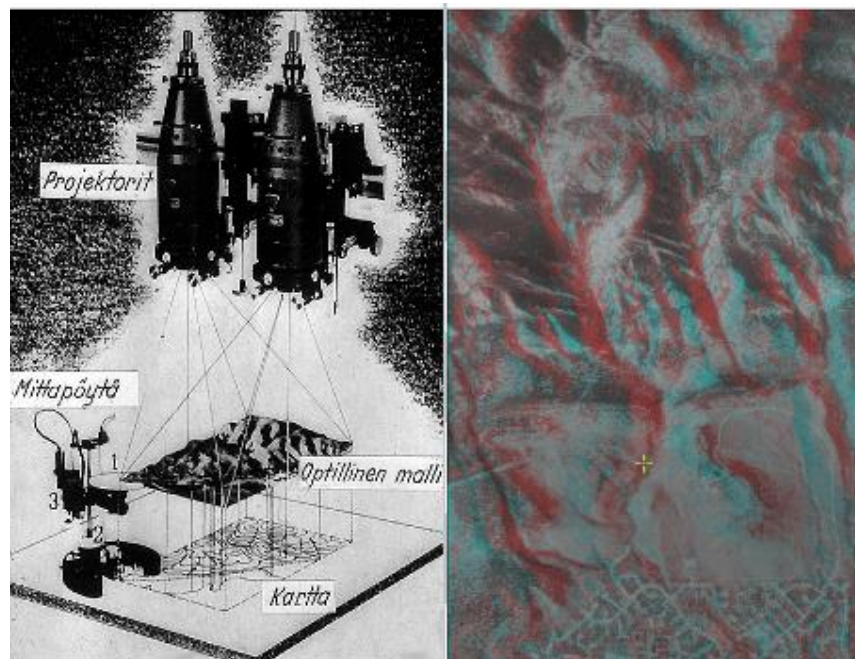
Fotogrammetria perustuu deskriptiiviseen geometriaan jota hyödynnetään perspektiivikuvien tulkitsemiseen. Se on kohteiden kolmiulotteista mittausta valokuvista.

2.1 Historia

Valokuvauksen keksimisestä 1839, fotogrammetrian historia voidaan jakaa neljään jaksoon (Haggrén 2011, 9). Maakuvaus, ilmakekuvaus, ilmakekolmiointi ja digitaalinen fotogrammetria. Keskityn digitaaliseen osaan mutta kerron lyhyesti miten siihen on päästy.

2.1.1 Alkuvaiheet

Kuvista saatiin kolmiulotteinen kartoitus kuvattavasta kohteesta, jossa kameran optiikan vaaka- ja pystysijainti huomioitiin. Näitä varhaisia kartoituksia on käytetty muun maassa vanhojen rakennusten rekonstruktioon.

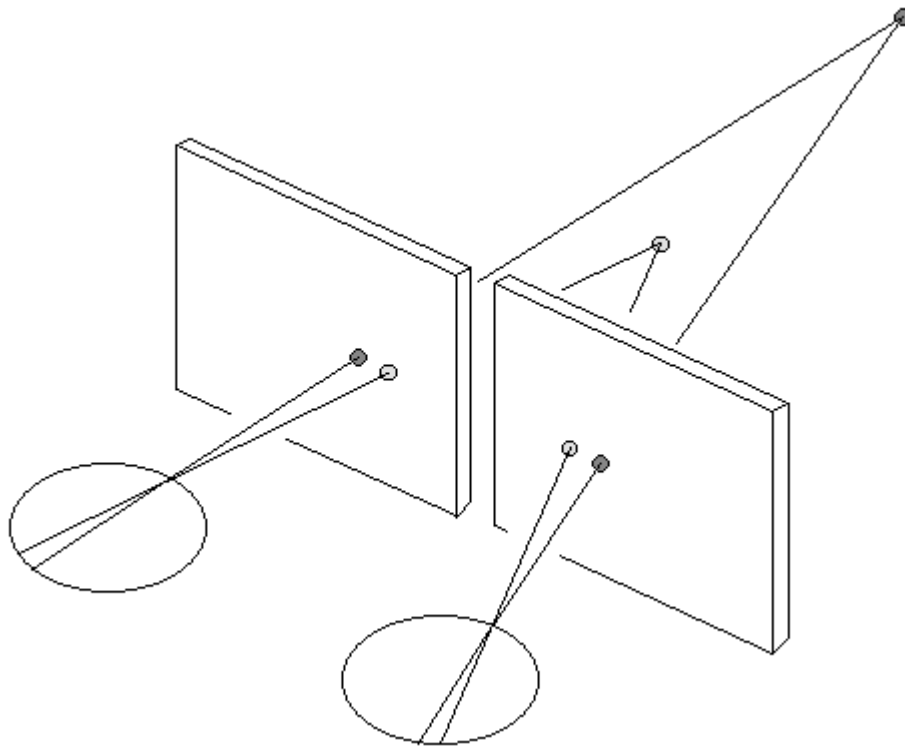


Kuvio 1. Multiplex-stereokartoituskoje ja sen tuottama optinen kaksoisprojektio (Haggrén 2003b)

Valokuvausteodoliittillä otetut kuvat eivät vaatineet etäisyysmittauksia, koska kamera kuvasi kohteen aina kahdesta suuntasta. Tähtäyskaukoputki asetettiin kuvatasolle ja kameraobjektia siirrettiin ylös ja alas.

Ilmakuvauksen uuden vaiheen käynnisti 1901 Carl Pulfrichin kehittämä stereokomparaattori, jolla voitiin mitata koordinaatteja ja pisteitä kuvista.

”Stereomalli saadaan aikaan siten, että kuvat projisioidaan tarkastelutilaan ja orientoidaan alkuperäistä kuvaustilannetta vastaavaan asemaan keskenään. Avaruusmittamerkki liitetään stereomalliin projisioimalla merkki erikseen kummallakin kuvalla kohtaan, joka vastaa sen hetkistä 3-D sijaintia (Kuvio 1, Kuvio2) (Haggrén 2003b, 2002).”



Kuvio 2. Kahden kuvan päälle projisoitu piste sulautuu stereokuvan pinnalle mittamerkiksi (Haggrén 2002)

Stereokartoituskojeita käytetään muun muassa kartaston tekemiseen. Niiden käyttö on harvinaistunut huomattavista 90-luvulta lähtien.

2.1.2 Digitaalinen fotogrammetria

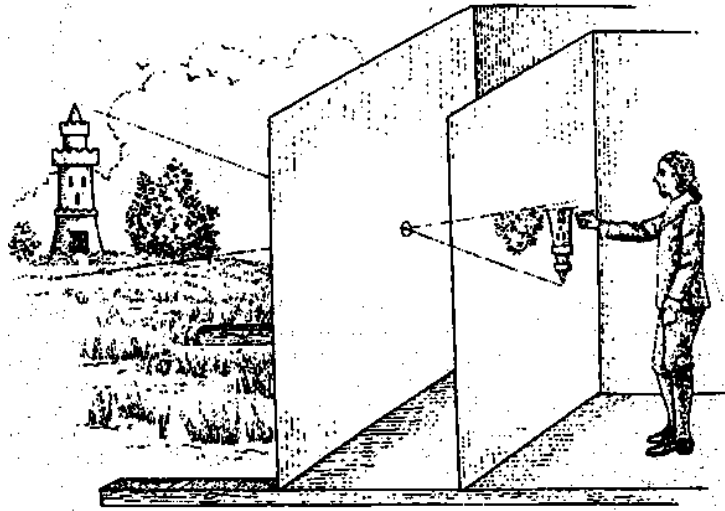
Puolijohdetekniikka toi mukanaan transistorit, mikropiirit ja CCD-kennot, joita sovellettiin digitaalisen fotogrammetrian kehityksessä. Vuonna 1955 P.Rosenberg teoroi miten ilmakuvat prosessoidaan kuvauslennolta. Erilaiset satelliittikuvat yleistyivät 1970-luvulla. Näitä monikaistakeilakuvia käytettiin luonnonvarojen inventointiin. Vuonna 1986 satelliittien kuvat olivat geometrisesti riittävän tarkkoja maanpintojen stereokartoitukseen. Digitaalisten kuvien ja tietokoneiden laadun parantuessa, kuvankäsittelytekniikat mahdollistivat mekaniikattomat mittaus- ja kartoitusjärjestelmät (Haggrén 2003). Tosi aikainen 3D-kuvamittausjärjestelmä kehitettiin 1982-1994.

2000-luvun alussa digitaaliset kamerat olivat korvanneet perinteiset filmiskannerit lähes kokonaan. Nykykameroilla voidaan kuvata mustavalko-, väri- ja väri-infrakuvaa. Erilaisista kameroista mainitaan hyperspektrikamera, jolla mitataan jokaisen kuvan pisteen spektri. SAR-kuvilla (suuren laskennallisen läpimitan tutka) kuvataan maanpinnanmuotoja ja puustotietoja (Haggrén 2003). Laserkeilain puolestaan kuvaa ympäristön pistepilvenä. Digitalisaation ansioista kuvista saadaan dynaamisia 3D-malleja, jotka mahdollistavat erilaisten visualisointisovellusten hyödyntämisen esimerkiksi geografisista 3D-käyttöliittymistä 3D-elokuvaan ja ympäristön havainnollistamiseen. Näissä sovelluksissa 3D-datan yhteensovittaminen mittasuhteiden, väriarvojen, valaistuksen ynnä muun huomioitavan suhteen vaatii erityistä tarkkuutta ja osaamista sekä laitteen optimaalista kalibrointia.

2.2 Ortokuvaus

Ortokuvaus tarkoittaa kuvan perspektiivin muuttamista keskusprojektiokuvasta kohtisuoraksi yhdensuuntaisprojektioksi (Kuvio 3). Eli vähintään kahden kuvan projektiot lasketaan tarkan orientointien mukaan. Tarkkojen orientointien avulla kolmioidaan kuvat ja liitospisteillä kuvamosaiikin saumakohtat saadaan sopimaan yhteen (Haggrén 2002). Keskusprojektiio. Kuva syntyy yhden pisteen eli projektiokeskuksen kautta kulkevien valosäteistä (Haggrén 2002).

Stereo-ortokuva muodostuu stereomallista, jossa toinen stereoparin kuvista muutetaan normaaliksi ortokuvaksi ja sen stereo-ortokuvapariin lisätään keinotekoisesti korkeusmallista johdettu parallaksi. Tämä muodostaa kolmiulotteisen näkymän (Haggrén 2002).



Kuvio 3. Keskusprojektio (Haggrén 2003a)

Ortokuvat ovat ilmakuvausessa (Kuvio 4, Kuvio 5) käytettäviä, koordinaatistoon sidottuja, maastoa tarkoin vastaavia kuvia. Nykyisiin teknologioihin on käytetty niistä pohjana tietoa.



Kuvio 4. Vasemmalla orto-oikaisemattomat kuvat. Oikealla orto-oikaistut kuvat (Haggrén 2003a)

Näitä samoja periaatteita voidaan ajatella käytettävän Multi-View Stereo kuvauksissa. Niissä pyritään useat kuvat liittämään oikeassa perspektiivissä toisiinsa mahdollisimman hyvän 3D-mallin saamiseksi.

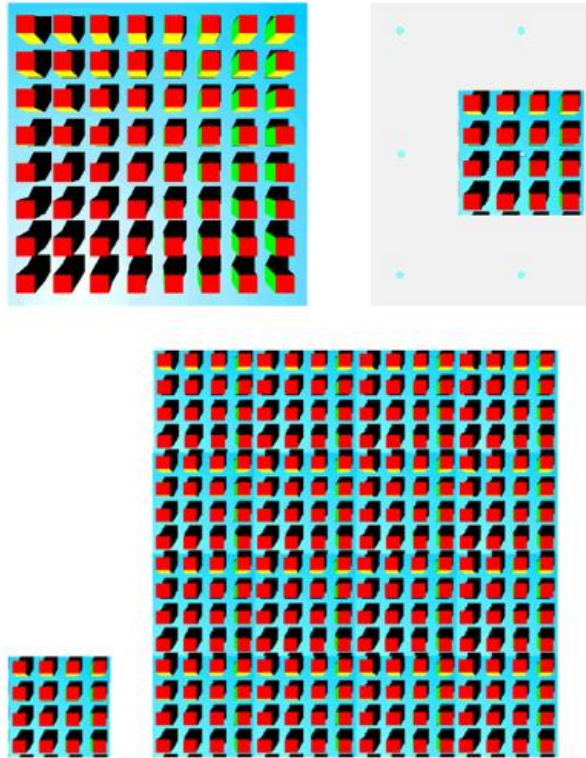


Kuvio 5. Oikaisemattomia ja oikaistuja siltoja (Haggrén 2003a)

2.3 Mosakointi

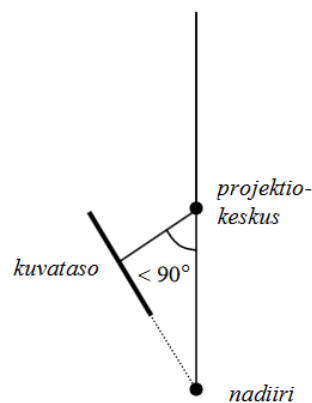
Mosakoinnilla tarkoitetaan useamman kuvan hyödyntämistä leikkaamalla ja yhdistämällä kuvat niin, että ne ovat perspektiivisesti mahdollisimman oikeassa linjassa (Kuvio 6). Pikselien kuvasisältö haetaan kuvasta, jonka nadiiripiste (Kuvio 7) on lähimpänä.

Saumakodat asetetaan kuviorajoihin, jotta sävyerot olisivat luonnollisen näköisiä. Käyttämäni 3D-uudelleenrakennukseen tehty sovellus laskee mosakoinnin automaattisesti.



Kuvio 6. Kuvamosaiikin pikselioikaisu (Haggrén 2003a)

”Nadiiripiste (n) on kuvatason ja kameran projektiokeskuksesta (O) lähtevän luotisuoranleikkauspiste. Nadiiripistettä ei voida määrittää, jos kuvataso on kiertynyt vaakatasosta yli 90 astetta eli näkösäde on horisontin yläpuolella” (Rönholm 2003, 6).



Kuvio 7. Nadiiripiste (Rönholm 2003)

3 DIKIKUVAUS

Jotta käyttämäni "Multi-View Stereo" eli monen näkymän stereo-teknologiaan pääsisi sisälle käyn ensin muutaman vaiheen digitaalisten kuvien ottamiseen liittyvistä seikoista. Käyn läpi perusominaisuuksia, jotka täytyy huomioida kuvattaessa kohdetta sekä selvennän konvergenttikuvaustekniikkaa, jota hyödynsin työssäni.

Kuvattaessa on huomioitava monia kuvien laatuun vaikuttavia asioita. Niitä on muun muassa objektiivin, kuvakoko, formaatti, ISO-arvo, valkotasapaino, kuvakanta sekä himmenin aukon koko ja nopeus. Lisäksi on huomioitava se, että kuvien tarkkuus kärsii jos kamera liikkuu kuvanottohetkellä sekä se, että kuvattavan objektin valaistus on hyvä ja luonnollinen.

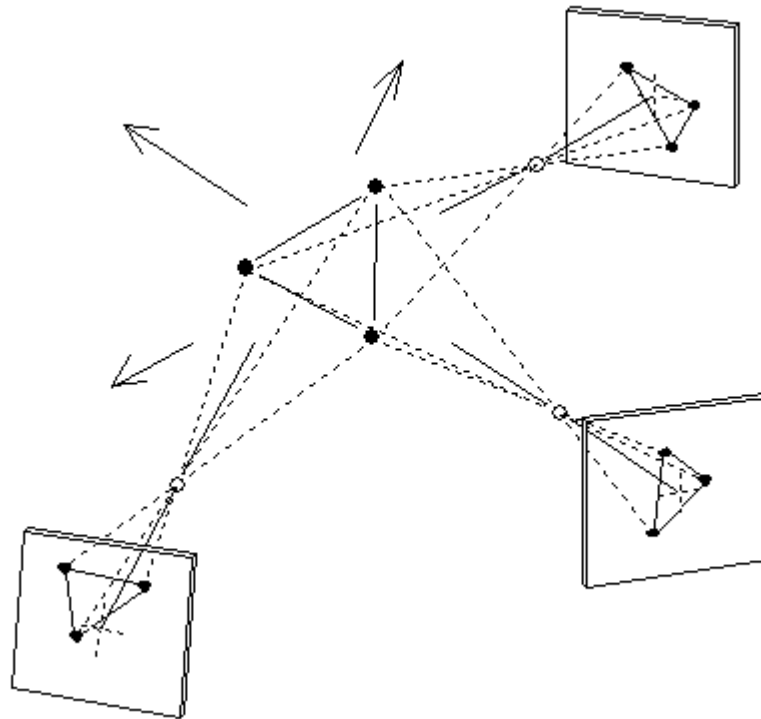
3.1 ISO-asetukset

Kuvattaessa erilaisissa valaistus olosuhteissa täytyy huomioida ISO-asetukset, joita säätämällä saadaan kuvattava kohde näyttämään luonnollisen väriseltä. ISO-arvot ovat yleisesti ISO 100-arvosta, joka tarkoittaa yhden sekunnin valotusaikaa, jopa ISO 6400-arvoon asti. Jokainen askel, pienempään päin, ISO-arvoista tuplaa valotusaikaa, joten ISO 200 tarkoittaa puolen sekunnin valotusaikaa ja tuplattia valotusherkkyttä (Mansurov 2017b). Mitä valoisampi tila on sitä pienempi ISO-arvo tulee olla käytössä, jotta kuvan yksityiskohdat tulevat tarkemmin esille. Myös jalustalta kuvattaessa pimeässä tilassa voidaan käyttää pienempää arvoa mutta koska isompi ISO-arvo on herkempi valolle niin useassa tilanteessa luonnollisemman kuvan saa heikosti valaistuissa tiloissa isolla ISO arvolla. Liikkuvaa kohdetta kuvattaessa isompi ISO-arvo antaa tarkemman pysäytyskuvan.

3.2 Kuvakanta

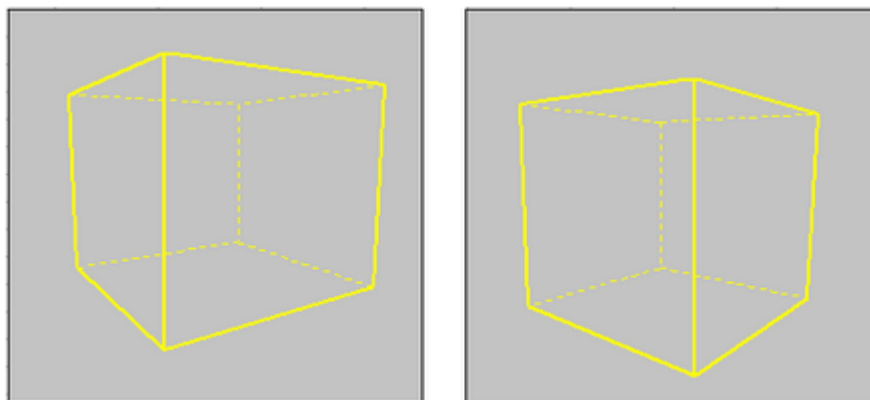
Kuvakannalla tarkoitetaan sitä paljonko kamera liikkuu kuvattavaan kohteeseen nähden jokaisen kuvan välillä. Tai vaihtoehtoisesti kuinka paljon kuvattava kohde pyörii alustallaan kameraan nähden. Tällaista tekniikkaa kutsutaan konvergenttikuvaukseksi (Kuvio 8, Kuvio 9) (Haggrén 2002)

Kuvaustekniikka, joka esimerkiksi kuvaa laajaa rakennelmaa liikuttamalla kameraa sivulle ja säilyttäen saman etäisyyden ja akselin soveltaa stereokuvausta (Kuvio 10) (Haggrén 2002).



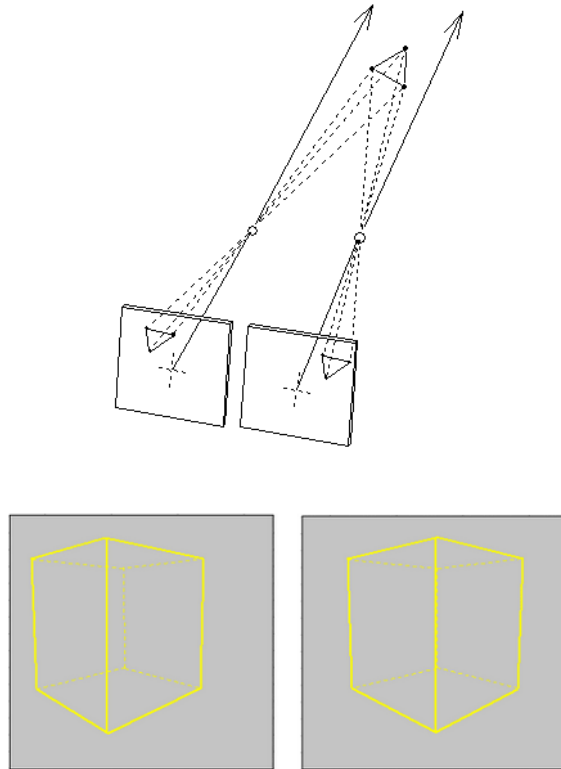
Kuvio 8. Konvergenttikuvaus (Haggrén 2002)

Kuvaustekniikka, joka esimerkiksi kuvaa laajaa rakennelmaa liikuttamalla kameraa sivulle ja säilyttäen saman etäisyyden ja akselin soveltaa stereokuvausta (Kuvio 10) (Haggrén 2002).



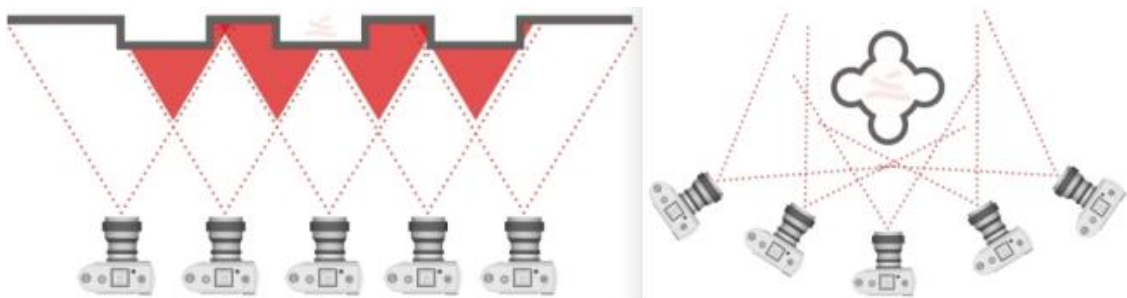
Kuvio 9. Kovergenttikuvapari (Haggrén 2002)

Kuvaustekniikka, joka esimerkiksi kuvaa laajaa rakennelmaa liikuttamalla kameraa sivulle ja säilyttäen saman etäisyyden ja akselin soveltaa stereokuvausta (Kuvio 10) (Haggrén 2002).



Kuvio 10. Stereokuvaus (yllä) ja stereokuvapari (Haggrén 2002)

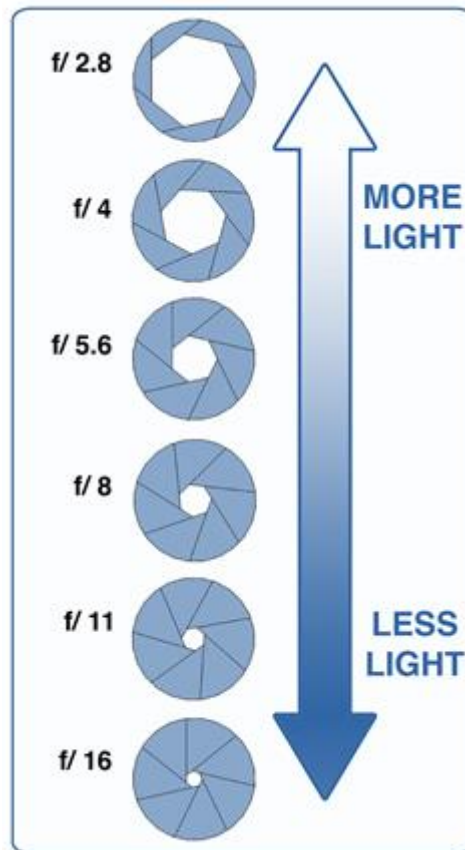
Opinnäytetyössäni käyttämän 3DF Zephyr-ohjelman tekijät suosittelivat objektiä kuvattaessa, että kuvien peitto toisiinsa nähden olisi noin 70-80% (Kuvio 11). Lisäksi objektista tulee ottaa kuvasarjoja useammalta akselikorkeudelta, jotta esine tulisi kuvattua mahdollisimman hyvin joka suunnasta. Mitä monimutkaisempi objekti sitä useampia kuvia ja akselikorkeuksia tulee käyttää.



Kuvio 11. Yhdensuuntaisen akselin kuvien peitto. Punaiset alueet. Oikealla konvergenttikuvauksen kuvien peitto (3DF Zephyr Manual 7,8)

3.3 Himmentimen asetukset

Kameran linssissä on aukko jota säätämällä kuvan tarkkuussyvyttä muutetaan. Se toimii samalla periaatteella kuin silmän iiris. Linssi kerää valon aukkoon, joka toimii pupillin tavoin ja aukon kokoa säätelemällä valon määrää muutetaan.

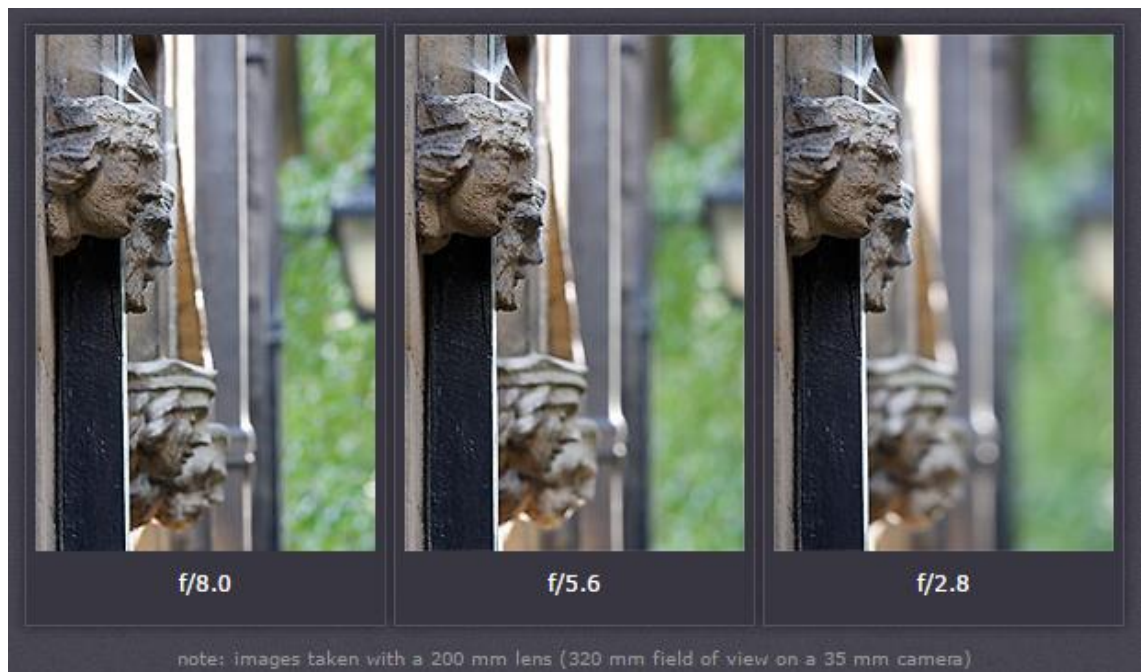


Kuvio 12. Himmenninaukon arvot (Wicked Sago 2013)

Mitä pienempi aukkoarvo on sitä suurempi on himmentimen päästämän valon määrä. (Kuvio 12) Tällä on suora vaikutus kuvan terävyysalueeseen (Kuvio 13). Suuremmalla aukolla kuvattava objekti on tarkka mutta tausta jää epätarkaksi. Pienempi aukko terävöittää myös kohteen taustaa. Jokaisessa linssissä on erilaiset aukkoarvojen rajat. On syytä pitää mielessä, että mitä pienempi luku on raja-arvona sitä suurempi määrä valoa pääsee linssiin (Mansurov 2007a). Linssit, joiden maksimi arvo on $f/1.2$ tai $f/1.4$ pidetään nopeina linssinä. Tällaiset arvot tulee ottaa huomioon, kun haluaa parempia kuvia pimeässä ympäristössä tai kuvattavan kohteen taustan ei tarvitse olla terävä.

3.4 RAW- ja JPEG-tiedostomuodot

JPEG-kuvat vievät huomattavasti vähemmän tilaa ja ovat silmämääräisesti lähes yhtä hyviä kuin RAW-formaattiset kuvat. JPEG-kuvien ongelma on se, että se pakkaa kuvaa ja hukkaa osan kuvan väriarvoista eikä niitä saada enää takaisin. Nyky kamerat antavat ottaa kuvat kummassakin tilassa tai ne voivat tallentaa saman kuvan kummassakin formaatissa halutessa. JPEG-kuvia suositellaan silloin, jos väriarvojen ei tarvi olla täydellisiä kuvien ja jatkokäsittelyä ei tarvita. JPEG-kuvia ottaessa tulee kuitenkin huomioida esiasetetut valkotasapainoarvo riippuen kuvaus ympäristöstä tai siitä käytetäänkö salamaa (Kelby 2010, 109).



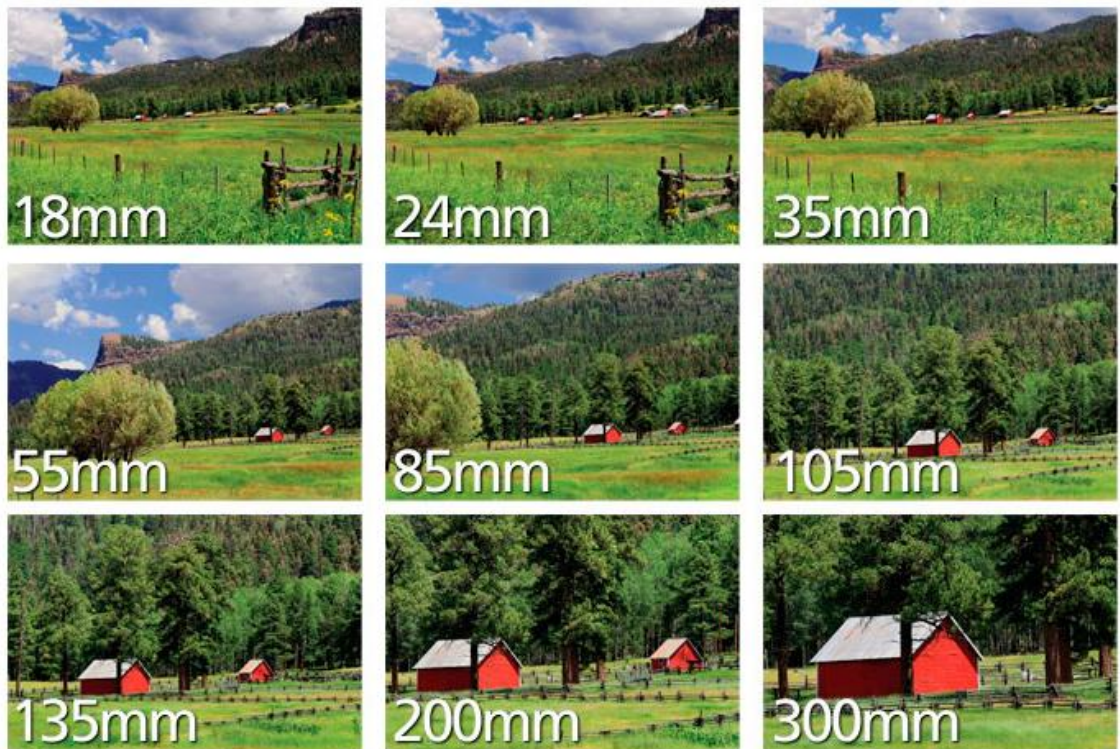
Kuvio 13. Aukkoarvojen vaikutus terävyyalueeseen (Cambridge in Colour 2017)

RAW-kuvat tallentavat valoarvoiltaan huomattavasti suuremman väriskaalan. JPEG-kuvan data tallennetaan 8-bittisenä, joten mahdollisia eri kirkkauden asteita ei ole paljoa (256). RAW-formaatti taas 12-bittisenä tai 18-bittisenä tallentaa moninkertaisen määrän (4096- 16 384) eri kirkkauden tasoja (Lim, 2017).

RAW-tiedostot usein eivät aukea kaikilla ohjelmilla ja konvertointi on tarpeellinen. Esimerkkeinä RAW-tiedostomuodoista sanottakoon Nikonin .NEF ja itse opinäytetyössä käyttämäni .CR2, joka on Canonin RAW-tiedosto. Ei ole varmuutta

aukeavatko tämän formaatin kuvat vaikka kymmenen vuoden päästä helposti millään tarjolla olevalla ohjelmalla. Uusi open source RAW-formaatti on Adoben kehittämä DNG eli Digital Negative. RAW-tiedostot voi helposti kääntää tähän formaattiin ilmaisilla ohjelmilla. Jotkin uusista kameroista kuvaavat jo tässä formaatissa (Lim, 2017).

RAW-tiedoston paras argumentti JPEG-kuviin verrattuna on sen muokattavuus. Kuvien valkotasapainon korjaus onnistuu yksinkertaisesti kuvankäsittelyohjelmalla, kuten myös väriavaruuden hallinta. Eri väriavaruuden muotoja tulee miettiä ainakin jos kuvat tulevat web-selaimeen. Tällöin suositeltu väriavaruus on sRGB (Lim, 2017). Ohjelmat, kuten lightroom, voivat käsitellä nopealla aikavälillä sarjan RAW-kuvia samoilla asetuksilla. Photoshop keskittyy yhteen kuvaan kerrallaan. Paras puoli RAW-kuvissa on se, että kuvaa muokattaessa siitä ei katoa tietoa vaan alkuperäinen kuva säilyttää kaiken tiedon ja käyttäjän valintojen pohjalta tallennetaan uusi kuva.



Kuvio 14. Polttovälin käytön demonstrointi (Black 2017)

3.5 Objektiivi

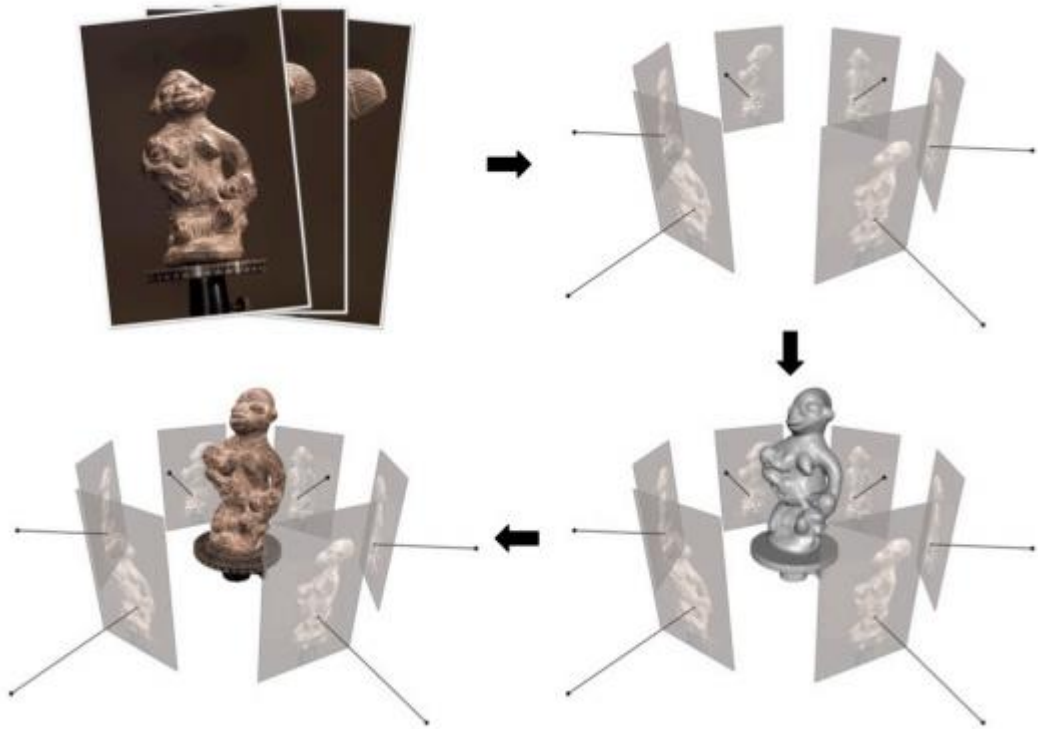
Omassa opinnäytetyössäni kuvasin kansallispuvun, jonka kuvaus ei onnistunut koon vuoksi kovin läheltä, joten käytin optista ajoa . Kuvattaessa kohteita, jotka vaativat zoomausta, on hyvä ottaa selvää kamerassa käytössä olevan objektiivin ominaisuudet.

Zoomattaessa linssi liikkuu kuvakennoon nähden ja tätä väliä kutsutaan polttoväliksi. Objektiivin polttoväli vaikuttaa kuvan rajaukseen (kuvio 14). Mitä kauempana kuvattava kohde on sitä suurempi polttoväli tulee olla käytössä (Digitaalikuvaus.com, 2017).

Digikameroissa kennot eli kuvan muodostavat sensorit ovat erikokoisia ja tästä syystä polttoväli ilmoitetaan usein kertoimella suhteutettuna 35mm filmiin tai täyden koon kuvakennoon verratuna. Tätä vertailua sanotaan kinovastaavuudeksi. Yleisimmän nykyisien digitaalikameroiden APS-C kennokoon kertoimia on esimerkiksi Canonin 1,6 ja Nikonin 1,5. Näin ollen Canonin APS-C kennon kamerassa 50mm polttoväliä verrataan kinokoon 80mm polttoväliin, koska 1,6 kertaa 50mm on 80mm (Digitaalikuvaus.com. 2017).

4 MONEN NÄKYMÄN STEREO

Monen näkymän stereo-teknikka (Multi-view stereo) rakentaa erittäin yksityiskohtaisen 3D-mallin pelkästään kuvista. Käyttämäni 3DF Zephyr ohjelma hyödynsi mallien teossa tätä teknologiaa (Kuvio 15).

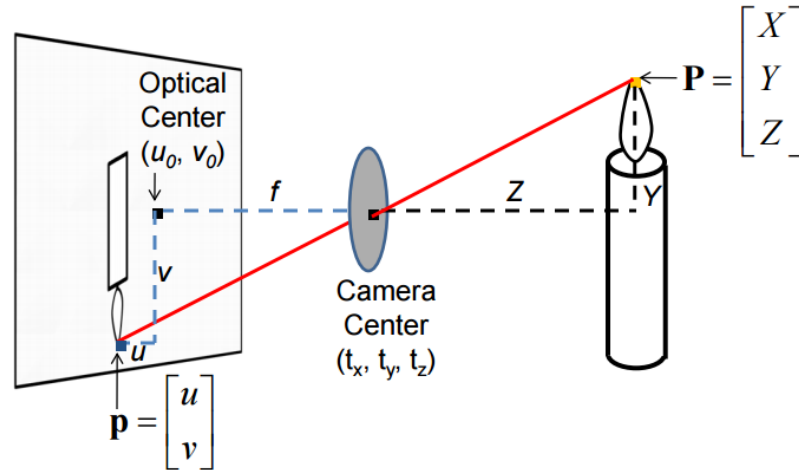


Kuvio 15. Monen näkymän stereon rekonstruktio vaiheittain (Furukawa & Hernández 2015)

Esineiden ja ympäristöjen mallinnuksessa täysin geometrisesti yhtenevän 3D-mallin teko on haastavaa ja sitä on tehty muun muassa erilaisilla CAD-ohjelmilla sekä koskettavilla ja ei-kostettavavilla skannererilla (Furukawa & Hernández 2015, 3).

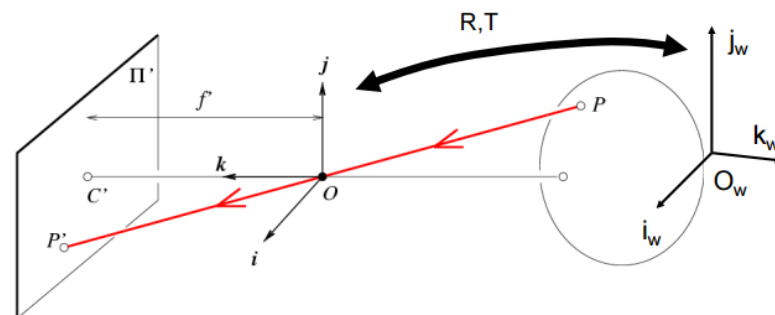
Kuvapohjaisen 3D-mallinnuksen algoritmin määritelmä voidaan kuvailla seuraavasti; objektista tai ympäristöstä annetun kuvasarjan todennäköisimpien 3D-muotojen tunnistaminen tietäen materiaalit, kuvien perspektiivit ja valaistuksen. Tätä ongelmaa on tutkittu noin 30 vuotta ja vasta lähivuosina kuvien resoluutio ja laitteiston suorituskyvyt ovat alkaneet vastata teknologian vaatimaa tasoa (Furukawa & Hernández 2015, 3-4). Mulvi-view stereo (MVS) on termi joka kuvaa tekniikoita, jotka hyödyntävät pääsääntöisesti yli kahta stereokuvaparia kerrallaan.

Tekniikka yrittää löydää muodot tunnistamalla tekstuureita, ei tarkennettuja kohtia, ääriviivoja ja stereovastaavuutta.



Kuvio 16. 3D-ympäristön pisteet muutettuna kuvassa sijaitseviksi 2D-pisteiksi (Furukawa & Hernández 2015)

Kuviossa 15 (yllä) näytetään vaiheittain MVS-tuotantolinja. Vaiheet ovat kuvien ottamisen ja sovellukseen siirtämisen jälkeen kuvien parametrien syöttäminen, 3D-geometrian laskenta ja vaihtoehtoisesti materiaalien eli tekstuurien liittäminen objektiin (Furukawa & Hernández 2015, 5).



$$\mathbf{x} = \mathbf{K}[\mathbf{R} \quad \mathbf{t}] \mathbf{X}$$

\mathbf{x} : Image Coordinates: $(u, v, 1)$
 \mathbf{K} : Intrinsic Matrix (3×3)
 \mathbf{R} : Rotation (3×3)
 \mathbf{t} : Translation (3×1)
 \mathbf{X} : World Coordinates: $(X, Y, Z, 1)$

Kuvio 17. Projektionmatriisin parametreja (Furukawa & Hernández 2015)

2D-kuvien x- ja y-koordinaateista saadaan 3D-avaruuden x-, y- ja z -pisteitä matriisilaskennalla. Liitteessä (1) on Illinoisin yliopiston luentomateriaali; Projective Geometry and Camera Models, joka selvittää tarkemmin 3D-pisteiden laskemisesta. Luentomateriaalin kuvissa (Kuvio 16, 17) matriisilaskennan parametrejä demonstroituna. (Furukawa & Hernández 2015, 8-9).

MVS-algoritmissa yleisimmin käytetty kameramalli on neulanreikäkamera malli, jonka 2D-kuvien perusteella kolmiulotteiset pisteet lasketaan (3x4) projektiomatriisina (Kaava 1).

$$P = \underbrace{\begin{pmatrix} f_x & s & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_K \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & | & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & | & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & | & t_z \end{pmatrix}}_{R \quad T}.$$

Kaava 1. Projektiomatriisi (Furukawa & Hernández 2015)

missä

- on kameran sisämatriisi (Intrinsics matrix) [K]
- on vertikaalinen ja horisontaalinen polttoväli [f_x, f_y]
- on pääpisteet [c_x, c_y]
- on vinouma (skew) [s]
- on kameran ulkomatriisi (Extrinsics matrix) [R|T]
- on kameran rotaatiot [R]
- on välityssuhde (translation of camera) [T]

Digitaalisten sensorien nykyinen tason takia projektiomatriisin parametreihin yleensä voidaan sijoittaa laskettavan pikselin vinoumaksi (skew) 0 ja koordinaatiopisteiden x, y sijainnin oletetaan olevan sama (f_x=f_y) (Kaava 1). Lisäksi oletetaan, että kuvan kohdistus on kuvan keskellä. Jos käytössä oleva linssi ei ole korkealaatuinen tai se on laajakulmalinssi niin pelkkä neulanreikäkameramalli ei riitä vaan kuvan vääristymä täytyy korjata yleensä ennen MVS-ohjelmaan tuomista (Furukawa & Hernández 2015, 9).

MVS-ohjelmat voivat tukea myös näitä kuvaformaatteja mutta laskennallisesti niiden käsittely vie huomattavasti tehoa ja lopputulos ei välttämättä ole yhtä hyvä kuin optimaalisella linssillä otettujen kuvien kanssa.

4.1 Kameran parametrien syöttäminen

3DF Zephyr tunnistaa kameran parametrit automaattisesti ja eri kohdista ja akselikulmista otetut kuvat eivät tuota sille ongelmaa. Kaikki vastaavat ohjelmat eivät ole näin pitkällä automatisoituja. Ne voivat tarvita manuaalisen syötön kameran sijainnista ja kuvakulman tiedoista joka kuvalle kuten myös polttovälin arvon ja kuvasensorin koon. Kaikki MVS-ohjelmat eivät hyväksy eri polttovälillä otettuja kuvia kollaasiin, josta 3D-pisteitä lasketaan.

4.2 Kuvakollaasi

MVS-ohjelmia, kuten myös 3DF Zephyriä voidaan hyödyntää karkeasti jaoteltuna kolmen erilaisen kuvakollaasin käsittelymiseen. Niin sanottu laboratorikuvaustilanne on pienten ja keskisuurten esineiden kuvaamista. Toiseksi ryhmäksi luetaan pienet ympäristön kuvakollaasit ja viimeiseksi suurten alueiden kuvaus, jossa kuvat otetaan esimerkiksi autosta, lentokoneista, internetistä ja niin edelleen (Furukawa, Y. Hernández, C. 2015, 6). Jälkimmäinen teknologia usein käyttää laskentaan GPS-koordinaatteja 3D-pisteiden laskentaan. 3DF Zephyr Aerial-lisenssi mahdollistaa tällaisen ympäristön tulkinnan.

5 3DF ZEPHYR

3DF Zephyr on ohjelma, jolla valokuvista saadaan rakennettua teksturoitu 3D-malli. Prosessi on täysin automatisoitu ja manuaalisen jälkikäsittelyn tarve on vähäinen. Ohjelmasta on kolme erilaista lisenssiä. 3DF Zephyr Lite on kaupalliseen pieneen tuotantoon suunnattu rajoitettu versio ohjelmasta (3DF Zephyr Manual 2017, 4.) Lite-versiossa laskettuja pistepilviä ei voi tuoda ulos ohjelmasta, orto-oikaisua ja ortomosakointigeneraatiota ei tueta ja vain yksi ydin on laskennassa käytössä.

Aeril-versio keskittyy ilmakuvaukseen ja Pro-versio tarjoaa rajattoman datamäärän syötön ilmsn Lite-version rajoituksia. Opinnäytetyössäni oli käytössä Lite-versio.

5.1 Laitevaatimukset

Suosittelut laitevaatimukset ohjelman käyttöön ovat Windows Vistasta Windows 10-käyttöjärjestelmään, neliydinprosessori, 8 GB muistia ja vähintään 10 GB tyhjää tilaa SSD-levyllä (Kuvio 18).

Minimum System Requirements:

OS: Windows 10/8.1/8/7/Vista (64 bit)
Processor: Dual Core 2.0GHz or equivalent processor
Memory: 4GB System RAM
Hard Disk Space: 4GB free HDD Space
Video Card: Direct X 9.0c compliant video card with 256 MB of RAM

Recommended System Requirements:

OS: Windows 10/8.1/8/7/Vista 64 bit
Processor: Quad-core Intel or AMD CPU
Memory: 8GB System RAM
Hard Disk: 10GB free HDD Space - SSD drive

Kuvio18. Laitevaatimukset (3DFZephyr Manual 2017)

5.2 Kuvaustekniikan suositukset

Linsseistä täysikokoisen kennon kameroille suositellaan 25-50mm polttoväliä. Aps-c tai sitä pienemmille sensorikoon kameroille arvoa 1,5- ja 1,6-rajaukset väliltä.

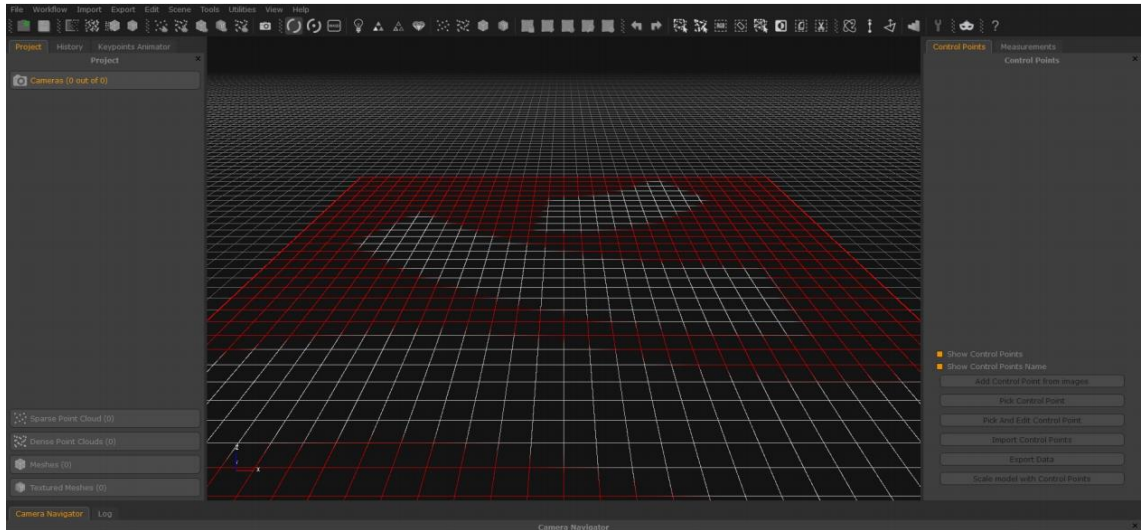
Sensorin tulee ottaa pikselikokoja, jotka ovat kahta mikrometriä suurempia (2 μ m). Pikselien koon katsotaan olevan tärkeämpää kuin niiden maksimimäärän per kuva. Esimerkkinä valmistaja suosittelee 36-megapikselin täyskennon resoluution laskemista pikselikoon suurentamiseksi, jotta lopputulos on parempi. (3DF Zephyr Manual 2017, 6-7) Optimaalista pikselikokoa ei mainita.

Kuvattavaa kohdetta suositellaan pidettävät kuvien keskellä. Valaistuksessa on pyrittävä välttämään suoria valonlähteitä osumasta kuvattavaan objektiin. Himmennin aukon arvoiksi suositellaan korkeita lukuja (F/8-F16), jotta kuvan terävyyalue olisi syvä. Kolmijalan käyttöä suositellaan, jotta kuvattaessa ei kuvakollaasin sekaan päätyisi epätarkkoja heilahtaneita kuvia. Kuvakannan tulisi olla peitoltaan suuri (70-80%). Kuvat tulisi ottaa mielellään vähintään kolmesta eri akselikorkeudesta ja sisältää mahdollisimman monta kuvaa. Kuvien välisen kulman tulisi olla hyvin pieni. Kuvien myös suositellaan sisältävän mahdollisimman paljon yksityiskohtia ja tekstuuria. Hohtavia tai läpinäkyviä objekteja ohjelma ei pysty käsittelemään. Vaikka 3DF Zephyr pystyy tulkitsemaan eri kameroilla ja linseillä otettuja kuvia samassa kuvakollaasissa niin yhden kameran samalla polttovälillä otetut kuvat tuottavat paremman tuloksen (3DF Zephyr Manual 2017, 7-9).

5.3 Käyttöliittymä

Ohjelman aloitusnäkyssä yläreunassa on työkalupalkki, jossa on kaikki perustoiminnallisuudet ohjelmassa. Renderöinti-ikkunassa, keskellä (Kuvio 19), liikutaan 3D-ympäristössä. Projektipalkki vasemmassa reunassa näyttää kaikki objektit, jotka ovat tämänhetkessä työtilassa. Projektipalkki on jaettu neljään osaan, joita on kamerat, harva pistepilvi, tiheä pistepilvi ja mesh, joista viimeinen sisältää pistepilvistä rakennetut kiinteät objektit. Projektipalkin vieressä on historia-välilehti, joka mahdollistaa aiempien toimintojen peruuttamisen tai uudelleen teon. Animaatio-välilehdellä voi luoda valmiista 3D-mallista videon. Alhaalla on

navigointiin välilehti ja logi, josta näkee ohjelman suorittamat toiminnot. (3DF Zephyr Manual 2017, 9-10).



Kuvio 19. 3DF Zephyrin aloitusnäkömä

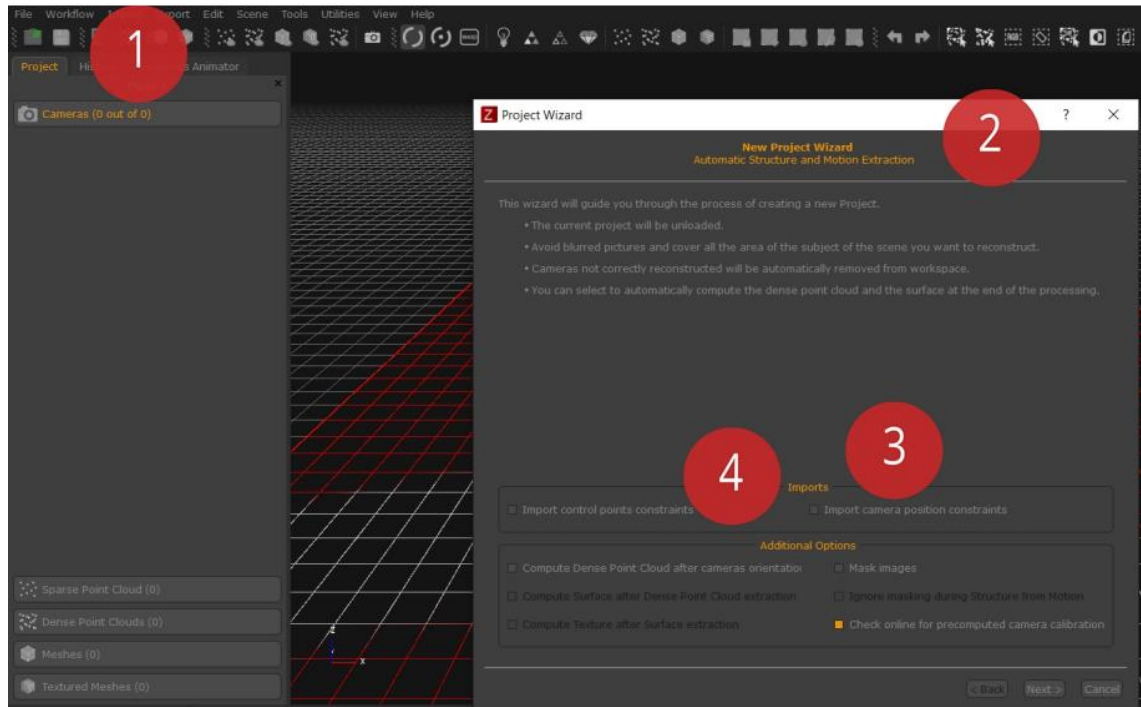
Options-valikon alla on neljä välilehteä. Rendering, Input, Cuda ja Application. Rendering-valikosta voi muokata ohjelman graafista näkymää. Työtilan ja 3D-renderöinti ikkunan ruudukkoa, ja kontrollipisteiden värejä voi muokata halua-mansa mukaisiksi. Pistepilvien kokoa voi skaalata ja pisteiden maksimimäärää voi muuttaa. Lisäksi kameroiden alfakanavia säädetään täältä. Kontrollointimatkan valinta sisältää muokattavia ominaisuuksia 3D-ympäristöä laskevista kartioista Input-valikko antaa muuttaa visualisointiin ja virtuaalisen kameran kontrollointiin liittyviä parametreit (3DF Zephyr Manual 2017, 10-11).

Cuda-valikko mahdollistaa CUDA-tekniikan omaavan grafiikkakortin käyttöön-oton. Cuda on Nvidian valmistama tekniikka, joka huomattavasti kasvattaa las- kentatehoa antamalla ohjelman hyödyntää grafiikkaprosessorin resursseja.

Application-välilehti sisältää muun muassa käyttöliittymään kieleen, tekstin ko- koon ja automaattiseen tallentamiseen liittyviä vaihtoehtoja. Lisäksi sieltä voi sul- kea GPS-datan käytön laskennan aikana (3DF Zephyr Manual 2017, 11).

5.4 Projekti

Uuden projektin voi aloittaa workflow-valikosta. Ponnahdusikkunasta imports kohdasta voi tuoda haluamansa kuvat ohjelmaan. Additional options sisältää rakennusvaiheiden eri valintoihin liittyvät asiat (Kuvio 20).



Kuvio 20. Workflow (1), New Project Wizard (2), Imports (3), Additional options (4) (3DF Zephyr Manual)

Imports-valikosta voi halutessaan ladata ennalta tehdyn kalibroitiedoston, jossa on jokaisen kameran parametrit tai ne voi myös syöttää manuaalisesti. Lisäksi, lähinnä Aerial-lisenssiin liittyen, voi tuoda ohjelmaan GPS-koordinaatteja liittyen kuvasarjoihin.

Additional options-valikko antaa mahdollisuuden pysäyttää laskennan eri vaiheiden välillä ja kameran kalibroitivaiheen voi tallentaa 3DF Zephyrin tietokantaan ja hakea sen sieltä tarvittaessa. Tämä säästää huomattavasti aikaa jos kyseinen projekti sisältää suuren määrän kuvia.

Ennen rakennusvaiheen alkua kuvat on mahdollista maskata Launch Masquarade-valinnalla. Tämä tarkoittaa sitä, että kuvista rajataan ei halutut osat pois.

5.4.1 Kuvien tuetut tiedostomuodot

Ohjelman uudesta (3.1) versiosta alkaen on mahdollista tuoda ohjelmaan jpeg- ja png-tiedostojen lisäksi myös RAW-tiedostoja, kuten .NEF, .CR2, .ARW2 ja .ORF (3DF Zephyr Manual 2017, 14). Lisäksi kuvat voi ottaa videoformaattista. Videota tuodessa valitaan JPEG- ja PNG-tiedostomuotojen väliltä, sekä se kuinka monta ruutua per sekunti käytetään. Ohjelmassa on myös videota tuodessa mahdollista suodattaa epätarkkoja ruutuja pois automaattisesti.

5.4.2 Kameroiden kalibroinnit

Kuvien lataamisen jälkeen seuraavassa vaiheessa käyttäjä näkee kaikkien kuvien kalibrointitiedot ja kuvien exif-tiedot. Exif-tiedot (Exchangeable Image File) sisältävät muun muassa kuvausvälineen tiedot, kuvausarvot ja mahdollisesti GPS-sijainnin. Tässä vaiheessa on mahdollista valita kuvia yksi kerrallaan ja lisätä tai poistaa niitä vielä laskentavaiheesta. Tästä valikosta myös voidaan lisätä uusia kalibrointeja taikka muokata olemassa olevia.

Uuden kalibroinnin valikosta voidaan muokata kuvan polttoväliä, korjata kuvan vääristymistä, muuttaa kuvan kohdistuspistettä taikka korjata kuvan vinoumaa.

Jos käytettävät kuvat on otettu laajakulma tai kalansilmälinssillä suositellaan adjust tangential disortion-parametrin aktivointia. Tällä valinnalla ohjelma pyrkii automaattisesti oikaisemaan kuvien vääristymät.

5.5 3D-rekonstruktio

Kun kuvien kalibrointi tiedot on annettu siirrytään 3D-rekonstruktioon. Sen alussa on mahdollista valita kolme eri esiasetusta. Ne ovat Categories and Presets, joka on nopein keino syöttää rakennusvaiheen parametrit. Toinen on Advanced Mode, jolla voi määritellä jokaisen yksityiskohdan eri vaiheista. Viimeisenä on XML-tiedoston tuonti ohjelmaan. Tiedostossa käyttäjä on määritellyt rakennusvaiheen kaikki parametrit. Eri lisenssit tukevat näistä eri vaihtoehtoja (Taulukko 1).

Ensimmäinen valinta käyttäjälle on Camera orientation-vaihe (Kuvio 21). Tässä vaiheessa määritellään millaisilla asetuksilla harva pistepilvi lasketaan. Tämä laskenta vaihe käyttää SfM-algoritmia, jonka valmistajat ovat nimenneet Samant-haksi.

Taulukko 1. 3DF Zephyrin eri lisenssien tukemat toiminnot

	Zephyr Lite	Zephyr Pro	Zephyr Aerial
Close range	Yes	Yes	Yes
Aerial	Yes	Yes	Yes
Human Body	Yes	Yes	No
Urban	Yes	Yes	Yes
Advanced parameters	No	Yes	Yes
XML import	No	Yes	Yes

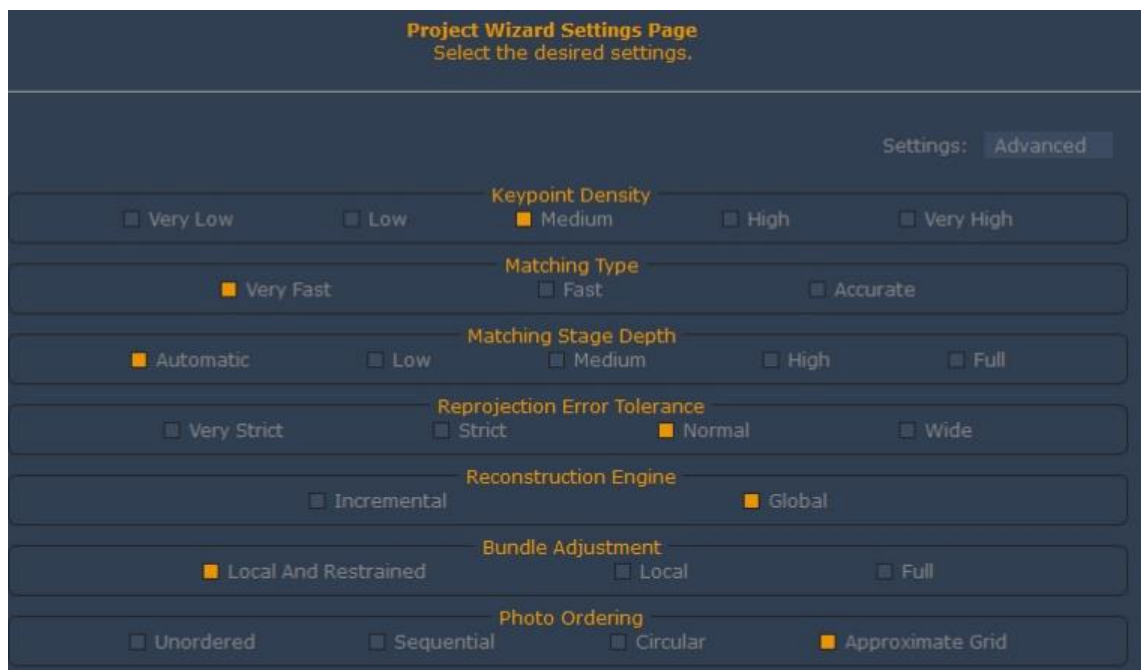
Category-liukuvalikkoon valitaan, joko Close range, Aerial, Human body tai Advanced-parametri. Presets-kohdasta valitaan, joko Fast, Default, Deep tai Exhaustive, joka nostaa SfM-algoritmin tehoa ja vaikuttaa myös huomattavasti laskenta-aikaan.



Kuvio 21. Kameraorientaatio-valikko

Advanced options-valikko tuo käyttäjälle ison määrän uusia vaihtoehtoja 3D-objektin rakentamiseen. Varsinkin monimutkaisemmat muodot hyötyvät näistä asetuksista. Aerial-ja Pro -versio tukee näitä ominaisuuksia.

Advanced options-valikossa (Kuvio 22) keypoint density valintaa muuttamalla voidaan esiasettaa jokaisesta kuvasta laskettavien pisteiden määrä. Tämä ei kuitenkaan täysin suoraan takaa parempaa lopputulosta sillä, koska suurentamalla pisteiden määrää nostetaan toisiinsa vaikuttavien osatekijöiden summaa ja niiden välisten vastaavuuksien havaitseminen aiheuttaa epäselvyyttä (3DF Zephyr Manual 2017, 18-19). Laskettavien pisteiden määrää voidaan muuttaa huomattavasti (2500-15000) per kuva. Valmista suosittelee pienempää määrää tapauksissa, joissa laskentanopeutta halutaan nostaa, kameran välimatka kohteeseen pysyy samana ja/tai kuvien päällekkäisyys on suuri (70-80%). Pisteiden lisäystä suositellaan silloin, kun kameroiden orientaatiot eivät ole optimaalisia, etäisyys muuttuu paljon, kuvakollaasi sisältää kuvia, joiden päällekkäisyys on pieni ja/tai kohde on yksittäinen pinta ilman tekstuuria.



Kuvio 22. Advanced options

Matching Type nostaa pisteiden välisten yhteensopivuuksien löytämistä.

Matchin Stage Depth-valinta määrittelee, kuinka monta yhteensopivuutta pisteiden välillä pyritään löytämään. Isompi arvo nostaa huomattavasti laskenta-aikaa. Suosituksena pienemmälle arvolle on laskenta-ajan vähentäminen, lyhyt välimatka kohteeseen ja korkea päällekkäisyys kuvissa. Isompaa arvoa kannattaa käyttää, kun kameran orientaatiot eivät ole optimaaliset, kuvattavasta kohteesta

on liian läheltä ja kaukaa kuvia, kuvakollaasissa on kuvia, joissa päällekkäisyys on pieni tai kohde on yksittäinen taso ilman tekstuuria (3DF Zephyr Manual 2017, 19)

Reprojction Error Tolerance-kohdassa valinnat liittyvät 3D-pisteen virheelliseen laskemiseen kuvassa olevaan pisteeseen nähden (Pix4D 2017). Valinnat muuttavat virhemarginaalia sallittujen pikselien määrällisen etäisyyden laskentaan nähden. Suositukset pienemmille ja isommille arvoille noudattavat samoja suosituksia kuin edellinen Matching Stage Depth-kohta (3DF Zephyr Manual 2017, 19).

Reconstuction engine-vaiheessa valitaan millaista tuotantolinjaa käytetään kuvien käsittelemisessä. Incremental-valinta vaatii enemmän aikaa mutta tuottaa tarkemman tuloksen. Valmistaja suosittelee global-valintaa, kun datan määrä on valtava. Tarkoittaen sitä, että kuvia on yli tuhat (3DF Zephyr Manual 2017, 19-20).

Bundle Adjustment-valikolla säädetään pisteiden korjausta ja kameroiden sijainteja. Suuren data määrän kanssa suositellaan local and restrained vaihtoehtoa (3DF Zephyr Manual 2017, 20).

Photo Ordering-valikossa kerrotaan ohjelmalle ovatko rakennusvaiheen kuvat peräkkäisiä vai ei. Circular-vaihtoehto on suositus, kun kuvattavan kohteen ympäri on pyörity ja Approximate grid-vaihtoehtoa suositellaan käytettävän lennokeista yms. kohteista kuvattuihin kohteisiin, joiden kuvien päällekkäisyys on suuri (70-80%) (3DF Zephyr Manual 2017, 20).

Advanced Options-valinnan lisäksi käyttäjällä on mahdollisuus valita customize settings. Siinä jokaisen rakennusvaiheen arvon voi muuttaa haluamukseen.

5.6 Harva- ja tiheäpistepilvi

Ensimmäisen vaiheen jälkeen harva pistepilvi on valmis. Renderöinti-ikkunassa näkyy pistepilven lisäksi rakennukseen käytetyt kuvat pilven ympärillä. Ne tunnistaa sinisestä kartioista pilven ympärillä. Tämän jälkeen on mahdollista tools-valikosta valita workspace, jonka alla on Camera Stats.

Täältä voi tarkastella jokaisen pistepilven rakennukseen käytetyn kuvan onnistuneesti lasketut pisteet sekä uudelleenprojektointivirheen määrän. Mitä pienempi luku taulukossa on sitä pienempi on myös virhe. Virheen määrä ei kerro täysin kuvaan suhteutettua tarkkaa lukua, koska se on verrannollinen kameran sensorin kokoon ja kameran muihin ominaisuuksiin. Tässä vaiheessa huonot kuvat on syytä poistaa (Kuvio 23).

	Camera	Mean Reproj. Error	Points Seen
1	DSC_0736.JPG	1,08064	4030
2	DSC_0738.JPG	0,902646	5268
3	DSC_0770.JPG	0,877589	5506
4	DSC_0731.JPG	0,834704	4634
5	DSC_0764.JPG	0,822881	4852
6	DSC_0737.JPG	0,818483	4600
7	DSC_0732.JPG	0,711427	5499
8	DSC_0785.JPG	0,698902	9009
9	DSC_0760.JPG	0,69747	4207
10	DSC_0735.JPG	0,683507	6279
11	DSC_0771.JPG	0,683386	5531
12	DSC_0730.JPG	0,671106	3202

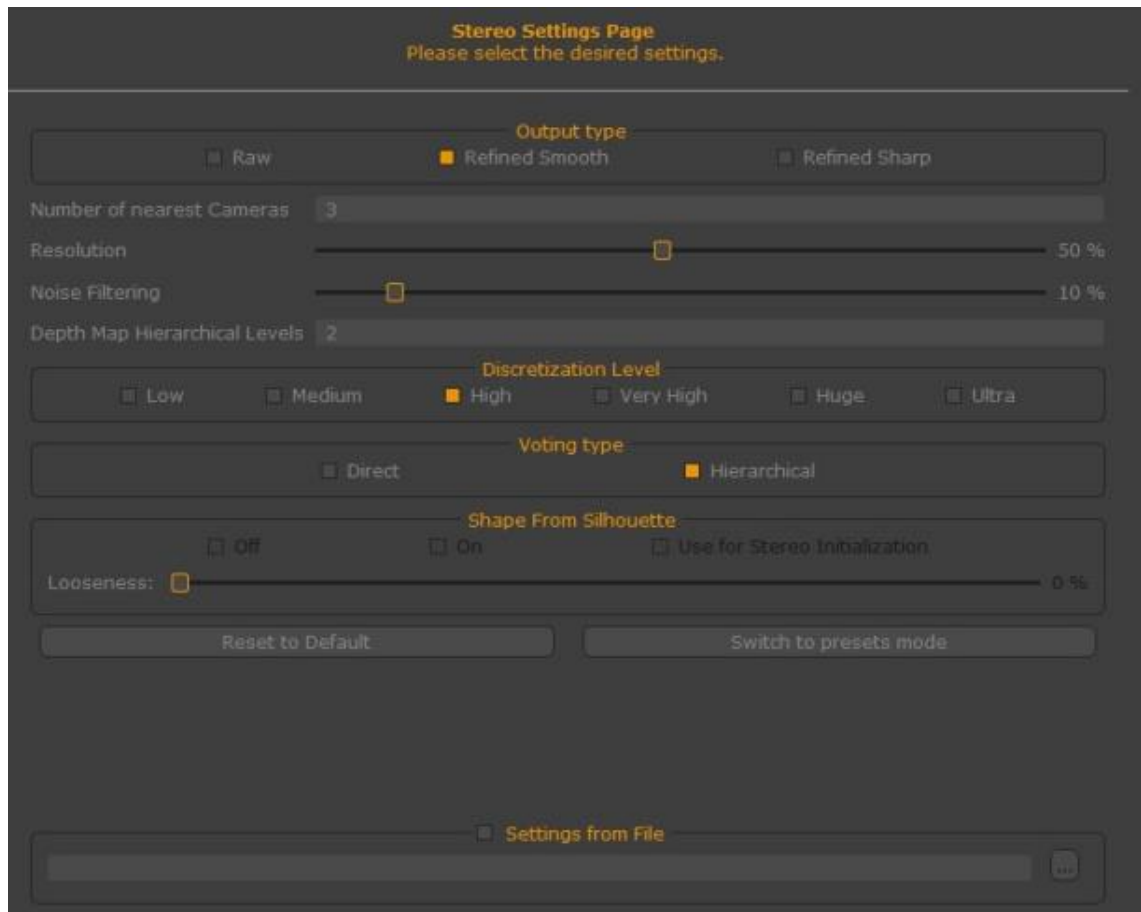
Kuvio 23. Kameroiden uudelleenprojektointivirheet ja onnistuneet 3D-pisteet (3DF Zephyr Manual)

Tiheän pistepilven rakennuksen voi aloittaa workflow-valikosta valitsemalla Dense Point Cloud Generation. Sieltä löytyvät myös meshin generointiin ja teksturoidun meshin generointiin liittyvät valinnat.

Tässä vaiheessa on valinnaisesti mahdollista rajata bounding box-toiminnolla laskettavan alueen ulkopuolelle jätettävät osat. Se generoidaan automaattisesti mutta sitä voi muokata renderöinti ikkunassa liikuttamalla kuution kulmia. Kuten aiemmassakin vaiheessa, käyttäjälle aukeaa valikko, josta päätetään rakennettavan tiheän pistepilven parametrit (Kuvio 24).

Output type-valinnoissa Raw-vaihtoehto laskee vain ne 3D-pisteet, jotka vastaavat täysin 2D-pistettä vastaavaa sijaintia. Muut vaihtoehdot, joko koittavat säilyttää terävät muodot (Refined Sharp) tai säilyttää pehmeämpiä muotoja (Refined Soft). Teräviä muotoja suosivaa vaihtoehtoa suositellaan käytettäväksi esimerkiksi rakennusten ja sisätilojen kanssa ja pehmeää, kun kohteet ovat maastonmuotoja, ihminen ja niin edelleen (3DF Zephyr Manual 2017, 24).

Number of nearest cameras-kohdan lukua suositellaan nostettavaksi tapauksissa, joissa arvellaan useiden kuvien osoittavan samaan pisteeseen. Valinnan nostaminen pidentää prosessointiaikaa (3DF Zephyr Manual 2018, 24).



Kuvio 24. Tiheän pistepilven valikko

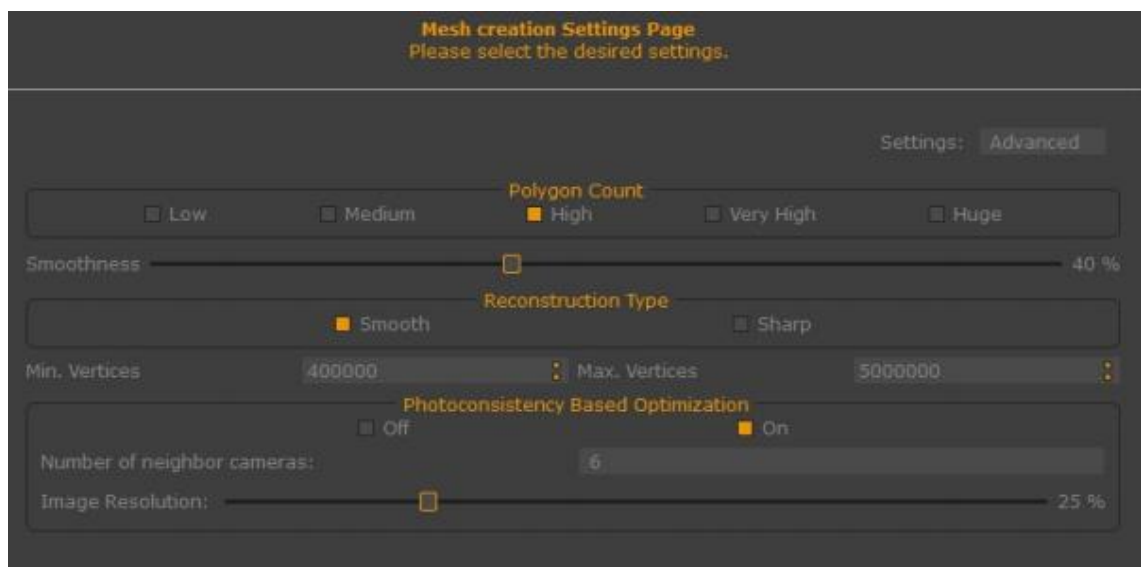
Resolution arvoa muuttamalla saadaan sitä nostamalla enemmän yksityiskohtia mutta tulos voi olla epäselvä, jos kuvissa on huonolaatuisia otoksia joukossa. Tämä arvo vaikuttaa todella paljon laskennassa käytettyyn aikaan. **Noise filtering**-valinnan matala arvo tuottaa tiheän pilven, jossa isolla todennäköisyydellä on epäselvyyksiä. Korkeampi arvo tuottaa siistimmän tuloksen mutta pisteitä on

vähemmän **Depth maps hierarchical Levels**-kohdasta valmistaja toteaa isomman luvun nostavan resoluutiota mutta suosittelee sitä pidettävän default arvossa (3DF Zephyr Manual 2017, 24).

Discretization Level-valikko. Pieni arvo pienentää pisteiden määrää ja vähentää häiriöitä. Isompi arvo käy todella raskaaksi koneelle (3DF Zephyr Manual 2017, 24-25). **Voting type**-kohdalla ohjelma laskee tiheälle pistepilvelle laskentahierarkian silloin, kun Noise filtering-valinnalla vähennetään pisteitä. Suositeltu arvo on hierarchical. **Shape from Silhouette** on kuvapohjainen mallinnus tekniikka, joka käyttää profiilia tai siluettia luodakseen virtuaalisen rungon. Jotta tätä tekniikkaa voisi käyttää tulee jokainen kuvista maskata. Suositellaan silloin, kun käsittelyssä on läpinäkyviä tai heijastavia pintoja, joita ei voida poistaa laskennasta maskilla.

5.7 Meshin luonti

Meshin rakentamisen voi aloittaa tiheän pistepilven rakennuksen jälkeen. 3DF Zephyriin voi sisällyttää useampia pistepilviä samaan projektiin ja meshin voi muuttaa takaisin pistepilveksi (3DF Zephyr Manual 2017, 26). Tapauksessa, joissa projektissa on useita pistepilviä täytyy meshin rakennusvaiheen alussa valita haluttu pistepilvi aukeavalla liukuvalikolla. Kuvassa alla meshin laskentaan liittyvät valinnat. Advanced valikko on Aerial ja Pro -lisenssien omistajille (Kuvio 25).



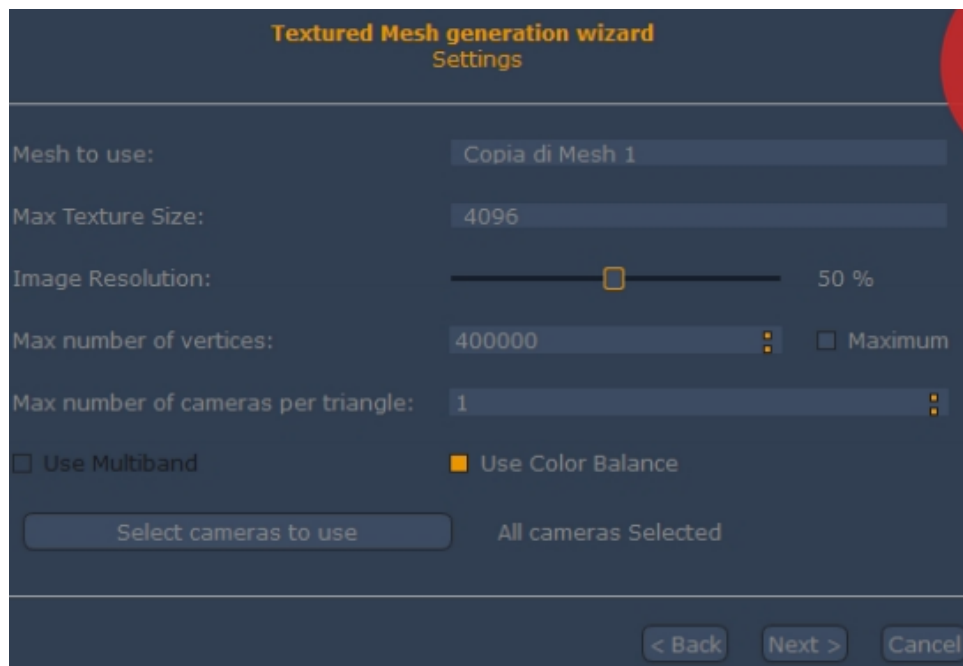
Kuvio 25. Meshin laskennan valinnat

Polygon count-valikolla vähennetään malliin tulevia kolmioita. Tätä lukua vähentämällä voi saada korjattua vääristymiä objektin pinnassa. Vähennystä suositellaan myös tapauksissa, joissa koneen muisti ei riitä tai halutaan low poly-malli (3DF Zephyr Manual). **Smoothness**-valintaa nostamalla ohjelma pyrkii tasoittamaan objektin pintaa. Samalla se vähentää polygoneja. **Reconstruction Type**-kohdasta valitaan halutaanko pehmeämpiä vai terävämpiä muotoja. Valikosta voi myös säätää haluttujen verteksien määrän. Tämä vaihe suoritetaan meshin laskennan jälkeen ja se ei lisää yksityiskohtia objektiin. Se joko yksinkertaistaa mallia vähentämällä sen kolmioita tai lisää niitä (3DF Zephyr Manual 2017, 26).

Photoconsistency Based Optimization-valinta parantaa lukua kasvattamalla meshin yksityiskohtia. **Resolution**-kohdassa olevan arvon ollessa isompi kuin tiheää pistepilveä laskettaessa, on lopputulos yleensä parempi (3DF Zephyr Manual 2017, 27). Samaan projektiin voi luoda eri arvoilla useampia objekteja.

5.8 Tekstuurien luonti

Tekstuurien luonti aloitetaan myös workflow-valikon alta. Käyttäjä valitsee minkä meshin haluaa teksturoida (Kuvio 26).



Kuvio 26. Teksturoidun meshin generoinnin valinnat

Max texture size-valinnassa 3DF Zephyr-kuvakoon nostaminen on mahdollinen syötettyjen kuvien raameissa. Jälkeenpäin, jos käyttäjä haluaa, voidaan teksturoidun objektin ohjelmasta ulosviennin yhteydessä uudelleen muokata kuvan kokoa.

Image resolution-valinnasta voidaan valita prosentuaalinen tarkkuus kuvien resoluutioon nähden. **Max number of vertices**-valinnalla määritetään tekstuurin luontiin käytettävien verteksien määrä. Useampia kameroita voidaan valita laskemaan jokaisen pikselin väriä. Suositeltu määrä on kuitenkin yksi kamera, jotta väritasapaino ei kärsi (3DF Zephyr Manual 2017, 28). Tekstuurin tekemiseen voidaan valita joko kaikki projektin hyväksymät kuvat tai niitä voidaan poistaa.



Kuvio 27. Kuvien muokattavat arvot (3DF Zephyr Manual)

Jokaisen aiemmin esitetyn vaiheen tuotos voidaan tuoda ulos ohjelmasta. Se tapahtuu projektivälilehdeltä valitsemalla haluamansa vaiheen ja klikkaamalla oikealla hiirenpainikkeella kuvaketta. Samalla tavalla voi katsoa vaiheiden ominaisuuksia, sekä lukuun ottamatta harvaa pistepilveä ne voi kloonata uudelleen nimeämisen ja tuhoamisen lisäksi.

On myös syytä muistaa, että vaikka ohjelma ei hyväksy ensin joitakin kuvista, on niitä mahdollista vielä saada osaksi projektia. Kamerate-valikossa voi katsella kuvia, ja muokata niihin liittyviä ominaisuuksia (Kuvio 27).

5.9 Import- ja Export-formaatit

Eri ohjelmilla tuotettujen pistepilvien ja meshien tuonti ohjelmaan on mahdollinen Pro- ja Aerial-lisensseillä. Valmistaja sanoo ohjelman tukevan kaikkia visualisointiin käytettäviä tiedostomuotoja. Ennen ohjelmaan tuomista muiden, jo ohjelmassa olevien vaiheiden, 3D-rekonstruktio suositellaan suorittamaan vähintään mesh-vaiheeseen. Tällöin myös ohjelmaan tuotavan datan väriarvot voidaan tuoda. Myös eri projektien yhdistäminen onnistuu näillä ohjelman versioilla (3DF Zephyr Manual 2017, 29-30, 45). Seuraavat vaiheet ovat vain Pro- ja Aerial lisensseille. Ohjelmasta voi tuoda ulos kameraparametrit jokaisesta kuvasta ja myös projektimatriisit. Harvan pistepilven voi tuoda .ply-tiedostomuotona.

Tiheän pistepilven formaatteina ulos tuonnissa on .ply, .pts, .ptx, .xyz, .las, .e57 ja se on mahdollista viedä suoraan 3D-visualisointi web-palveluun nimeltä Sketchfab. Lisäksi, vaihtoehtoisesti, tiedostojen mukaan voi tuoda väriarvot, normaalit, binäärikoodin, sen rakennetta voidaan yksinkertaistaa ja valmistaja myös toteaa, että sen voi tuoda käyttäen ”Local rendering refence system”-vaihtoehtoa (3DF Zephyr Manual 2017, 45).

Meshin ulostuonnissa Lite-versiolla saa ulos .ply-, .stl- ja .obj/mtl-tiedostomuodot. Sekä sen voi viedä Scetchfab-palveluun. Pro- ja Aerial-versioissa näiden lisäksi voi tuoda .fbx, pdf3df, Universal3D -ja Collada (.dae)-tiedostomuotoja. Myös samat vaihtoehdot ovat mahdollisia ulostuonnissa kuin tiheän pistepilven kanssa. Lisäksi remesh-toiminnolla voi ulostuonnin yhteydessä luoda uuden meshin, jossa verteksejä voidaan lisätä. Tuotuihin objekteihin voi lisäksi metadatana liittää kommentoinnin (3DF Zephyr Manual 2017, 45-46).

Teksturoidun meshin ulostuonnissa Lite-versio tukee samoja formaatteja kuin siitä puhuttaessa aiemmassa kappaleessa ja muut versioit samoin. Lisäksi voi valita tuoko tekstuurin PNG vai JPEG-muotoisena. Tekstuurin voi myös skaalata uudestaan. Skaalaaminen ei lisää yksityiskohtia ja skaalauksessa tulee joko tuplata tai puolittaa koko, jonka voi tehdä useamminkin.

Lisäksi ulos voi tuoda kontrollipisteet, joita käytetään laajojen rakennelmien tai maastojen käsittelyssä, työtilan .ply/text -tiedostona, pdf-tiedoston, joka tekee raportin kyseisestä työtilasta, pdf-tiedoston, joka on screenshot työtilan nykyästä sekä on mahdollista ottaa screenshotteja kuvatiedostoina, vaihtoehtoisesti myös läpinäkyvällä taustalla (3DF Zephyr Manual 2017, 47).

6 MUSEON ESINEIDEN TYÖSTÄMINEN

Kotiseutuyhdistys Rovaniemen Totto ry:n ylläpitämä Rovaniemen Pöykkölässä sijaitseva kotiseutumuseo toimitti kuvattavakseni neljä erilaista esinettä Lapin Yliopiston tiloihin. Pöykkölän talon historia on värikäs ja alkaa jo 1500-luvun loppupuolelta (Korkalo 2013, 1-2). Suosittelem kaikkille paikkaa vierailtavaksi. Suosittelem myös Totto ry:n kotisivuilta löytyvän Tuomo Korkalon kirjoittaman Pöykkölän talon historia-tekstin lukemista, joka tiivistää talon värikkään menneisyyden.

Kuvattavina esineinä oli kansallispuku (Kuva 4), vanhanaikainen kirjoituskone (Kuva 2), langan kerimiseen käytetty rukki (Kuva 3) sekä Pöykkölän historiaan liittyvä Totto-koru (Kuva 1).



Kuva 1. Totto-koru

Totto -korun malli on saatu Rovaniemen soljesta, joka on ollut esillä vuodesta 1992 Lapin maakuntamuseon päänäyttelyssä Arktikumissa. Koruja saa kaulariipuksina ja kravattikoruina. Valmistajana on toiminut kultaseppä Sanni Lehtinen.

6.1 Kuvausvaihe

Kuvaaminen tapahtui Lapin yliopiston luokkatilassa. Studio ei ollut käytettävissä kuvauspäivänä. Kuvasin esineet useammalta akselikorkeudelta, kansallispuvua lukuun ottamatta. Käytössä oli varjolla varustettuja valaisimia sekä luonnonvaloa. Kuvausympäristö ei ollut optimaalinen taustaltaan.



Kuva 2. Kirjoituskone

Kaikki kuvattavat kohteet olivat haastavia. Rukki ja kirjoituskone olivat hyvin monimutkaisia esineitä, jonka lisäksi kirjoituskoneen kiiltävät pinnat olivat vaativat. Koru osoittautui hyvin vaikeaksi erittäin kiiltävän pintansa vuoksi ja läheltä kuvattaessa oli kuvan kohdistuksessa vaikeuksia tämän vuoksi. Kansallispuvusta sain paljon näyttäviä kuvia mutta eri akselikorkeuksia ei tilassa voinut sen osalta toteuttaa toivotulla tavalla. Lisäksi huoneen vaaleat seinät eivät soveltuneet valkoisen puvun taustaksi.

6.2 Kuvien käsittely

Keskityin opinnäytetyössäni kirjoituskoneen mallintamiseen 3DF Zephyr Lite-ohjelmalla. Kirjoituskonetta olivat monet sanoneet vaikeimmaksi kohteeksi ja tehtävänäni oli haastaa kyseinen ohjelma. Tästä esineestä oli myös kaikista eniten hyviä kuvia usealta kuvausakselilta.



Kuva 3. Rukki

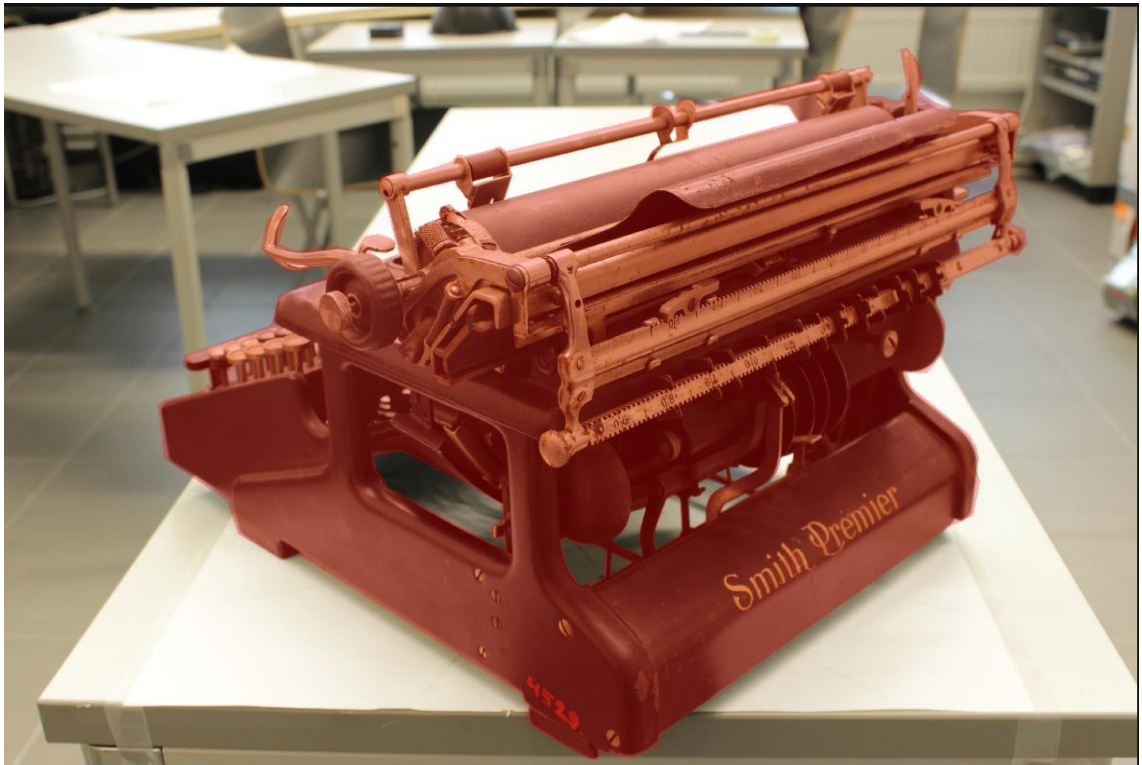
Kuvien ohjelmaan tuonti oli yksinkertaista ja ohjelma automaattisesti tunnisti kuvien kalibrointi ja exif tiedot. Päätin käyttää kuvien maskien tekoon aikaa, jotta esineen 3D -rekonstruktio onnistuisi mahdollisimman hyvin. Maskin tekoon ohjelmassa on tarjolla vapaalla kädellä piirtämisen lisäksi polygon line-työkalu, jolla kuvaan voi piirtää suoraa viivaa valitsemastaan pisteestä pisteeseen. Työvaihe oli varsin työläs ja pätevän kuvaustaustan hyödyntäminen olisi helpottanut kuvien muokkausta kuvankäsittelysovelluksessa. 3DF Zephyrissä maskaus kuitenkin onnistui hyvin.

Kuvakollaasissa oli lopulta lähes sata maskattua kuvaa. Aivan aluksi kokeilin rekonstruktiota ilman maskeja ja kuviin jäi paljon siivottavaa. Sitä ei ollut kuitenkaan aivan äärettömästi ja ylimääräisten pisteiden siivoukseen ohjelma tarjosi varsin näppäriä työkaluja. Niillä pystyi renderöiti-ikkunassa piirtämään joko vapaalla kädellä tai erilaisilla muodoilla, joilla valittiin näkymästä osat, jotka halusi poistaa. Lisäksi pystyi valitsemaan yhtenevän geometrian ja poistamaan sen. Poisto tapahtui yksinkertaisesti delete-napin kautta ja oli välitön.



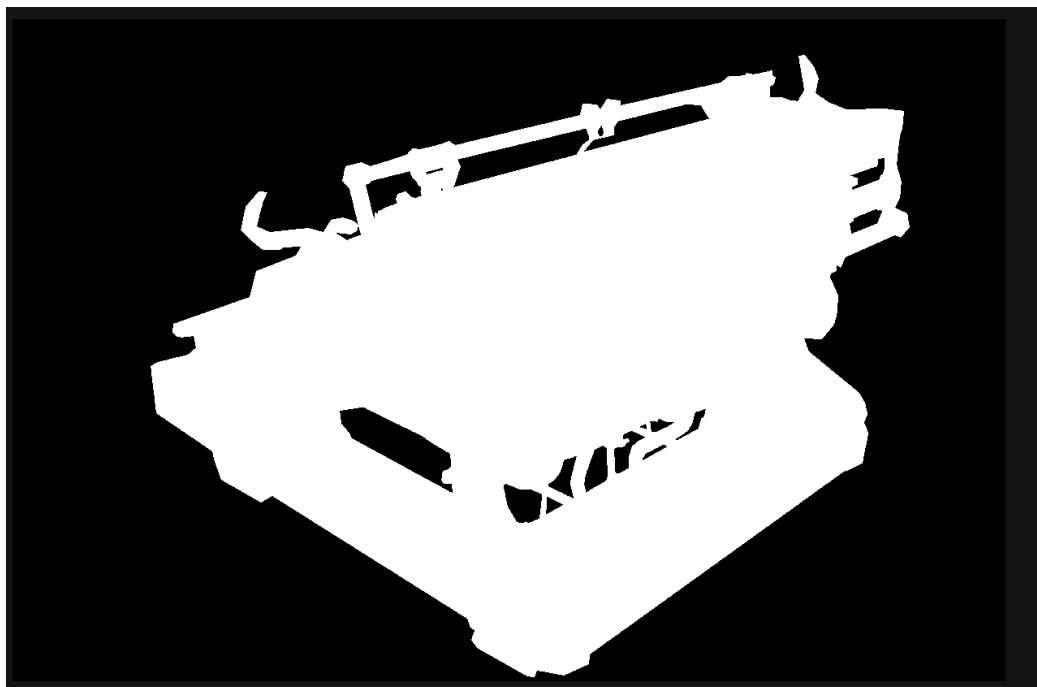
Kuva 4. Kansallispuku

Maskattu alue esitetään ohjelmassa kahdella tavalla. Alla maski esitettynä kuvan päällä (Kuvio 28).



Kuvio 28. Maskattu kirjoituskone

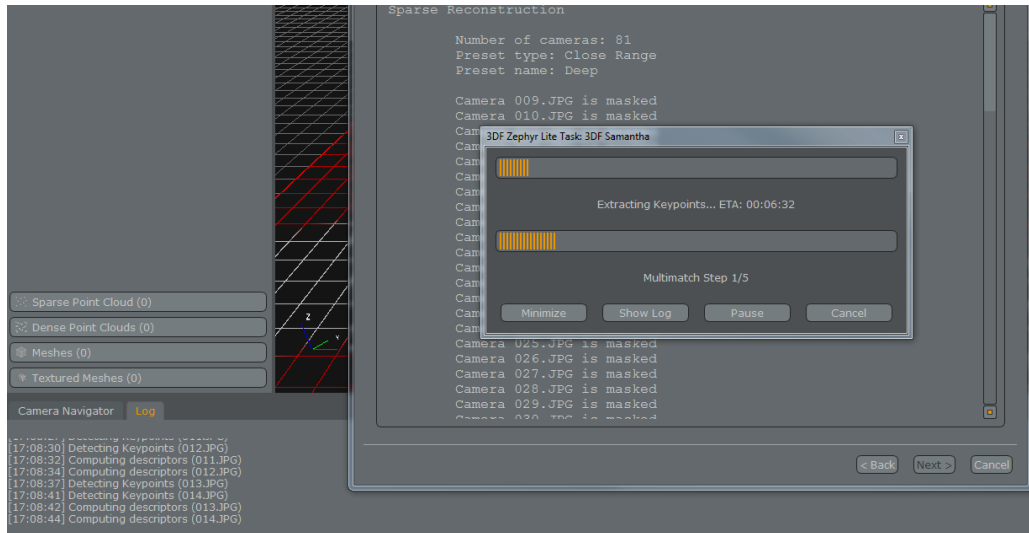
Toinen tapa esitettynä alla (Kuvio 29). Alfakanava poistaa laskennasta alueita.



Kuvio 29. Maskin mustat alueet jäävät pois laskennasta

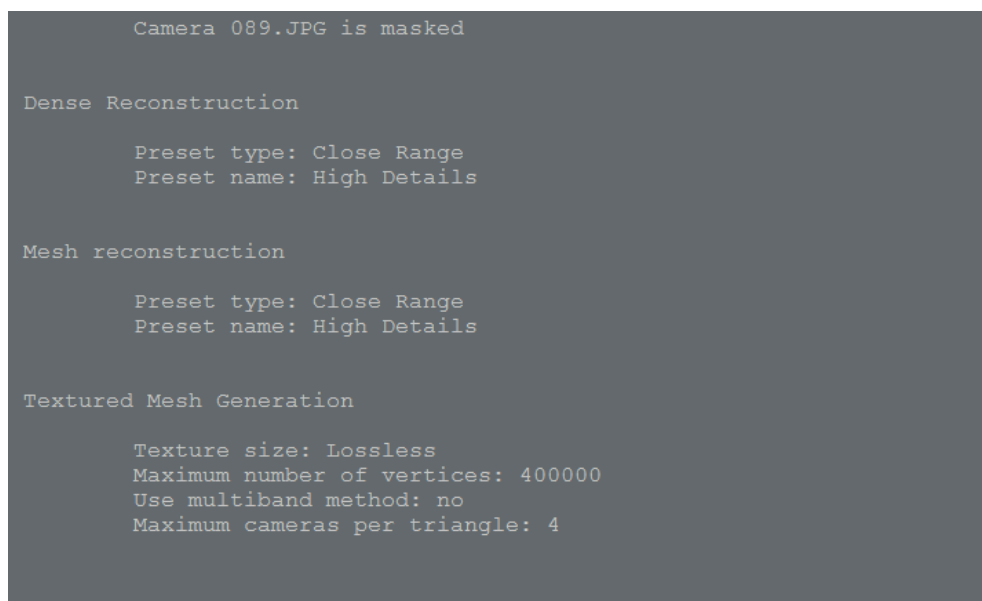
6.3 Rekonstruktio

Eri rekonstruktiovaiheet olivat erittäin hitaita Lite-version salliman yhden ytimen käytön vuoksi (Kuvio 30, Kuvio 31). Käytössä ollut laitteisto oli enemmän kuin riittävä laadultaan.



Kuvio 30. Harvan pistepilven laskenta.

Siitä huolimatta, vaikka käytössä oli Nvidian-grafiikkaprosessori ja ohjelman tukema Cuda-tekniologia, laskenta-ajat olivat ongelmallisia. Useilla eri asetuksilla koittamani rekonstruktio osoittivat, että ammattimainen ohjelman käyttäminen vaatisi täyden lisenssin.



Kuvio 31. 3D-rekonstruktion parametreja

Ohjelma tarjoaa meshiin jäävien reikien täyttämiseen ja objektin pinnan tasoittamiseen kätevät työkalut. Suurin osa rakennusvaiheen valinnoista on kuitenkin Pro-lisenssin takana ja Lite-version vaihtoehdot eivät riittäneet kunnollisen teksturoidun objektin tuottamiseen. Sillä pääsi kuitenkin kirjoituskoneen kanssa yllättävänkin pitkälle (Kuvio 32, Kuvio 33). Objektin tuonti ohjelmasta oli hyvin yksinkertainen. Sen sai kätevästi tuotua Blenderin tukemana obj-tiedostona ulos.



Kuvio 32. Ensimmäisiä yrityksiä maskatuilla kuvilla

RAW -ja JPEG kuvista erikseen rakennetuilla malleilla en paljaalla silmällä huomannut mitään eroa ja pyysin myös muiden pLAB-ohjelmistolaboratorion henkilökuntaan kuuluvien mielipidettä tästä. JPEG-tiedostot olivat kooltaan noin 5 megatavua ja RAW-tiedostot noin viisi kertaa isompia.



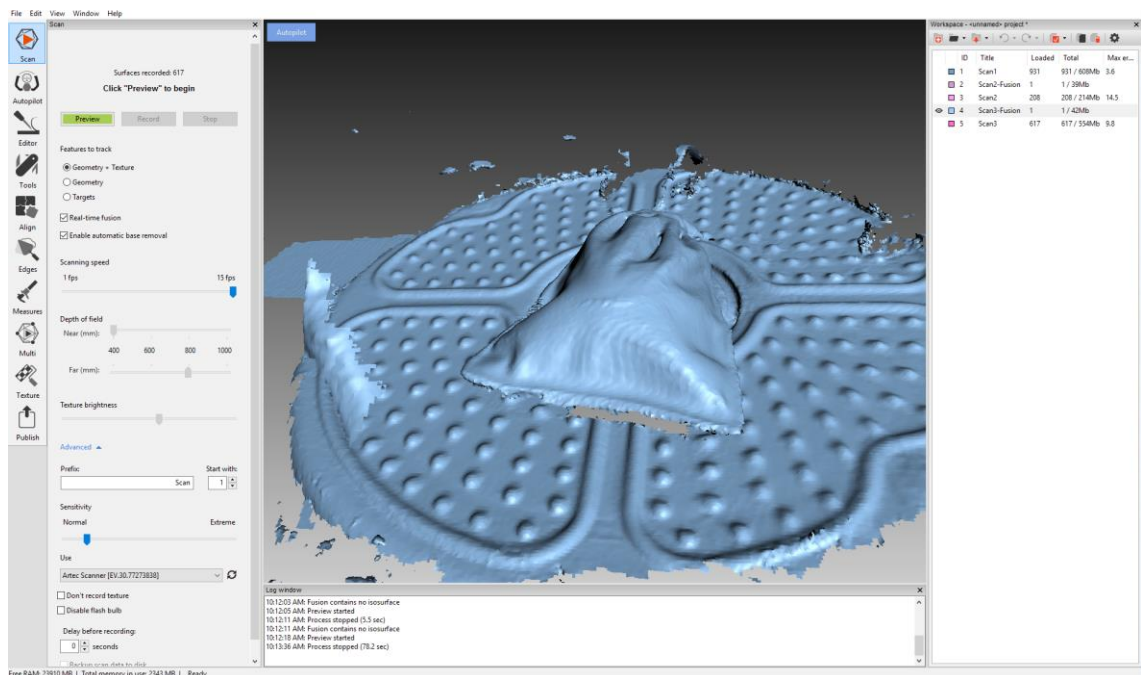
Kuvio 33. obj -tiedosto Blender 3D-mallinnus ohjelmassa

Yllä lopullinen versio parhaasta mallista. Laskennassa käytetty on käytetty lähes kaikki otetut kuvat (168/172). Lopulta vain neljä kuvista ei ollut laskentaan sopivia.

7 3D-SKANNAUS

3D-skanneri on reaali maailman kohdetta analysoiva laite. Se mittaa skannattavan kohteen pinnasta 3D-avaruudessa olevia pisteitä ja tekee näistä pisteistä pilven, josta jatkokäsittellään erilaisilla sovelluksilla kiinteä 3D-objekti. 3D-skannerit jaetaan koskettaviin -ja ei-koskettaviinskannereihin. Ei-koskettavat skannerit jaetaan taas aktiivisiin ja passiivisiin (Bodi & Galantucci & Kaçani & Piperi & Spahiu 2016, 2)

Aktiiviset lähettävät eri tyyppisiä säteilyitä, kuten ultraääntä, valoa tai röntgensäteitä ja tulkitsevat objektiä säteilyn takaisin heijastumisesta. Passiiviset skannerit havainnoivat objektista heijastuvaa valoa, kuten auringon valoa tai infrapunavalo. Heijastavat, ja läpinäkyvät pinnat ovat yleensä liian haastavia 3D-skannaukseen ja myös mustat pinnat tuottavat ongelmia joissakin tapauksissa.



Kuvio 34. Artec Studio 11

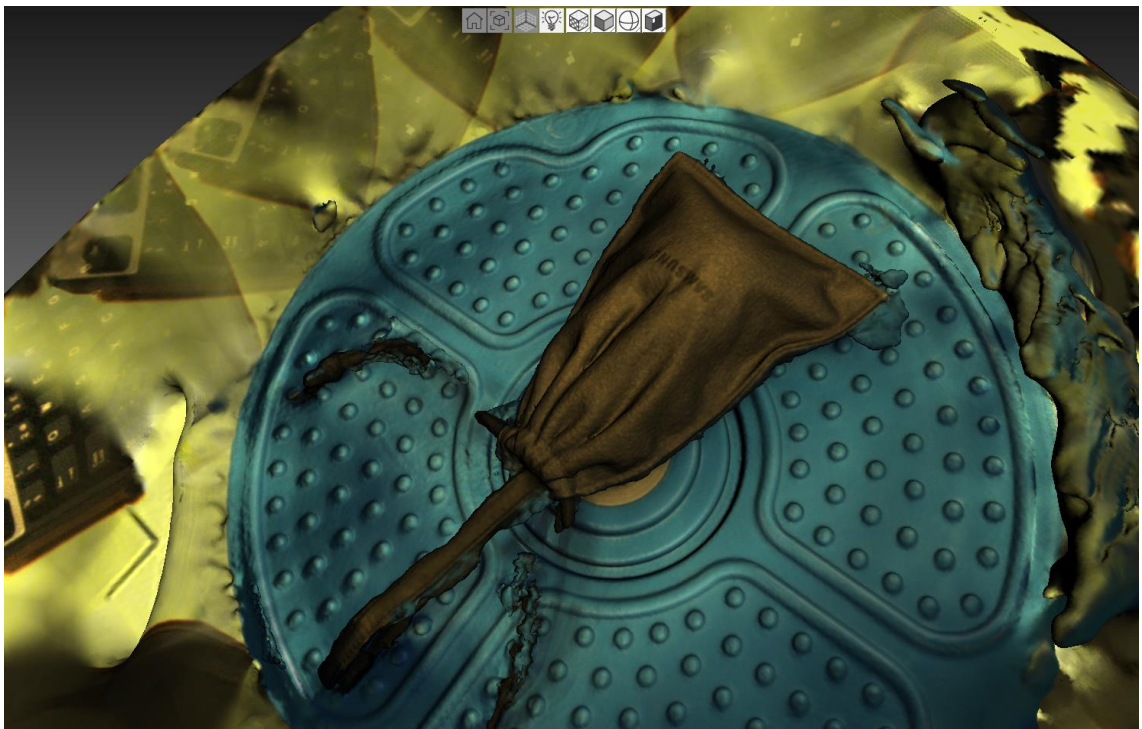
7.1 Artec Eva 3D-skanneri

Opinnäytetyön tekovaiheessa lyhyesti sivuamani Artec Eva-skanneri projektoi kapean valokaistaleen 3-ulotteiseen pintaan niin kutsutulla valo-ohjaus teknolo-

gialla. Tämä teknologia on hyvin nopea verrattuna varsinkin kiinteisiin 3D-skannereihin. Skanneria tukeva ohjelma, Artec Studio 11, hyväksyy useamman skannauksen samasta objektista ja se haluttaessa yhdistää nämä skannaukset orientaatioineen yhdeksi objektiksi. Lisäksi ”Watertight”-malli saadaan suhteellisen kiuttomasti pienillä pistepilvien siivouksilla ulos useammassa formaatissa. Vesitiivis malli on valmis 3D-tulostukseen. Skanneri myös ottaa väriarvot helposti pinnoista, jotka soveltuvat tälle teknologialle. Skannattaessa täytyy huomioida etäisyys tarkasti, jotta skannaus onnistuu helpommin sekä FPS eli frame per second, jotta väriarvot ilmaantuvat tarkemmin.

7.2 Skannaaminen

Skannasin Artec Eva 3D-skannerilla pienen kankaisen objektin ja Lapin ammattiotiston LAO3D-projektissa työskentelevä Meiju Sunnari prosessoi datan Artec Studio 11 -ohjelmalla professional -lisenssillä.) Teknologiaan tutustuminen jäi rajalliseksi. Yllä (Kuvio 34) ja alla (Kuvio 35) kuvat skannatusta objektista.



Kuvio 35. Teksturoitu aurinkolasien suojapussi 3D-skannattuna. Skannusta ei ole siivottu millään tavalla

Kuviossa 34 vasemmalla reunalla näkyy Artec Studion valikko, joissa voi nähdä skannerin kuvausnopeuden ruutuina per sekunti (fps). Skannatessa käyttäjä voi

halutessaan kuvata objektia tekstuurin kanssa tai ilman. Valikot vaikuttivat varsin helppokäyttöisiltä ja eri skannausten yhdistäminen ei vaatinut alignment pointtien kohdistamista. Teksturoidun watertight-mallin sai ulos nopeasti. Kokonaisuudessaan aikaa kului prosessiin muutama tunti sisältäen skannauksen.

8 POHDINTA

Kummassakin teknologiassa on rajoitteensa ja ne ovat hyvin lähellä toisiaan. Valaistus, kuvattavien objektien tausta, pintamateriaalin heijastuvuus tai heijastumattomuus hankaloittavat erittäin paljon kuvausta tai tekevät sen turhaksi. Lisäksi hyvin monimutkaiset objektit ovat osittain mahdottomia mallintaa näillä tekniikoilla, koska kuvausvälineet eivät pääse kaikkiin pieniin väleihin. Tällöin objekteja joudutaan korjailemaan perinteisissä mallinnusohjelmissa, jotta ne saadaan kauttaaltaan kiinteiksi objekteiksi. Tämä lisäksi aiheuttaa haasteen lisättyjen pintojen teksturointiin ja liittämiseen alkuperäisiin tekstuureihin saumattomasti. Lisäksi jos näitä pintoja on useita, se voi aiheuttaa pelimoottorin puolella ongelmia varsinkin jos halutaan pitää materiaalien määrä pienenä.

3DF Zephyrin Lite-versio osoitti, että vaikka objektia voi rakentaa jopa kahdesta sadasta kuvasta, sen ominaisuuksia on karsittu liikaa. Hivenen vaikeampi objekti osoittautui erittäin haasteelliseksi rekonstruoida. Käytettävä kone oli hyvä mutta Lite-versio rajoitti laskennan yhdelle ytimelle mikä pitkitti laskentavaiheita huomattavasti. Lisäksi se ei tukenut Pro-versiosta löytyvää ortomosakointitekniikkaa, minkä koen olevan ehdottoman tarpeellinen saumattoman meshin ja tekstuurin onnistumisen kannalta. Kaikesta huolimatta lopputulos oli yllättävän hyvä, vaikka kirjoituskoneen malli ei ollut täysin kokonainen. Objektin mesh oli sen verran tasokas, että siitä olisi voinut käyttää perinteisen mallinnusohjelman pohjalla ja rakentaa siitä kokonaisen objektin. Tosin tässä tapauksessa teksturointi olisi täytyntä tehdä uudelleen ja täysin yhtenevän tekstuurin tekeminen olisi ollut haasteellinen. Ohjelman tuottamat tekstuurit vaikuttivat erittäin laadukkailta, oli sitten kyseessä RAW-kuvista tai JPEG-kuvista tuotettu tekstuuri. Paljaalla silmällä ei huomannut mitään eroa.

Jatkoa ajatellen olen jo suositellut pLAB-ohjelmistolaboratoriota ostamaan ohjelmiston koko lisenssin ja tulemme kuvaamaan asiakkaan objektit uudelleen ja rekonstruoimaan ne päivitetyllä ohjelmalla sekä tehokkaammalla tietokoneella.

3D -skannauksen suhteen olen tyytyväinen lyhyeen tekovaiheeseen, jossa sain kuvattua Artec Eva 3D-skannerilla. Skannaus osoitti, että skanneri pystyy kuva-

maan erilaisia pintamateriaaleja ja rakentamaan niistä lyhyen ajan sisään laadukkaan meshin tekstuureineen. Jatkotutkimusta täytyisi kuitenkin tehdä ja skannata vielä useamman kerran erilaisia objekteja, jotta meshin rakennusvaihe ja lopullinen tulostettu versio saataisiin arvioitavaksi. Voin kuitenkin todeta, että Lapin ammattiopiston LAO3D-hankkeen henkilökunta on tehnyt useampia onnistuneita skannauksia ja 3D-tulostuksia.

Lopuksi sanoisin, että nämä opinnäytteessä tutkimani teknologiat alkavat olla todella lähellä sitä, että ne ainakin helpompien objektien kohdalla korvaavat käsin mallintamisen. Suurimman hyödyn näkisin siinä, että tekstuureista tulee juuri sellaiset kuin objektin pinta on lukuun ottamatta haasteellisiksi osoittautuneita, kiiltäviä, läpinäkyviä ja erilaisia mustia pintoja. Lisäksi isojen kaupunkialueiden mallinnuksessa tekniikka voi vähintäänkin helpottaa virtuaalisen ympäristön mittasuhteiden havainnoimisessa.

LÄHTEET

3DF Zephyr Manual 3.100. 3DFLOW. <http://3dflow.net/zephyr-doc/3DF%20Zephyr%20Manual%203.100%20English.pdf>.

Black, D. 2017. Understanding Focal Length. Nikon USA. <http://www.nikonusa.com/en/learn-and-explore/a/tips-and-techniques/understanding-focal-length.html>

Bodi, I. Galantucci, L. Kaçani, J.Piperi, E. Spahiu, T. 2016. From 3D scanning to 3D printing: Application in fashion industry. Conference Paper. Conference of Textile. Albania. https://www.researchgate.net/publication/310449820_From_3D_scanning_to_3D_printing_Application_in_fashion_industry

Cambridge in Colour. 2017. <http://www.cambridgeincolour.com/tutorials/depth-of-field.htm>.

Digitaalikuvaus.com. 2017. Kameran objektiivin valinta. <http://www.digitaalikuvaus.com/objektiivin-valinta.html>

Furukawa, Y. Hernández, C. Multi-View Stereo: A tutorial. 2015. Washington University in St. Louis. Google Inc. http://carloshernandez.org/papers/fnt_mvs_2015.pdf.

Haggrén, H. 2002. Fotogrammetrinen yleiskurssi. Kuvamittauksen vaihtoehtoiset suoritustavat. Aalto yliopisto. <https://foto.aalto.fi/opetus/301/luennot/2/2.html>.

Haggrén, H. 2003a. Fotogrammetrinen perusteet. Ortokuvien tuottaminen. Aalto yliopisto. <https://foto.aalto.fi/opetus/220/luennot/7/7.html>

Haggrén, H. 2003b. Fotogrammetrian perusteet. Stereokartoituskojeet. Aalto yliopisto. <https://foto.aalto.fi/opetus/300/luennot/9/9.html>.

Haggrén, H., Honkavaara, E. 2005. Fotogrammetrian kartoitus -luennot. Aalto yliopisto. https://foto.aalto.fi/opetus/220/luennot/7/L7_2005.pdf.

Haggrén, H. 2011. 200 Vuotta fotogrammetrian ja kaokartoituksen historiaa. Aalto yliopisto. https://foto.aalto.fi/seura/julkaisut/pjf/pjf_e/2011/PJF2011_3_Haggren.pdf.

Kelby, S. 2010. Suuri digikuvauskirja. Porvoo. WS Bookwell.

Korkalo, T.2013. Pöykkölän talon historia. Rovaniemen kotiseutuyhdistys Totto ry. <https://www.totto.fi/@Bin/175378/P%C3%B6ykk%C3%B6l%C3%A4n+historia.pdf>.

Lim, R. 2017. 10 Reasons Why You Should be Shooting RAW. <https://photographyconcentrate.com/10-reasons-why-you-should-be-shooting-raw/>.

Mansurov, N. 2017a. Understanding Aperture. <https://photographylife.com/what-is-aperture-in-photography/>.

Mansurov, N. 2017b. Understanding ISO – A Beginner’s Guide.
<https://photographylife.com/what-is-iso-in-photography/>.

Rönholm, P. 2003. Yksittäisen kuvan geometrisista ominaisuuksista. Fotogrammetrian, kuvatulkinnan ja kaukokartoituksen erikoistyö. Fotogrammetrian ja kaukokartoituksen laboratorio, TKK.
https://foto.aalto.fi/opetus/290/julkaisut/pronnhol/Kuvangeometria_ronholm.pdf.

Pix4D. 2017. Reprojection Error.
<https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202559369-Reprojection-Error#gsc.tab=0>

Wicked Sago. 2013. What is Aperture?.
<http://wicked-sago.blogspot.com/2012/01/what-is-aperture.html>.

Robert Collins:
CSE436, Penn State


Lecture 12: Camera Projection

Reading: T&V Section 2.4

Robert Collins:
CSE436, Penn State

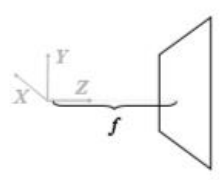
Imaging Geometry

Object of Interest
in World Coordinate
System (U,V,W)



Robert Collins:
CSE436, Penn State

Imaging Geometry

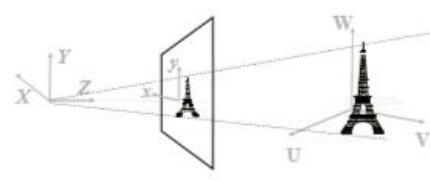


**Camera Coordinate
System (X,Y,Z).**

- Z is optic axis
- Image plane located f units out along optic axis
- f is called focal length

Robert Collins:
CSE436, Penn State

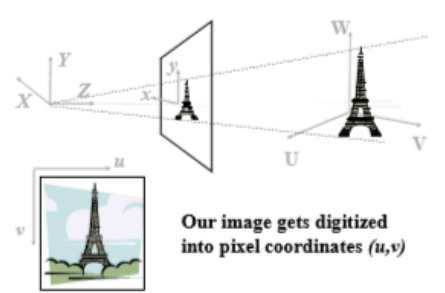
Imaging Geometry



**Forward Projection onto image plane.
3D (X,Y,Z) projected to 2D (x,y)**

Robert Collins:
CSE436, Penn State

Imaging Geometry

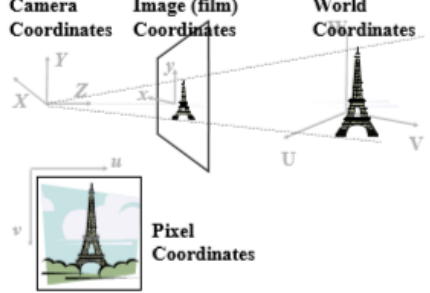


**Our image gets digitized
into pixel coordinates (u,v)**

Robert Collins:
CSE436, Penn State

Imaging Geometry

Camera Coordinates	Image (film) Coordinates	World Coordinates
-----------------------	-----------------------------	----------------------



**Pixel
Coordinates**

Forward Projection

World Coords	Camera Coords	Film Coords	Pixel Coords
U	X	x	u
V	Y	y	v
W	Z		

We want a mathematical model to describe how 3D World points get projected into 2D Pixel coordinates.

Our goal: describe this sequence of transformations by a big matrix equation!

Backward Projection

World Coords	Camera Coords	Film Coords	Pixel Coords
U	X	x	u
V	Y	y	v
W	Z		

Note, much of vision concerns trying to derive backward projection equations to recover 3D scene structure from images (via stereo or motion)

But first, we have to understand forward projection...

Forward Projection

World Coords	Camera Coords	Film Coords	Pixel Coords
U	X	x	u
V	Y	y	v
W	Z		

3D-to-2D Projection
• perspective projection

We will start here in the middle, since we've already talked about this when discussing stereo.

Basic Perspective Projection

Perspective Projection Eqns

$$x = f \frac{X}{Z}$$

$$y = f \frac{Y}{Z}$$

Basic Perspective Projection

Perspective Projection Eqns

$$x = f \frac{X}{Z}$$

$$y = f \frac{Y}{Z}$$

derived via similar triangles rule

Basic Perspective Projection

Perspective Projection Eqns

$$x = f \frac{X}{Z}$$

$$y = f \frac{Y}{Z}$$

derived via similar triangles rule

Robert Collins: CSE436, Penn State

Basic Perspective Projection

Scene Point $p = (X, Y, Z)$

Image Point $p = (x, y, f)$

Perspective Projection Eqs.

$$x = f \frac{X}{Z}$$

$$y = f \frac{Y}{Z}$$

So how do we represent this as a matrix equation?
We need to introduce homogeneous coordinates.

Robert Collins: CSE436, Penn State

Homogeneous Coordinates

Represent a 2D point (x, y) by a 3D point (x', y', z') by adding a "fictitious" third coordinate.

By convention, we specify that given (x', y', z') we can recover the 2D point (x, y) as

$$x = \frac{x'}{z'} \quad y = \frac{y'}{z'}$$

Note: $(x, y) = (x, y, 1) = (2x, 2y, 2) = (kx, ky, k)$ for any nonzero k (can be negative as well as positive)

Robert Collins: CSE436, Penn State

Perspective Matrix Equation

(in Camera Coordinates)

$$x = f \frac{X}{Z}$$

$$y = f \frac{Y}{Z}$$

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

Robert Collins: CSE436, Penn State

Forward Projection

World Coords	Camera Coords	Film Coords	Pixel Coords
U	X	x	u
V	Y	y	v
W	Z		

Rigid Transformation (rotation+translation) between world and camera coordinate systems

Robert Collins: CSE436, Penn State

World to Camera Transformation

Avoid confusion: P_w and P_c are not two different points. They are the same physical point, described in two different coordinate systems.

Robert Collins: CSE436, Penn State

World to Camera Transformation

Rotate to align axes

Translate by $-C$ (align origins)

$$P_c = R(P_w - C)$$

Robert Collins: CSE436, Penn State

Matrix Form, Homogeneous Coords

$$P_C = R(P_W - C)$$

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} & 0 \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} & 0 \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -c_x \\ 0 & 1 & 0 & -c_y \\ 0 & 0 & 1 & -c_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U \\ V \\ W \\ 1 \end{pmatrix}$$

Robert Collins: CSE436, Penn State

Example: Simple Stereo System

left camera located at (0,0,0)

right camera located at (Tx,0,0)

Left camera located at world origin (0,0,0) and camera axes aligned with world coord axes.

Robert Collins: CSE436, Penn State

Simple Stereo, Left Camera

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U \\ V \\ W \\ 1 \end{pmatrix}$$

camera axes aligned with world axes

located at world position (0,0,0)

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Robert Collins: CSE436, Penn State

Simple Stereo Projection Equations

Left camera

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} \sim \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$x_i = f \frac{X}{Z} \quad y_i = f \frac{Y}{Z}$$

Robert Collins: CSE436, Penn State

Example: Simple Stereo System

left camera located at (0,0,0)

right camera located at (Tx,0,0)

Right camera located at world location (Tx,0,0) and camera axes aligned with world coord axes.

Robert Collins: CSE436, Penn State

Simple Stereo, Right Camera

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -T_x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U \\ V \\ W \\ 1 \end{pmatrix}$$

camera axes aligned with world axes

located at world position (Tx,0,0)

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -T_x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Simple Stereo Projection Equations

Left camera

$$\begin{bmatrix} x_l \\ y_l \\ 1 \end{bmatrix} \sim \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$x_l = f \frac{X}{Z} \quad y_l = f \frac{Y}{Z}$$

Right camera

$$\begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ 1 \end{bmatrix} \sim \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -T_x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$x_r = f \frac{X - T_x}{Z} \quad y_r = f \frac{Y}{Z}$$

Bob's sure-fire way(s) to figure out the rotation

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} & 0 \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} & 0 \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \\ 1 \end{bmatrix}$$

P_C = R P_W

This equation says how vectors in the world coordinate system (including the coordinate axes) get transformed into the camera coordinate system.

Figuring out Rotations

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} & 0 \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} & 0 \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \\ 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{P}_C = \mathbf{R} \mathbf{P}_W$$

what if world x axis (1,0,0) corresponds to camera axis (a,b,c)?

$$\begin{bmatrix} \mathbf{a} \\ \mathbf{b} \\ \mathbf{c} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} & 0 \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} & 0 \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \mathbf{a} \\ \mathbf{b} \\ \mathbf{c} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{a} & f_{12} & f_{13} & 0 \\ \mathbf{b} & f_{22} & f_{23} & 0 \\ \mathbf{c} & f_{32} & f_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

we can immediately write down the first column of R!

Figuring out Rotations

and likewise with world Y axis and world Z axis...

same axis in camera coords: world X axis (1,0,0) in camera coords; world Y axis (0,1,0) in camera coords; world Z axis (0,0,1) in camera coords

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} & 0 \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} & 0 \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \\ 1 \end{bmatrix}$$

axis in world coords

Figuring out Rotations

Alternative approach: sometimes it is easier to specify what camera X, Y, or Z axis is in world coordinates. Then do rearrange the equation as follows.

$$\mathbf{P}_C = \mathbf{R} \mathbf{P}_W \Rightarrow \mathbf{R}^{-1} \mathbf{P}_C = \mathbf{P}_W \Rightarrow \mathbf{R}^T \mathbf{P}_C = \mathbf{P}_W$$

$$\begin{bmatrix} f_{11} & f_{21} & f_{31} & 0 \\ f_{12} & f_{22} & f_{32} & 0 \\ f_{13} & f_{23} & f_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \\ 1 \end{bmatrix}$$

Figuring out Rotations

$$\begin{bmatrix} f_{11} & f_{21} & f_{31} & 0 \\ f_{12} & f_{22} & f_{32} & 0 \\ f_{13} & f_{23} & f_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \\ 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{R}^T \mathbf{P}_C = \mathbf{P}_W$$

what if camera X axis (1,0,0) corresponds to world axis (a,b,c)?

$$\begin{bmatrix} f_{11} & f_{21} & f_{31} & 0 \\ f_{12} & f_{22} & f_{32} & 0 \\ f_{13} & f_{23} & f_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{a} \\ \mathbf{b} \\ \mathbf{c} \\ 1 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \mathbf{a} & f_{21} & f_{31} & 0 \\ \mathbf{b} & f_{22} & f_{32} & 0 \\ \mathbf{c} & f_{23} & f_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{a} \\ \mathbf{b} \\ \mathbf{c} \\ 1 \end{bmatrix}$$

we can immediately write down the first column of R^T, (which is the first row of R).

Robert Collins: CSE486, Penn State

Figuring out Rotations

and likewise with camera Y axis and camera Z axis...

same axis in camera coords: $\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}$ $=$ $\begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} & 0 \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} & 0 \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix} U \\ V \\ W \\ 1 \end{pmatrix}$ axis in world coords:

camera X axis (1,0,0) in world coords: \rightarrow f_{11}

camera Y axis (0,1,0) in world coords: \rightarrow f_{21}

camera Z axis (0,0,1) in world coords: \rightarrow f_{31}

Robert Collins: CSE486, Penn State

Example

World coords: $\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$

Camera coords: $\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$

$$R_{\text{train}} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad R_{\text{fly}} = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Robert Collins: CSE486, Penn State

Note: External Parameters also often written as R,T

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} & 0 \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} & 0 \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -c_x \\ 0 & 1 & 0 & -c_y \\ 0 & 0 & 1 & -c_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U \\ V \\ W \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{R} (\mathbf{P}_W - \mathbf{C}) = \mathbf{R} \mathbf{P}_W - \mathbf{R} \mathbf{C} = \mathbf{R} \mathbf{P}_W + \mathbf{T}$$

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} & t_x \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} & t_y \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Robert Collins: CSE486, Penn State

Summary

World Coords	Camera Coords	Film Coords	Pixel Coords
U	X	x	u
V	Y	y	v
W	Z		

\rightarrow \rightarrow \rightarrow

We now know how to transform 3D world coordinate points into camera coords, and then do perspective project to get 2D points in the film plane.

Next time: pixel coordinates

Julkaisun osoite: <http://www.cse.psu.edu/~rtc12/CSE486/lecture12.pdf>

Aiheesta lisää: <http://www.cse.psu.edu/~rtc12/CSE486/lecture13.pdf>