

DRONEKUVAUKSEN HYÖDYNTÄMINEN FOTOGRAMMETRIASSA



Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö

Tieto- ja viestintäteknikka, insinööri (AMK)

Syksy, 2023

Antti Mikkonen

Tieto- ja viestintäteknikka

Tekijä Antti Mikkonen

Työn nimi Dronekuvauksen hyödyntäminen fotogrammetriassa

Ohjaaja Antti Laakso

Tiivistelmä

Vuosi 2023

Fotogrammetria on menetelmä, joka mahdollistaa kolmiulotteisen informaation saamisen kaksiulotteisista valokuvista. Tyypillisesti fotogrammetriaa on käytetty 3D-mallien luomiseksi pienistä kappaleista järjestelmäkameraa hyödyntäen. Ilmakuvauksesta voi kuitenkin olla todella paljon apua, koska valokuvattavat kohteet saattavat olla kokonsa tai sijaintinsa vuoksi perinteisellä kameralla hankalasti kuvattavissa.

Opinnäytetyössä tutkittiin kuvauskohterin käyttöä suuren mallinnuskohteen valokuvauksessa. Työn tavoitteena oli tutkia ilmakuvauksen hyötyjä fotogrammetrisessä mallinnuksessa sekä soveltaa opittua valmiin 3D-mallin toteuttamiseksi, jota voitaisiin jatkossa käyttää esimerkiksi pelimoottorissa.

Opinnäytetyön alussa käsitellään fotogrammetrian teoriaa ja rajoitteita sekä valokuvauksen perusteita. Tämän lisäksi käydään läpi ilmakuvaukseen sekä dronen lennättämiseen liittyviä rajoitteita sekä teoriaa. Soveltavassa osuudessa keskitytään varsinaisen ilmavalokuvauksen sekä valokuvien perusteella tuotettavan 3D-mallin toteuttamiseen.

Fotogrammetrian soveltaminen ilmakehän kuvaukseen hyödyntäen osoittautui tehokkaaksi ja toimivaksi keinoksi suurten kappaleiden mallintamisessa. Työn lopputuloksena syntyi korkeatasoinen 3D-malli kuvatusta kohteesta.

Avainsanat 3D-mallinnus, fotogrammetria, ilmakehän kuvaus

Sivut 24 sivua

Photogrammetry is a method that enables the extraction of three-dimensional information from two-dimensional photographs. Typically, photogrammetry has been used to create 3D models of small objects using a SLR camera. However aerial photography can be extremely beneficial, as the objects may be difficult to capture using a traditional camera due to their size or location.

The use of a camera drone for photographing a large, outdoor modeling subject was examined. The aim of the work was to investigate the advantages of aerial photography in photogrammetric modeling and to apply the acquired knowledge to create a final 3D model, which could be used, for example, in game graphics.

The beginning of the thesis covers the theory and limitations of photogrammetry, as well as the basics of photography. In addition, it discusses the limitations and other considerations related to aerial photography and drone piloting. In the applied section, the focus is on executing the actual aerial photography and the creation of a 3D model based on the captured photographs.

Applying photogrammetry through aerial photography proved to be an efficient and effective method for modeling large objects. The result of the work was a high-quality 3D model of the photographed subject.

Keywords 3D-modelling, aerial photography, photogrammetry

Pages 24 pages

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Teoria.....	2
2.1	Fotogrammetria	2
2.1.1	Kuvien päällekkäisyys	2
2.1.2	Ilmafotogrammetria	3
2.1.3	Fotogrammetrian rajoitteita	4
2.1.4	Fotogrammetrialle vaihtoehtoisia teknologioita	4
2.2	Kuvauskopteri, eli drone	6
2.2.1	Dronen hallintaohjelmisto	6
2.2.2	Dronen lennättämisen rajoitteet	7
2.3	Kuvaaminen dronella	8
2.3.1	Suljinnopeus	9
2.3.2	Aukko.....	10
2.3.3	ISO-arvo	11
2.3.4	Kameran kenno	12
2.3.5	Objektiivin polttoväli	13
3	Soveltava osuus	13
3.1	Tavoitteet	13
3.2	Valokuvaus	14
3.3	3D-mallin luominen.....	16
3.3.1	Kuvien asettelu ja rekisteröinti	17
3.3.2	Mallin laskeminen	18
3.3.3	Mallin yksinkertaistaminen	19
3.3.4	Mallin tekstuuri	20
4	Johtopäätökset ja pohdinta.....	23
	Lähteet.....	25

Kuvat

Kuva 1. Kuvien päällekkäisyys.....	3
Kuva 2. Fotogrammetrialla tuotettu maastomalli, johon on lisätty yksityiskohtia LiDAR-tekniikalla. Lisätyt yksityiskohdat korostettu vihreällä.	5
Kuva 3. DJI GS Pro sovellus.	7
Kuva 4. Valotuskolmio.	9
Kuva 5. Yleisimmin käytetyt f-arvot.....	10
Kuva 6. ISO-arvon vaikutus kuvan kohinaan.	12
Kuva 7. Sävyerot auringon ja varjon puolella.	15
Kuva 8. Valokuvien perusteella laskettu pistepilvi ja kamerasijainnit.	18
Kuva 9. Valmis 213 miljoonan polygonin korkean resoluution 3D-malli.	19
Kuva 10. Reality Capturen Simplify -työkalu.	19
Kuva 11. Normaalikartta projisoituna yksinkertaistetun mallin pinnalle.....	20
Kuva 12. Tekstuurikartta.	21
Kuva 13. UV-unwrap prosessi yksinkertaistettuna.	22
Kuva 14. Valmis 3D-malli eri kuvakulmista.....	23

Taulukot

Taulukko 1. Kuvauksessa käytetyt kameran asetukset	15
--	----

1 Johdanto

Fotogrammetria on pitkään ollut arvokas työkalu maantieteellisten tietojen keräämisessä ja analysoinnissa. Teknologian jatkuva kehitys on tuonut mukanaan uusia mahdollisuuksia taltioida ja kartoittaa ympäristöä, ja erityisesti ilmakuvausten merkitys fotogrammetrian näkökulmasta on kasvanut huomattavasti. Ilmakuvaus tarjoaa ainutlaatuisen tavan tallentaa suuria alueita tai rakennuksia korkealla tarkkuudella, tarjoten hyötyä monille eri aloille kuten kaupunkisuunnittelu, maankäytön suunnittelu, ympäristöhallinta ja arkeologinen tutkimus, sekä tietokonegrafiikka. (Take-off Professionals, n.d.)

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tarkastella fotogrammetriaa ilmakuvausten kontekstissa ja tuoda esille sen rooli nykyaikaisessa 3D-mallintamisessa. Teoriaosuudessa pyritään syventämään ymmärrystä ilmakuvauksesta ja siten tuotetun datan hyödyntämisestä fotogrammetrisissa prosesseissa. Työn soveltavassa osuudessa tutkitaan ja arvioidaan fotogrammetrian käyttöä ilmakuvauksessa kolmiulotteisen informaation saamiseksi halutusta kuvauskohteesta. Osuudessa valokuvataan suurikokoinen mallinnuskohde hyödyntäen dronea ja tuotetaan valmis 3D-malli otettujen valokuvien perusteella.

Opinnäytetyössä käydään läpi vaihe vaiheelta havaintoja ja huomioita suuren mallin luomisesta fotogrammetrian avulla sekä tarkastellaan mahdollisia haasteita, joita prosessin aikana ilmeni. Työssä ei keskitytä valmiin mallin jatkokäsittelyyn esimerkiksi peligrafiikka- tai tulostuskäyttöön. 3D-malli ainoastaan lasketaan ja renderöidään mallinnusohjelmassa.

2 Teoria

2.1 Fotogrammetria

Fotogrammetria on menetelmä, joka mahdollistaa kolmiulotteisen informaation saamisen kaksiulotteisista valokuvista. Se yhdistää valokuvaamisen, geometrian ja tietokonegrafiikan periaatteet tarkkojen mittausten suorittamiseksi ja kolmiulotteisten mallien luomiseksi. Fotogrammetria perustuu siihen, että samaa kohdetta kuvataan useasta eri kuvakulmasta. Näistä kuvista lasketaan kohteiden sijainnit ja muodot kolmiulotteiseen avaruuteen. Digitaalisella kameralla tuotettuja valokuvia voidaan käyttää yhdessä erityisen ohjelmiston kanssa, joka havaitsee kuvista päällekkäisiä kuvioita, vertailee pikselivärejä ja määrittelee ankkuripisteitä ja rakentaa valokuvatusta kohteesta pistepilven (VNTANA, n.d.)

Pistepilvi voidaan sellaisenaan tulkita 3-ulotteiseksi malliksi kappaleesta, mutta useasti pistepilvi muutetaan vielä polygoniverkoksi, koska useimmat 3D-ohjelmistot käsittelevät polygoneja. Polygonilla tarkoitetaan tietokonegrafiikassa pintaa, joka muodostuu vähintään kolmesta suoralla janalla yhdistetystä kulmasta. Polygoniverkko on kokoelma polygoneja, jotka muodostava 3D-objektin. (Dronegenuity, n.d.)

2.1.1 Kuvien päällekkäisyys

Kohdetta valokuvatessa fotogrammetriaa varten täytyy ottaa huomioon, että kuvien välillä tulee olla noin 60 % päällekkäisyyttä. Tämä havainnollistetaan kuvassa 1. Ilman päällekkäisyyttä ohjelmisto ei pysty tunnistamaan samoja pisteitä eri valokuvista, eikä se pysty sitten luomaan tarkkaa 3D-mallia. Suuremmasta päällekkäisyydestä ei ole haittaa, mutta on parasta välttää päällekkäisyyttä, joka on pienempi kuin 50–60 %. (Skechfab, 2015)

Kuva 1. Kuvien päällekkäisyys.



2.1.2 Ilmafotogrammetria

Perinteisesti ilmafotogrammetriaa on käytetty maastoalueiden topografisten karttojen tekemiseen. Aluetta kartoitettaessa kamera kiinnitettiin lentokoneeseen ja suunnattiin kohti maata pystysuunnassa ja otettiin useita päällekkäisiä valokuvia maasta. Topografiset korkeuserot määritettiin stereoplotterilla vertaamalla kahta eri valokuvaa sekä suorittamaan tarvittavat laskelmat. Stereoplotteria käytettiin laajasti vuosikymmen sitten, mutta nykyään kaikki ilmafotogrammetrian aikana otetut valokuvat käsitellään automatisoiduilla ohjelmistoilla. (Take-off Professionals, n.d.)

Nykyään kuluttajatasen kauko-ohjattavat miehittämättömät ilma-alukset, dronet, ovat suhteellisen halpoja, ottavat korkealaatuisia kuvia ja videoita, ja niiden lentämisen oppiminen on helppoa. Tämä yhdistelmä on johtanut ilmafotogrammetrian räjähdysmäiseen

kasvuun myös muilla aloilla, kuten esimerkiksi kiinteistövälityksessä ja arkkitehtuurissa. (Time, 2018)

2.1.3 Fotogrammetrian rajoitteita

Yksi fotogrammetrian suurimpia rajoittavia tekijöitä on valon määrä (Vision Aerial, 2022). Sisätiloissa kuvattaessa valon määrään on helppo vaikuttaa, mutta koska ilmakekus useimmiten tapahtuu ulkona, on vallitsevalla säätilalla suuri vaikutus ilmafotogrammetrian onnistumiseen. Kameran linssin eteen voidaan tarvittaessa lisätä ND-suodin, eli neutral density filter, jolla kameran sensoriin pääsevän valon määrää voidaan vähentää (Scandinavian Photo, 2023). Valokuvauksessa kuitenkin useimmiten helpoin tapa valon määrän vähentämiseksi on kameran suljinnopeuden kasvattaminen.

Suora auringonvalo luo myös epätasaista valaistusta kohteen ympärille aiheuttaen teräviä varjoja. Nämä varjot sekä epätasaisesti valottuneet kohteet tulevat näkymään lopullisessa 3D-mallissa, mikäli tarkoituksena on luoda mallille myös tekstuuri valokuvien perusteella. Tämän ongelman välttämiseksi on suositeltavaa suorittaa valokuvaaminen pilvisenä päivänä. (Vertex Library, n.d.)

Tasaiset heijastavat pinnat kuten lasi ja peilit ovat haastavia jälleenrakentaa useimmilla nykyisillä fotogrammetriaohjelmistoilla (Association for Computing Machinery, 2018). Pienempien objektien kanssa heijastavat pinnat ovat helposti peitettävissä, tai käsiteltävissä heijastamattomiksi, mutta suurten ilmakekuvattavien objektien kanssa tämä ei välttämättä ole mahdollista.

2.1.4 Fotogrammetrialle vaihtoehtoisia teknologioita

Laserkeilaus on tehokas tekniikka, jolla voidaan tallentaa 3D-muodossa kohteiden, pintojen ja ympäristöjen muodot ja ominaisuudet. Se käyttää laseria mittaamaan pisteen etäisyyttä ja heijastavuutta, luoden tiheän pistepilven, jota voidaan käsitellä ja analysoida erilaisiin tarkoituksiin. (LinkedIn, 2023)

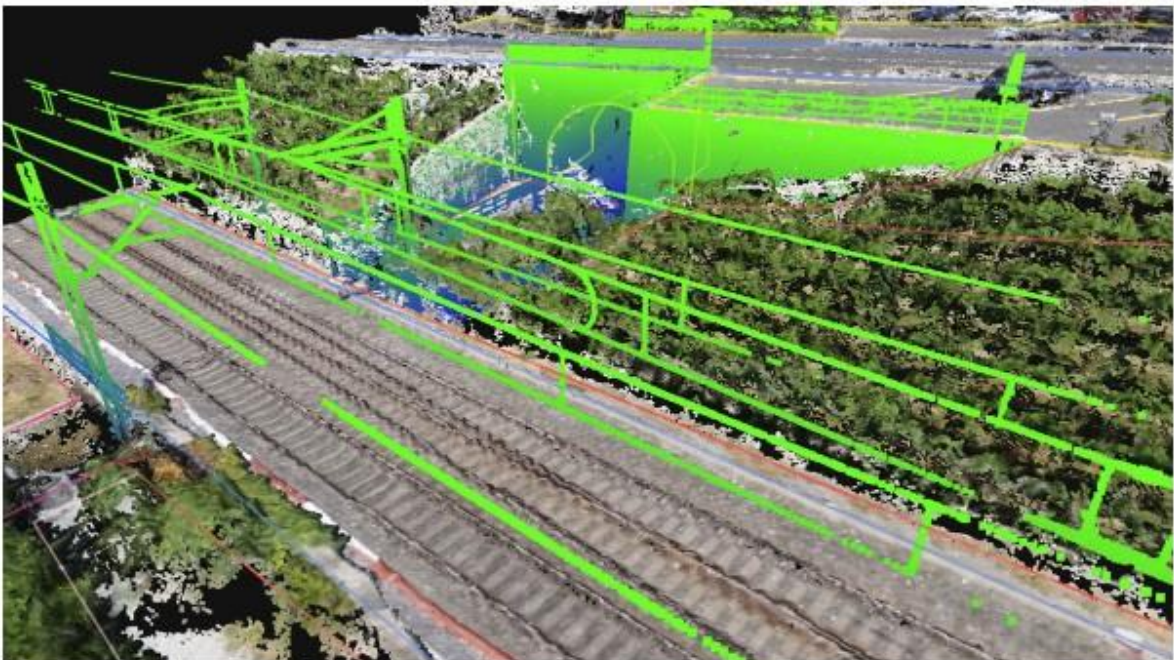
Kaksi yleistä laserkeilauksen tyyppiä ovat maanpäällinen laserkeilaus, Terrestrial Laser Scanning (TLS) ja valonheijastuksen ja etäisyyden mittauksen (LiDAR) menetelmä, jotka

eroavat keilausjärjestelmän alustassa, kantamassa ja tarkkuudessa. TLS on paikallaan oleva järjestelmä, joka skannaa tietyn alueen kiinteästä pisteestä, kun taas LiDAR on liikkuva järjestelmä, joka skannaa suuremman alueen liikkuvasta alustasta, kuten ajoneuvosta, lentokoneesta tai dronesta. (LinkedIn, 2023)

LiDAR nimilyhenne tulee sanoista light detection and ranging ja sitä käytetään etäisyyksien mittaamiseen laservalon avulla. LiDAR-tutka toimii niin, että se mittaa kohteen etäisyyden lähettämällä laservalopulssin ja rekisteröimällä ajan, joka kuluu kohteesta heijastuneen pulssin palaamiseen takaisin laitteen anturiin. (Pix4D, 2021)

Kun LiDAR ja fotogrammetriatekniikoita käytetään yhdessä, saavutetaan paljon tarkempi lopputulos, kuin kummallakaan teknologialla yksinään olisi mahdollista. Kuvassa 2 on esimerkkikuva, jossa fotogrammetrialla tuotettu maastokuvaan on lisätty LiDAR-tekniikalla yksityiskohtia, joita fotogrammetrialla on lähes mahdoton mallintaa. (Pix4D, 2021)

Kuva 2. Fotogrammetrialla tuotettu maastomalli, johon on lisätty yksityiskohtia LiDAR-tekniikalla. Lisätyt yksityiskohdat korostettu vihreällä (Pix4D, 2021).



2.2 Kuvauskooperi, eli drone

Drone on lennokki tai miehittämätön ilma-alus, joka voi liikkua ilmassa autonomisesti tai etäohjauksen avulla. Dronet voivat vaihdella kooltaan ja ominaisuuksiltaan hyvin pienistä kuluttajakäyttöön tarkoitetuista malleista aina suuriin ammattikäyttöön suunniteltuihin monimutkaisiin järjestelmiin asti. (TechTarget, 2021)

Dronet toimivat yleensä sähkömoottoreiden avulla, jotka pyörittävät potkureita tai siipiä, mahdollistaen ilma-aluksen liikkumisen ilmassa. Niitä voidaan ohjata kauko-ohjaimen avulla tai esiohjelmoida suorittamaan tiettyjä tehtäviä, kuten tietyn reitin lentämistä, valokuvien tai videoiden ottamista tietyistä näkökulmista tai tiettyjen alueiden kartoittamista. (TechTarget, 2021)

Nykyaikaiset dronet ovat usein varustettu kameroilla, joilla pystyy kuvaamaan 3840 x 2160 resoluution (4K) videoita ja ottamaan jopa 8064 x 6048 resoluution (48MP) valokuvia (Dronezon, 2020). On kuitenkin tärkeä ymmärtää, että vaikka pikselimäärä asettaa rajan sille, kuinka yksityiskohtainen valokuva voi olla, se ei kuitenkaan määritä vähimmäistasoa yksityiskohdille (Expert Photography, 2023). Valokuvaamisesta tarkemmin kappaleessa 2.3.

Kamera on usein kiinnitetty droneen gimbalin, eli kuvausvakaimen avulla. Gimbal on laite, joka on suunniteltu pitämään kamera tai muu laite vakaana ja tasapainossa erilaisissa liikkuvissa tilanteissa. Se koostuu yleensä useista moottoreista ja antureista, jotka toimivat yhdessä pitämään laitteen asennon vakiona, vaikka käyttäjä tai alusta liikkuisivat. (Filmmaking Lifestyle, n.d.)

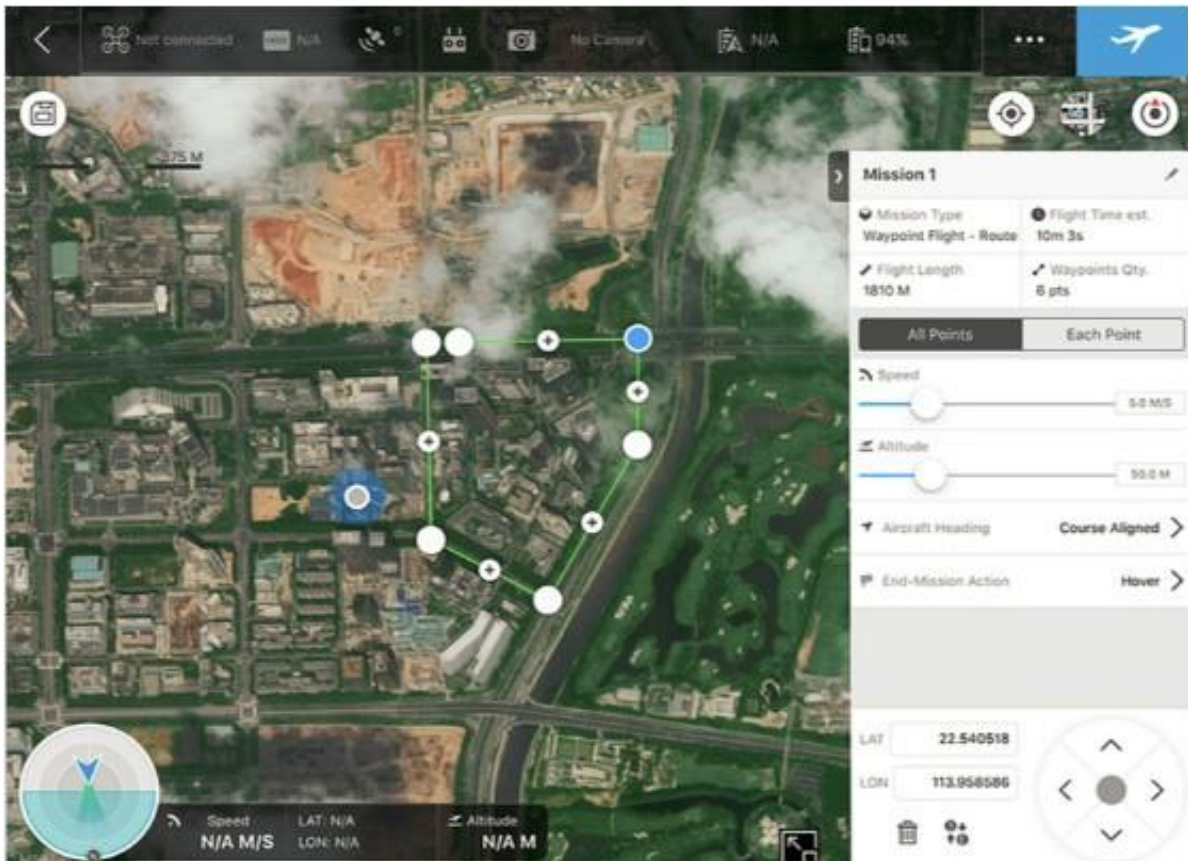
2.2.1 Dronen hallintaohjelmisto

Useimmin dronen mukana tulee ohjain, joka yhdessä älylaitteelle ladattavan ohjelmiston kanssa muodostavat kokonaisuuden, jolla voi hallita kameraa, kuvausvakainta, dronen ohjaamista sekä suunnitella valmiiksi lentoreittejä, joita drone seuraa GPS:n avulla. (Droneblog, 2023)

Ohjelmistolla etukäteen luotu lentoreitti helpottaa kohteen taltiointia kuvaustilanteessa. Lentoreitin lisäksi dronelle voi kertoa mistä kuvakulmista kohdetta tulisi kuvata ja kuinka

useasti, jolloin esimerkiksi fotogrammetrian keinoin luotavan 3D-mallin tarvitsema kuvapeitto on helppo suunnitella etukäteen sen sijaan, että kuvia otettaisiin silmämääräisesti. Kuvassa 3 on DJI:n GS Pro sovelluksella luotu lentoreitti.

Kuva 3. DJI GS Pro sovellus (Dji, n.d.).



2.2.2 Dronen lennättämisen rajoitteet

Dronejen valmistajat asettavat valmiiksi ohjaussovelluksiin aluerajoituksia, joille dronea ei voi lennättää. Nämä ennalta asetetut rajoitukset eivät kuitenkaan aina ole ajan tasalla, eivätkä välttämättä estä kielletyssä ilmatilassa lennättämistä. Dronen lennättäjän onkin aina varmistettava voimassa olevat rajoitukset ja kiellot ennen toiminnan aloittamista. Virallinen ja voimassa oleva tieto alueellisista rajoituksista ja kielloista löytyy kansallisista säädöksistä, määräyksistä ja päätöksistä, sekä Ilmailutiedotuspalvelusta. (Droneinfo, 2022)

Pysyvien kielto- ja rajoitusalueiden lisäksi voidaan perustaa myös väliaikaisia kielto- ja rajoitusalueita, jotka myös on oltava tiedossa ennen dronella operointia. Yleensä tilapäisiä kielto- ja rajoitusalueita perustetaan puolustusvoimien harjoitustoiminnan tai esimerkiksi

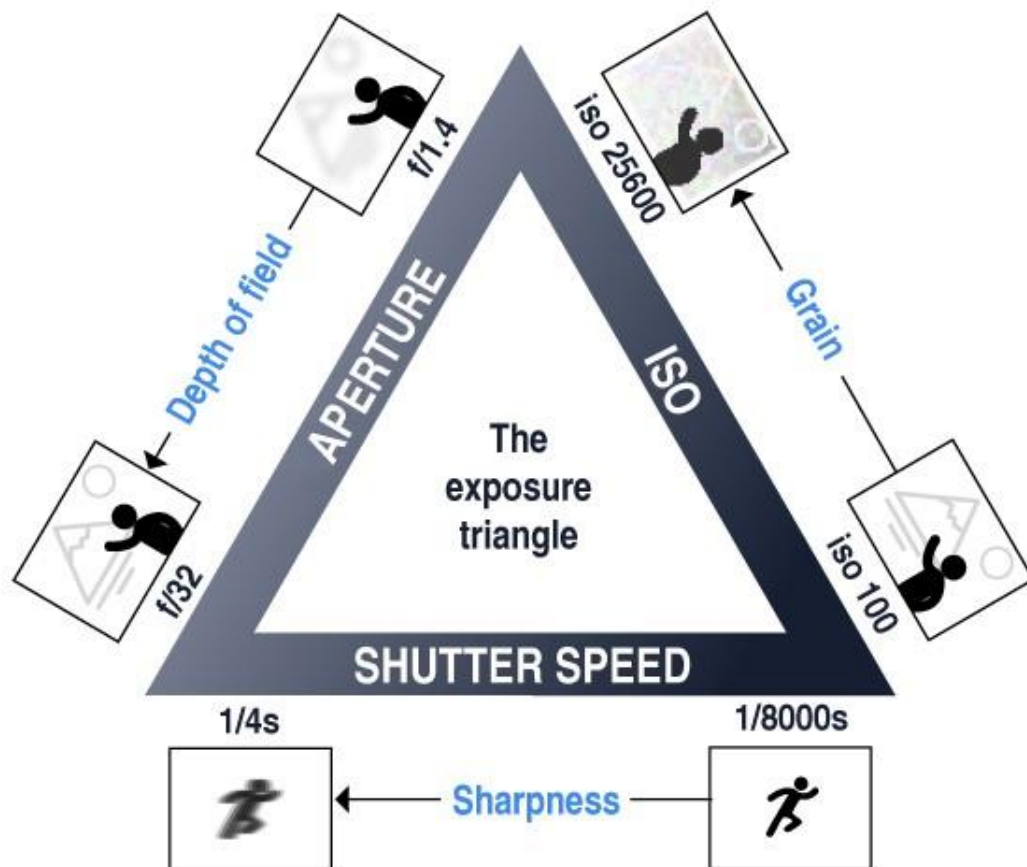
suurten yleisötapahtumien suojaamiseksi. Tilapäisistä ilmatilan rajoituksista julkaistaan tieto Ilmailukäsikirjan lisäyksenä (AIP Supplement), joka löytyy Fintraffic ANS:n ilmailutiedotuspalvelun sivustolta ais.fi. Viranomaisen ylläpitämän virallisen tiedotuskanavan lisäksi pysyvät ja tilapäiset aluerajoitukset näkyvät myös ilmatilan käytöstä kertovalla Aviamaps-sivustolla. (Droneinfo, 2022)

Uusi droneasetus yhtenäisti droneja koskevat säädökset koko EU:n alueella. Suomalaisille dronejen käyttäjille uudistus toi velvollisuuden rekisteröityä dronetoimijarekisteriin, aikaisemmin ilmoitusvelvollisuus on koskenut vain ammattilaisia. Rekisteröinnin ulkopuolelle jäävät vain ne dronejen käyttäjät, jotka lennättävät alle 250 g painavia kamerattomia tai leluiksi määriteltyjä droneja. Kaikki kamerallisia droneja lennättävät dronejen käyttäjät kuuluvat siis rekisteröinnin piiriin. (Droneinfo, 2022)

2.3 Kuvaaminen dronella

Valokuvaaminen dronella poikkeaa kuvaamisesta järjestelmäkameralla kuvausperspektiivin lisäksi useasti myös kameran fyysisten ominaisuuksien osalta. Dronejen kamerat ovat harvoin varusteltu mekaanisilla himmentimillä tai sulkimilla, eikä niiden objektiivit usein ole vaihdettavia. Fyysisistä ominaisuuksista huolimatta kuvaaminen dronella noudattaa samoja valokuvauksen lainalaisuuksia kuin kuvaaminen millä tahansa muulla kameralla. Valon hallinta on olennaista ja laadukas valokuva edellyttää valotuskolmion, kuvassa 4, arvojen tasapainottamista. (Veprit, 2016)

Kuva 4. Valotuskolmio (O'Hara, 2021).



2.3.1 Suljinnopeus

Mitä nopeampi suljinnopeus, sitä suurempi mahdollisuus saada terävä kuva. Hitaalla suljinnopeudella, kuvat voivat olla epätarkkoja johtuen dronen liikkeestä kuvanottohetkellä. Suljinnopeuden avulla hallitaan myös valon määrää, joka pääsee kameraan. Erityisen hyödyllistä tietää, jos kuvataan kirkkaissa ja aurinkoisissa olosuhteissa eikä dronessa ole säädettävää aukkoa. (DronesDirect, n.d.)

Perinteisen järjestelmäkameran voi asettaa jalustalle, kameran liikkeen välttämiseksi ja valokuvan pitämiseksi terävänä, jos on tarvetta erittäin hitaille suljinnopeuksille. Ilmakuvauksessa dronella tämä ei ole mahdollista, joten suljinnopeuden on oltava tarpeeksi nopea, jotta kuvat pysyvät terävinä. Varsinkin fotogrammetrian kontekstissa kuvien terävyys on erittäin tärkeää, koska mallinnohjelma, jolla 3D-malli luodaan valokuvien pohjalta, ei välttämättä tunnista samoja pisteitä kahden epätarkan kuvan välillä.

Useimmiten droneissa käytössä olevissa kameroissa ei ole mekaanista suljinta, kuten perinteisissä järjestelmäkameroissa, vaan niissä käytetään elektronista suljinta.

Elektronisessa sulkijassa ei ole liikkuvia osia, vaan sulkimen toiminta hoidetaan elektronisesti kytkemällä päälle ja pois päältä digitaalisen kennon pikseleitä. (Rieck, 2023)

2.3.2 Aukko

Aukon avulla säädetään kuinka paljon valoa kameran objektiivi päästää sisään. Useimmissa droneissa on kiinteä aukko, mutta markkinoille on jo tullut laitteita, joissa on säädettävä aukko, joten on hyödyllistä ymmärtää millä aukon asetuksella kuvata. Aukko mitataan f-lukuna, esimerkiksi F/2.8, ja mitä pienempi luku, sitä enemmän objektiivi päästää valoa sisään. (DronesDirect, n.d.)

F-luvulla tarkoitetaan objektiivin polttovälin ja aukon halkaisijan välistä suhdetta.

Esimerkiksi, jos objektiivin polttoväli on 50 mm ja sen linssin halkaisija 10 mm, niin f-luvuksi saadaan $50 \text{ mm} / 10 \text{ mm} = 5$, eli F/5. Säädettävääukkoisissa kameroissa f-arvot merkataan usein kuvan 5 mukaisilla arvoilla. Yhden f-arvon nousu, esimerkiksi f/2,8 – f/4, puolittaa kennolle pääsevän valon määrän. (Wired, 2012)

Kuva 5. Yleisimmin käytetyt f-arvot (Wired, 2012).



Useimmat dronet ovat varustettu F/4 ja F/5.6 aukoilla, jotka soveltuvat hyvin kuvaamiseen normaaliolosuhteissa. Pimeällä tai kirkkaassa auringonvalossa kuvatessa kiinteäaukkoisella linssillä täytyy ottaa huomioon kuvan mahdollinen yli- tai alivalottuminen. (DronesDirect, n.d.)

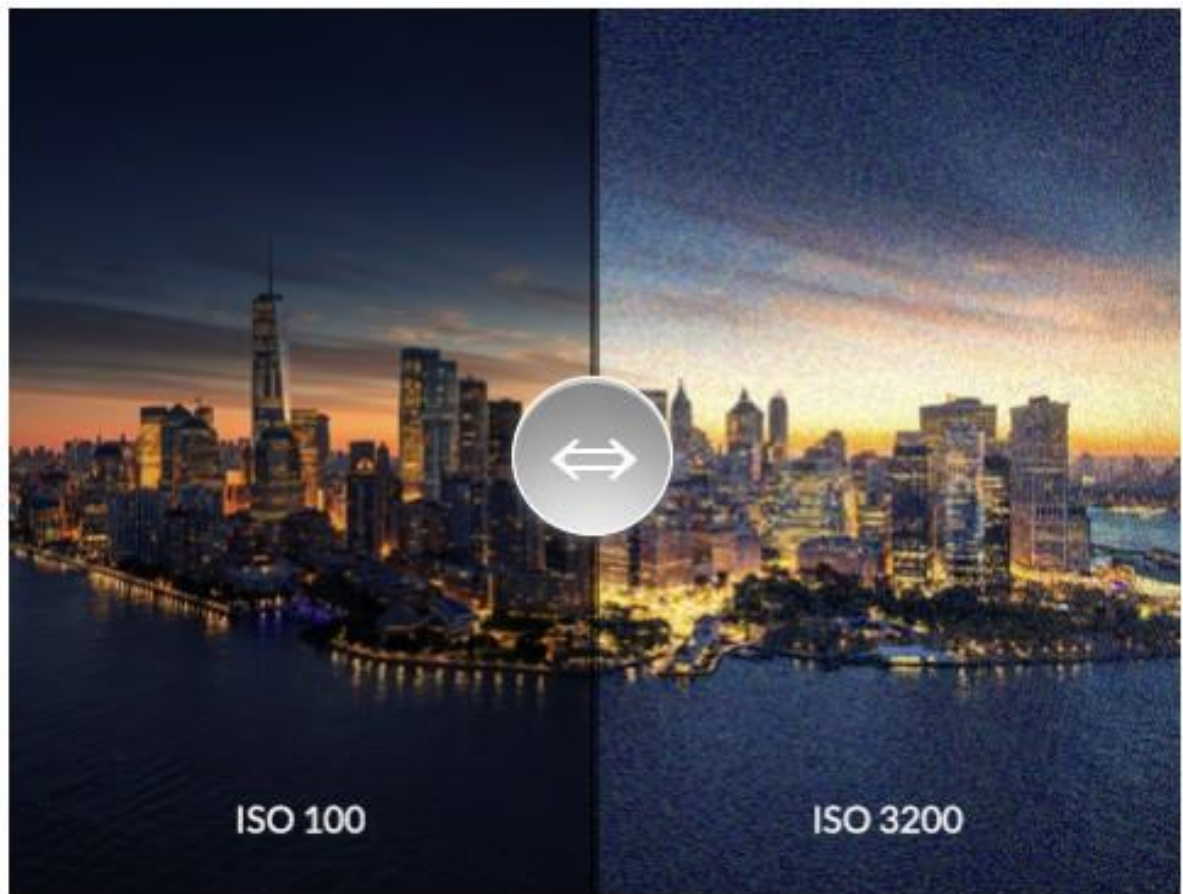
Valon määrän lisäksi aukko vaikuttaa myös kuvan syväterävyyteen, eli siihen mitkä alueet kuvassa ovat tarkkoja. Mahdollisimman suurella aukolla, eli pienellä F-arvolla kuvatessa vain tarkennettu kohde pysyy terävänä ja kaikki muu on sumeaa. Kun aukkoa pienennetään terävyysalue vastaavasti kasvaa. (PhotoPills, n.d.)

2.3.3 ISO-arvo

ISO-asetus määrittää, kuinka herkkä kamera on valolle. Yksinkertaisesti sanottuna, mitä korkeampi ISO-asetus, sitä kirkkaampi kuva. Kuitenkin mitä korkeampi ISO-asetus, sitä enemmän kohinaa ja säröä kuvassa esiintyy. Parhaan mahdollisen kuvanlaadun saavuttamiseksi dronen ISO-asetus pyritään pitämään mahdollisimman alhaisena. (DronesDirect, n.d.)

Jokaisen dronen maksimaalinen käyttökelpoinen ISO vaihtelee, joten testaamalla on selvitettävä, kuinka korkealle ISO-arvo voi nousta kuvan pysyessä käyttökelpoisena. Esimerkiksi drone saattaa tukea ISO-arvoja 100–3200, mutta kuva muuttuu liian kohinaiseksi, jos arvo ylittää 800, saati sitten aina 3200 asti. (DronesDirect, n.d.) Kuvassa 6 on havainnollistettu ISO-arvon vaikutusta kuvan kohinaan.

Kuva 6. ISO-arvon vaikutus kuvan kohinaan (DronesDirect, n.d.).



Nykyään kehittyneemmillä kuvankäsittelyohjelmilla voi poistaa kohinaa RAW-kuvista tekoälyn avulla erittäin tehokkaasti, mutta se saattaa vaikuttaa kuvien yksityiskohtiin (Adobe, 2023). Koska yksityiskohdat ovat fotogrammetriassa tärkeitä, on parempi käyttää kuvatessa matalaa ISO-arvoa.

2.3.4 Kameran kenno

Useissa, varsinkin pienempikokoisissa droneissa kameran kenno on huomattavasti pienempi kuin järjestelmäkameroissa. Esimerkiksi DJI Mini 3 Pro dronessa kenno on vain 10 mm x 7,5 mm kokoinen, kun niin sanotussa täysikennoisessa järjestelmäkamerassa kennon koko on 36 mm x 24 mm. Kennon koko vaikuttaa syväterävyyteen, kykyyn vastaanottaa valoa, ISO-suorituskykyyn sekä dynaamiseen alueeseen. (Capture the atlas, n.d.)

Pienen kennon takia dronella voi kohtalaisen suuresta aukosta huolimatta kuvata erittäin suurella syväterävyysalueella. Esimerkiksi juuri DJI Mini 3 Pro dronella kiinteästä F/1.7 aukosta huolimatta syvyysterävyysalue on noin 1 metristä äärettömään. (DJI, n.d.)

2.3.5 Objektiivin polttoväli

Tyypillisesti droneissa on käytetty noin 24 mm – 35 mm kiinteän polttovälin objektiiveja. Markkinoille on kuitenkin jo tullut zoom-objektiiveilla varustettuja droneja, tosin kuluttajahintaisissa tuotteissa ne ovat vielä harvinaisia. (Cult of Drone, n.d.)

Historiallisista syistä objektiivien polttovälit ilmoitetaan yleensä 35 mm kinovastaavina, eli mikä polttoväli olisi, jos sitä verrattaisiin vanhaan 35 mm filmikameraan, tai täyden kennon järjestelmäkameraan. Kaikissa digitaalisissa kameroissa ei kuitenkaan ole saman kokoista kennoa, joten on hyvä tietää, kuinka objektiivin todellinen polttoväli lasketaan. (Adorama, 2022)

Objektiivin todellisen polttovälin voi laskea jakamalla 35 mm kinovastaavan polttovälin kennon polttovälikertoimella, eli crop factorilla. Jos kennon polttovälikerroin ei ole tiedossa, sen voi laskea jakamalla 35 mm kennon lävistäjän oman kameran kennon lävistäjällä. 35 mm kennon mitat ovat 36 mm x 24 mm, joten lävistäjäksi saadaan Pythagoraan lauseen avulla 43,27 mm. Dronen sensori voisi olla esimerkiksi 10 mm x 7,5 mm, jolloin lävistäjäksi saadaan 12,5 mm. Polttovälikertoimeksi saadaan näin ollen $43,27 \text{ mm} / 12,5 \text{ mm} \approx 3,5$. Jos dronessa on 28 mm kinovastaava polttoväli, on todellinen polttoväli näin ollen $28 \text{ mm} / 3,5 = 8 \text{ mm}$ (Adorama, 2022)

3 Soveltava osuus

3.1 Tavoitteet

Työn soveltavan osuuden tavoitteena oli hyödyntää drone-kuvauksen ja fotogrammetrian yhdistelmää suuren rakennuksen tarkkaan dokumentointiin ja 3D-mallintamiseen. Valokuviiin pyrittiin saamaan korkea tarkkuustaso, jotta saataisiin riittävän yksityiskohtaiset lähtökohdat

3D-mallin luomiseksi. Tavoitteena oli kuvata kohdetta mahdollisimman kattavasti kaikista kuvakulmista, jotta saataisiin kattava tieto kohteen rakenteista ja arkkitehtuurista.

Valokuvaamisen jälkeen tavoitteena oli luoda 3D-mallinnusohjelmistossa fotogrammetriaa hyödyntäen tarkka 3D-malli valokuvien perusteella. Tämä vaati ohjelmistolta tarkkaa kuvien kalibrointia, pistepilvien tiivistämistä sekä pinnan rekonstruktioita ja teksturointia. Tarkoitus oli luoda mahdollisimman realistinen 3D-malli, jota voisi tulevaisuudessa hyödyntää esimerkiksi pelimoottorissa.

Tavoitteiden toteutumisen tarkastelulle ei ole olemassa yksiselitteistä mittaria. Työvaiheiden edetessä onnistumista arvioitiin lähinnä subjektiivisesti silmämääräisesti.

3.2 Valokuvaus

Soveltava osuus aloitettiin kuvattavan kohteen valinnalla. Tavoitteena oli löytää kohde, jonka mallintamisessa ilmakuvauksesta olisi selkeä hyöty, esimerkiksi kohteen koon, tai kohdetta ympäröivän maaston takia. Lopulta kohteeksi valittiin keskiaikainen rauniolinna Raaseporissa. Linna on sen verran kookas, että sen kuvaaminen fotogrammetriaa varten ilman dronea olisi erittäin työlästä. Linnassa ei myöskään ole ikkunoita, eikä juuri muitakaan heijastavia pintoja, jotka saattaisivat aiheuttaa hankaluuksia 3D mallinnusvaiheessa. Ainoa jokseenkin kiiltävä pinta oli linnan peltinen katto, mutta sekin oli kohtalaisen mattapintainen, eikä aiheuttanut juurikaan ongelmia. Rauniomuseota ylläpitävän tahon kanssa sovittiin, että kuvaukset suoritetaan museon aukioloaikojen ulkopuolella, jotta aiheutuisi mahdollisimman vähän häiriötä.

Kuvauspäivänä oli valitettavasti täysin pilvetön, erittäin kirkas sää. Tästä syystä kuvista huomaa selkeästi sävyeron auringon valaisemien ja varjon puolella olevien seinien välillä, kuten kuvassa 7 näkyy. Pilvinen keli olisi ollut parempi kuvaussää, jolloin sävyeroja ei olisi juurikaan tullut.

Kuva 7. Sävyerot auringon ja varjon puolella.



Kuvauskohteriksi valittiin DJI Mini 3 Pro drone ominaisuuksien sekä hinnan takia. Drone sopii myös kevyen, alle 250 g painonsa takia helposti mukana kuljetettavaksi. Taulukossa 1 on linnan kuvaamisessa käytetyt kameran asetukset.

Taulukko 1. Kuvauksessa käytetyt kameran asetukset

Resoluutio	4032 x 3024 (12 megapiksiä)
Suljinnopeus	1/1250sec
Aukko	f/1.7
ISO-arvo	ISO-100
Formaatti	JPEG
Valkotasapaino	AUTO

Dronen kameran maksimi valokuvaresoluutio on 48 megapiksiä, mutta kuvauksissa päätettiin kuitenkin käyttää pienempää 12 megapikselin resoluutiota, koska sen uskottiin olevan riittävä haluttuun lopputulokseen. Resoluutiolla on myös suuri vaikutus 3D-mallin

laskemiseen kuluvaan aikaan. ISO-arvoksi haluttiin mahdollisimman pieni arvo, jotta kuviin tulisi mahdollisimman vähän kohinaa. Aukko on kiinteä, joten siihen ei voitu vaikuttaa. Aukon ja ISO-arvon jälkeen valittiin suljinnopeudeksi mahdollisimman nopea arvo, jotta välttyttäisiin dronen liikkeen aiheuttamilta epätarkoilta kivilta. Valkotasapaino jätettiin automaatille, koska sävyerot auringon ja varjon puolella olivat niin suuret.

Mini 3 Pro dronelle ei kuvaushetkellä ollut vielä saatavilla ohjelmistoa, jolla lentoreitin olisi voinut suunnitella ennakkoon, joten lentäminen ja kuvaaminen tapahtui ns. käsivaralta. Kohteen ympärillä ei ollut muutaman puun lisäksi juurikaan lentämistä haittaavia esteitä, joten käsivaralta lentäminen ja kuvaaminen onnistui ilman ongelmia.

Dronella lennettiin useita kertoja linnan ympäri, eri korkeuksilla, muutaman sekunnin välein kuvia ottaen. Kuvauksessa keskityttiin lähinnä linnan ulkokuoren tallentamiseen. Sisäpiha taltioitiin yläpuolelta kuvaamalla, mutta dronella ei laskeuduttu muurien sisäpuolelle, joten linnan sisäpuolen pinnoista ei saatu kuvamateriaalia. Tämä tulee vaikuttamaan lopullisen 3D-mallin geometriaan linnan sisäpihan osalta. Kuvauskopterin akkujen loputtua kasassa oli yhteensä 492 kappaletta eri kuvakulmista ja korkeuksilta otettua kuvaa.

3.3 3D-mallin luominen

Valokuvien perusteella laskettavaa 3D-mallia varten tarvitaan tarkoitukseen soveltuva ohjelma. Ohjelmistoa on saatavilla useilta eri valmistajilta, mutta lopullinen toimintaidea on useimmiten sama. Tässä harjoituksessa ohjelmaksi valittiin Epic Games nimisen yrityksen julkaiseman Reality Capture.

Reality Capturea voidaan käyttää luomaan yksityiskohtaisia, tarkkoja esityksiä rakennuksista, maisemista, arkeologisista kohteista ja muista fyysisistä ympäristöistä fotogrammetrian keinoin kuvien tai laserskannausten pohjalta. Reality Capturea voi käyttää täysin ilmaiseksi, pelkästään valmiin mallin tuominen ulos ohjelmasta maksaa. (Epic Games, 2023 -b)

RealityCapture vaatii kaikkien toimintojen käyttämiseksi NVIDIA-näytönohjainta, koska se käyttää joissain keskeisissä laskentatehtävissään CUDA-teknologiaa. Ilman CUDA-piirillä varustettua näytönohjainta RealityCapturella voi suorittaa perustoimenpiteitä, kuten kuvien

rekisteröintiä, mutta verkkopintaa tai 3D-mallia ei ole mahdollista luoda. (Epic Games, 2023 - b)

CUDA (Compute Unified Device Architecture) on NVIDIA:n kehittämä ohjelmointirajapinta, joka mahdollistaa tehokkaan laskennan suorittamisen NVIDIA:n grafiikkaprosessoreilla (GPU). Perinteisesti GPU:t on suunniteltu käsittelemään graafisia tehtäviä, kuten peligrafiikkaa ja visuaalisia efektejä, mutta CUDA mahdollistaa GPU:iden hyödyntämisen myös yleislaskentaan. (nVidia, 2012)

Reality Capturesta löytyy perustyökalut esimerkiksi mallinnettavan alueen rajaamiseen, kappaleen asennon muuttamiseen, ylimääräisten kappaleiden pois suodattamiseen, kappaleen reunojen siistimiseen sekä mahdollisten puuttuvien pintojen täyttämiseen (Epic Games, 2023 -b). Jos valmiille mallille on tarkoitus tehdä isompaa editointia, kannattaa se tehdä jossain muussa tarkoitukseen sopivassa ohjelmassa.

Tämän opinnäytetyön puitteissa ei ollut tarvetta mallin jatkokäsittelylle, joten Reality Capturen ominaisuudet riittivät hyvin.

3.3.1 Kuvien asettelu ja rekisteröinti

3D-mallin rakentaminen Reality Capture -ohjelmassa aloitetaan valitsemalla halutut kuvat, joiden perusteella ohjelma laskee kameran sijainnit, suunnat ja kameran sisäiset tilat, kuten kameran zoomauksen, jokaiselle syötetyille kuvalle (Epic Games, 2023 -b). Kuvien määrästä ja laadusta riippuen asettelu- ja rekisteröintivaihe vie aikaa muutamasta minuutista jopa tunteihin. Käytössä olleelta tehokkaalta kotikoneelta tähän meni noin 2 minuuttia. Syötetyistä 492 kuvasta ohjelma pystyi hyödyntämään 489, mikä on erittäin hyvä tulos. Kuvien asettelun ja rekisteröinnin lopputuloksena syntyy kuvassa 8 nähtävä pistepilvi. Pistepilvestä on selkeästi havaittavissa linnan muodot, vaikka se muodostuu pelkästään pisteistä ilman mitään pintaa. Kuvassa näkyy myös kaikkien 489 käytetyn kuvan kameran sijainti.

Kuva 8. Valokuvien perusteella laskettu pistepilvi ja kamerasijainnit.

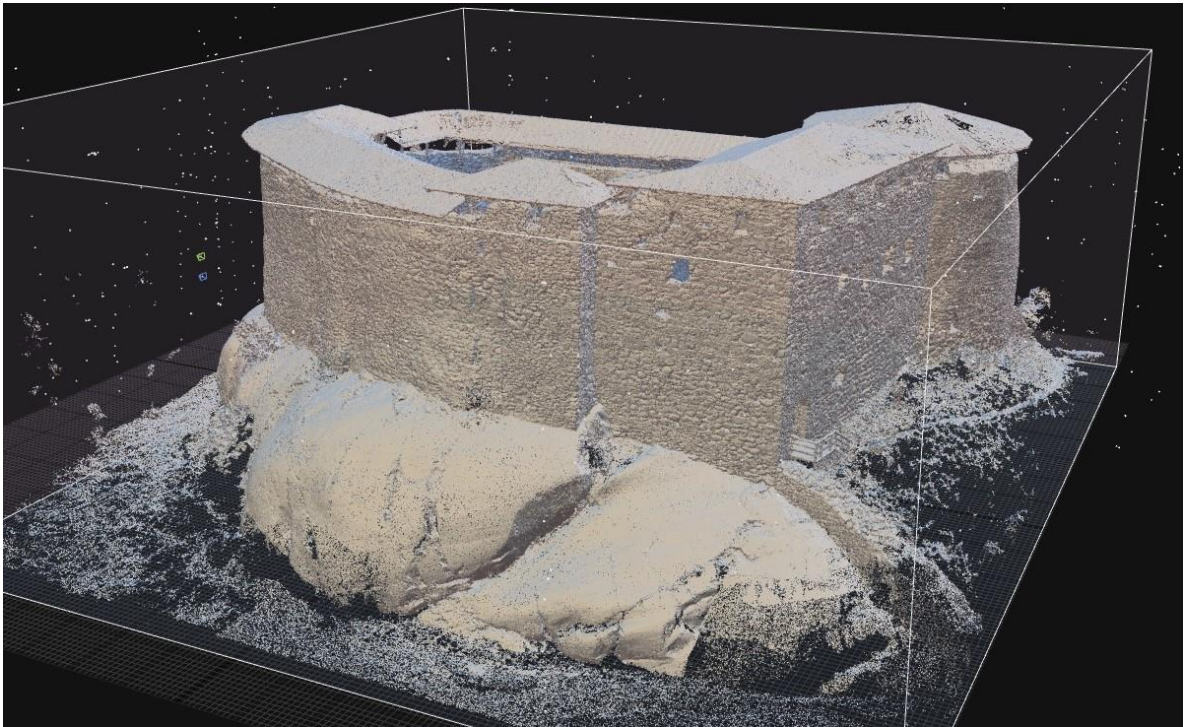


3.3.2 Mallin laskeminen

Kun pistepilvi on muodostettu, on seuraavaksi muodossa varsinaisen mallin laskeminen. Tässä vaiheessa aluetta voi vielä rajata ja siitä voi suodattaa pois ylimääräisiä kohteita, jotta laskentatehoa ei käytetä muuhun kuin varsinaiseen kohteeseen. Mallin laskeminen on koko prosessin aikaa vievin vaihe ja saattaa kestää kymmenistä minuuteista useisiin tunteihin riippuen muun muassa valokuvien määrästä ja laadusta sekä renderöintiasetuksista. Kuvassa 9 on lopputuloksena syntynyt erittäin tiheä kolmioverkko. Malli muodostuu 213 miljoonasta kolmiosta.

Aiemmin Reality Capture pystyi esittämään pintoja vain malleille, joissa on maksimissaan 40 miljoonaa kolmiota, mutta uudemmissa versioissa tämä rajoitus on poistunut ja näytettävien kolmioiden määrä on enää kiinni käytettävän tietokoneen tehosta (Epic Games, 2023 -a). Mallin yksinkertaistaminen on kuitenkin suositeltavaa ennen sen viemistä esimerkiksi pelimoottoriin.

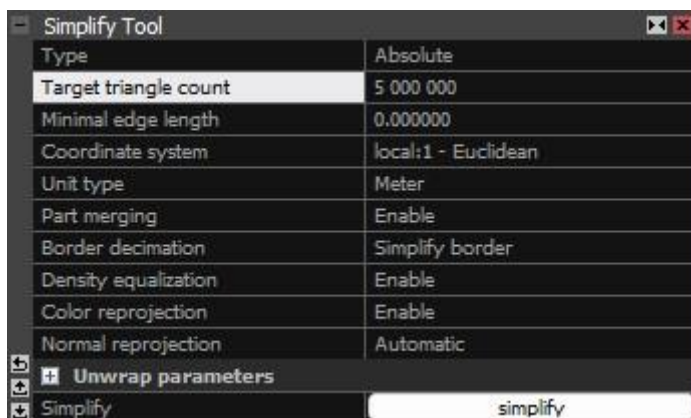
Kuva 9. Valmis 213 miljoonan polygonin korkean resoluution 3D-malli ilman tekstuuria.



3.3.3 Mallin yksinkertaistaminen

Koska työskentely 213 miljoonan polygonin 3D-mallin kanssa osoittautui hitaaksi, päätettiin mallista tehdä teksturointia varten yksinkertaistettu 5 miljoonan polygonin versio. Reality Capturessa niin sanottu low polygon versio valmiista mallista tehdään Simplify työkalun avulla, kuva 10. Työkalulle annetaan parametreina yksinkertaistetun mallin haluttu kolmiomäärä.

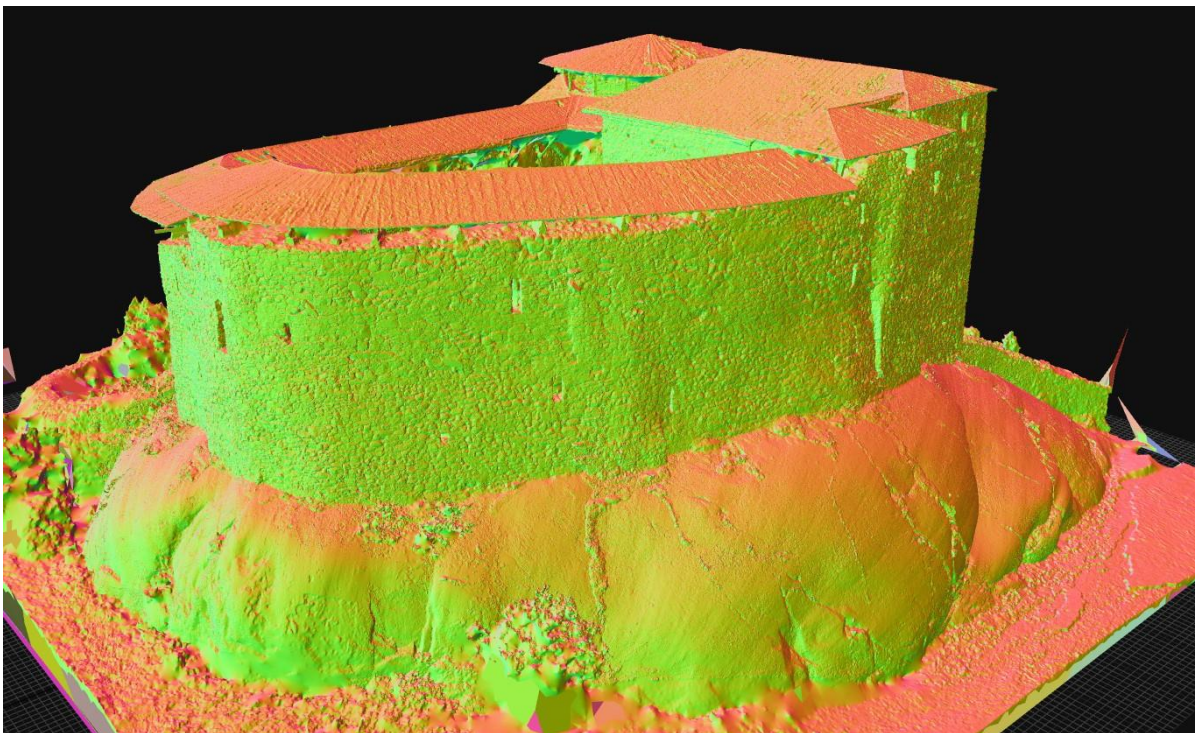
Kuva 10. Reality Capturen Simplify -työkalu.



Mallia yksinkertaistettaessa siitä luonnollisesti häviää yksityiskohtia. Simplify-työkalussa on valittavissa Normal reprojection asetus käyttöön, jolloin yksinkertaistetulle kappaleelle lasketaan automaattisesti normaalikartta, jolla malli saadaan näyttämään edelleen yhtä yksityiskohtaiselta. (Epic Games, 2023 -a)

Normaalikartta (normal map) on RGB tekstuuri, jolla luodaan illuusio syvyyseroista mallin pinnalla. Normaalikartta ei siis luo lisää geometriaa mallin pinnalle, vaan pikseleiden värityksellä ilmaistaan eroavaisuus muusta pinnasta. (Pluralsight, 2022) Kuvassa 11 Simplify-työkalulla tehty 5 miljoonan polygonin yksinkertaistettu malli normaalikartan kanssa.

Kuva 11. Normaalikartta projisoituna yksinkertaistetun mallin pinnalle.



3.3.4 Mallin tekstuuri

3D-mallin yksinkertaistamisen jälkeen, sille luotiin pintamateriaali, tekstuuri. Reality Capture käyttää valokuvista saatavaa väri-informaatiota tekstuurikartan muodostamiseen.

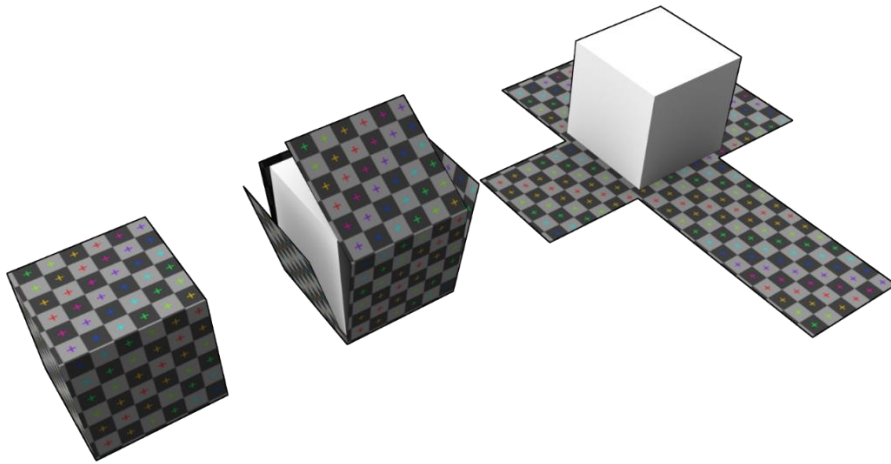
Tekstuurikartta on tavallinen kuvatiedosto, johon on koottu kaikki teksturoitavan mallin pinnoille tulevat tekstuurit. Kuvassa 12 Reality Capturen tuottama 8192x8192 pikselin kokoinen tekstuurikartta linnan tekstuureista.

Kuva 12. Tekstuurikartta.



Kun 3D-malli luodaan, lasketaan sille automaattisesti UV-koordinaatit. UV-koordinaattien avulla kappaleelle voidaan toteuttaa UV-unwrap prosessi, jossa UV-koordinaattien perusteella 3D-kappaleesta tehdään 2-ulotteinen ilmentymä, UV-kartta (G2, 2022). Kuvassa 13 on yksinkertainen esimerkki UV-unwrap prosessista ja sen perusteella syntyvästä UV-kartasta. Tekstuurit sijoitetaan 3D-mallin oikeisiin kohtiin UV-kartan avulla (G2, 2022).

Kuva 13. UV-unwrap prosessi yksinkertaistettuna (UV Mapping, 2023).



Tekstuurikartat luodaan täysin käytettyjen valokuvien pohjalta, joten valokuvaushetkellä vallinneen auringonpaisteen huomaa myös lopullisesta tekstuurista. Kuvassa 14 nähtävissä valmis 3D-malli tekstuurien kanssa. Osa seinistä on selkeästi kirkkaampia kuin toiset. Jos mallia olisi tarkoitus käyttää esimerkiksi pelimoottorissa, jossa on valonlähteitä, saattaisi seinien sävyerot olla haitaksi.

Kuva 14. Valmis 3D-malli eri kuvakulmista.



Tekstuurin sävyerot voi tässäkin vaiheessa vielä korjata kuvankäsittelyohjelmassa. Tekstuurikartasta täytyy vain löytää haluamansa kohteet ja muuttaa niiden kohdalta haluttuja arvoja, kuten esimerkiksi kirkkautta tai kontrastia. Vaihtoehtoisesti valmiin mallin voi ladata esimerkiksi Adoben Substance Painter ohjelmaan, jossa tekstuureja voi jälkikäsitellä. Koska ilman maksullista export-toimintoa Reality Capturesta ei saa valmista 3D-mallia, tai edes materiaalikarttaa ulos, jätettiin tämä vaihe väliin.

4 Johtopäätökset ja pohdinta

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia ilmakuvauksen tuomia hyötyjä kuvattaessa suurta kohdetta 3D-mallintamista varten. Kuvattavana kohteena oli rakennus, joka olisi ollut hankalasti kuvattavissa perinteisin menetelmin maanpinnalta käsin. Ilman dronea olisi ollut äärimmäisen vaikeaa saada kattavia ja tarkkoja kuvia rakennuksen yläosista ja vaikeapääsyisistä kulmista. Ilmakuvauksella pystyttiin kuitenkin ottamaan laaja joukko valokuvia eri kulmista ja korkeuksista, jotka olivat olennaisia tarkan 3D-mallin luomisessa.

Dronella on kuitenkin haastava päästä todella lähelle kohdetta kuvaamaan tarkempia yksityiskohtia, joten parhaan mahdollisen lopputuloksen varmasti saisi yhdistämällä ilmakuviin tavallisella järjestelmäkameralla kuvattuja valokuvia kohteen niistä osista, joista se on mahdollista. Tulevaisuudessa LiDAR-tekniikan yleistyessä droneissa, malleista saa varmasti paljon yksityiskohtaisempia. Tällaisenaankin lopullisen mallin tarkkuus kuitenkin riittäisi helposti käytettäväksi esimerkiksi peligrafiikassa.

Dronen kanssa toimiessa tulee myös varmistaa voimassa olevat ilmailurajoitukset, jotka saattavat kieltää lentämisen halutulla alueella. Tämä saattaa helposti unohtua tavallisen kädessä pidettävän kameran kanssa kuvaamaan tottuneelta, mutta on äärimmäisen tärkeää noudattaa ilmatilarajoja ja muita droneja koskevia määräyksiä, jotta ei aiheuta vaaraa toiminta-alueella muille ihmisille tai ilma-aluksille.

Tutkimusta tehdessä huomattiin, että perinteistä painettua kirjallisuutta aiheesta on hankalaa löytää, mutta onneksi internet oli pullollaan aiheeseen liittyvää tietoa. Aiheesta opittiin todella paljon myös itse kokeilemalla, yrityksen ja erehdyksen kautta. Harjoitus vahvisti omaa osaamistani fotogrammetriasta ja aion käyttää oppeja hyödyksi jatkossakin omissa harrastuksissa.

Lähteet

Adobe. (18.4.2023). *Improve image quality using Camera Raw*.

<https://helpx.adobe.com/camera-raw/using/enhance.html>

Adorama. (3.10.2022). *What Is Crop Factor And How Do You Calculate It?*

<https://www.adorama.com/alc/what-is-crop-factor-everything-you-need-to-know>

ACMachinery. (30.7.2018). *Reconstructing scenes with mirror and glass surfaces*.

<https://dl.acm.org/doi/10.1145/3197517.3201319>

Capture the atlas. (n.d.). *CAMERA SENSOR SIZE IN PHOTOGRAPHY*.

<https://capturetheatlas.com/camera-sensor-size/>

Dji. (n.d.). *Dji Ground Station Pro*.

<https://www.dji.com/fi/ground-station-pro>

DJI. (n.d.). *DJI Mini 3 Pro Specs*.

<https://www.dji.com/fi/mini-3-pro/specs>

Droneblog. (2023). *How Drone Controllers Work*.

<https://www.droneblog.com/drone-controller/>

Dronegenuity. (n.d.). *What Are Point Clouds, And How Are They Used?*

<https://www.dronegenuity.com/point-clouds/>

DronesDirect. (n.d.). *Top tips for drone photography*.

<https://www.dronesdirect.co.uk/content/top-tips-for-drone-photography>

Droneinfo. (29.04.2022). *Missä ei saa lennättää?*

<https://droneinfo.fi/fi/missa-ei-saa-lennattaa>

Dronezon. (1.10.2020). *How Do Drones Work And What Is Drone Technology*.

<https://www.dronezon.com/learn-about-drones-quadcopters/what-is-drone-technology-or-how-does-drone-technology-work/>

Epic Games. (14.6.2023 -a). *Introducing RealityCapture 1.2.2*.

<https://dev.epicgames.com/community/learning/courses/9Xr/capturing-reality-introducing-realitycapture-1-2-2/bXnd/capturing-reality-view-massive-meshes-directly-in-realitycapture>

Epic Games. (2023 -b). *RealityCapture*.

<https://www.capturingreality.com/realitycapture>

Expert Photography. (5.6.2023). *Understand Camera Resolution*.

<https://expertphotography.com/camera-resolution/>

Filmmaking Lifestyle. (n.d.). *What is a Gimbal?*

<https://filmlifestyle.com/what-is-a-gimbal/>

G2. (27.4.2022). *What Is UV Mapping?*

<https://www.g2.com/articles/uv-mapping>

LinkedIn. (2023). *Trends and innovations in TLS and LiDAR technology and applications?*

<https://www.linkedin.com/advice/0/what-current-trends-innovations-tls-lidar-technology>

nVidia. (10.9.2012). *What Is CUDA?*

<https://blogs.nvidia.com/blog/2012/09/10/what-is-cuda-2/>

O'Hara, N. (15.1.2021). *Printing 3D models of everyday objects using smartphone photos.*

<https://nohara42.medium.com/guide-printing-3d-models-of-everyday-objects-using-smartphone-photos-25a4baf81a24>

PhotoPills. (n.d.). *Depth of Field: The Definitive Photography Guide.*

<https://www.photopills.com/articles/depth-of-field-guide>

Pix4D. (6.1.2021). *LiDAR: what it is, and how it is useful for photogrammetry.*

<https://www.pix4d.com/blog/lidar-photogrammetry/>

Pluralsight. (2.11.2022). *What are Normal Maps?*

<https://www.pluralsight.com/blog/film-games/bump-normal-and-displacement-maps>

Rieck, D. (12.6.2023). *Mechanical, Rolling and Global Shutter Cameras for Drones.*

<https://medium.com/@douglasrieck/mechanical-rolling-and-global-shutter-cameras-for-drones-78460b54e79d>

Scandinavian Photo. (1.2.2023). *Suodinopas – valitse sopiva suodin objektiivillesi.*

<https://www.scandinavianphoto.fi/tietopankki/suodinopas>

Sketchfab. (18.6.2015). *How to set up a successful photogrammetry project.*

<https://sketchfab.com/blogs/community/how-to-set-up-a-successful-photogrammetry-project/>

Take-off Professionals. (n.d.). *WHAT IS PHOTOGRAMMETRY?*

<https://www.takeoffpros.com/2020/06/16/what-is-photogrammetry/>

TechTarget. (7.12.2021). *Definition: Drone.*

<https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/drone>

Time. (30.5.2018). *Aerial Photography Has Changed the World.* (O. B. Waxman, Toimittaja)

<https://time.com/5281295/aerial-photography-history-drones/>

UV mapping. (7.8.2023). Wikipedia-artikkeli.

https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=UV_mapping&oldid=1169139226

Veprit. (24.3.2016). *Basic photography concepts*.

<https://veprit.com/photography-guide/basic-concepts/aperture-shutter-speed-iso>

Vertex Library. (n.d.). *15 Outdoor Photogrammetry Tips*.

<https://www.vertexlibrary.com/guide-to-3d-scanning-outdoor-photogrammetry-tips>

Vision Aerial. (7.6.2022). *Lidar vs. Photogrammetry*.

<https://visionaerial.com/lidar-vs-photogrammetry-which-is-best-for-your-project/>

VNTANA. (n.d.). *3D Scanning And Photogrammetry Explained*.

<https://www.vntana.com/blog/3d-scanning-and-photogrammetry-explained/>

Wired. (14.9.2012). *The Power of Lenses*.

<https://www.wired.com/2012/09/photography-lenses/>