

Janne Hirvonen

Rakennuksen vesikaton mittaus multikopterikuvausta käyttäen

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Insinööri (AMK)
Maanmittaustekniikan tutkinto-ohjelma
Insinöörityö
5.5.2015

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Janne Hirvonen Rakennuksen vesikaton mittaus multikopterikuvausta käyt- täen 36 sivua + 2 liitettä 5.5.2015
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	maanmittaustekniikka
Ohjaajat	mallinnusinsinööri Pekka Wilska lehtori Jussi Laari
<p>Tämän insinööriyön tarkoituksena oli tutkia multikopterikuvauksella rakennuksen vesika- tosta tuotetun pistepilven soveltuvuutta inventointimallin mittausaineistoksi sekä selostaa multikopterikuvauksen työprosessi alkuvalmisteluista aina kolmiulotteisen mallin luomiseen asti. Insinööriyö on tehty yhteistyönä Helsingin kaupungin rakennusviraston Arkkitehtuuri- osaston kanssa.</p> <p>Mittauskohteena toimi Puotinharjussa sijaitseva Helsingin kielilukio. Kuvauksessa käytettiin Helsingin rakennusviraston DJI S800 EVO -multikopteria ja siihen kiinnitettyä SONY NEX7 -minijärjestelmäkameraa. Kuvien prosessointi pistepilveksi tehtiin Autodesk ReCap 360 -oh- jelmistolla. Vertailun luomiseksi rakennus mitattiin myös Leican P20 ja HDS6000 -laserkei- laimilla. Vertailupohjaa haettiin myös kuvaamalla kohde DJI Phantom -multikopterilla ja sii- hen kiinnitetyllä GoPro Hero4 Black -kameralla.</p> <p>Valokuvista prosessoitujen pistepilvien soveltuvuutta inventointimallin mittausaineistoksi tut- kittiin tulkitsemalla pistepilvistä rakennuksen nurkkapisteitä ja eri kohteita katolta. Mit- tauksia verrattiin laserkeilaimilla mitattuun pistepilveen erojen löytämiseksi. Lopuksi verrat- tiin saatuja tuloksia kansallisen Yleiset tietomallivaatimukset YTV 2012 -ohjeistuksen tark- kuusvaatimuksiin.</p> <p>Multikopterikuvauksella tuotetun pistepilven tarkkuuteen vaikuttavat paljon kameran laatu ja tarpeeksi kattava kuvapeitto. Mallinnusvaiheessa mahdollisimman hyvään tarkkuuteen päästään tarkastelemalla yksittäisten pisteiden sijaan laajempia useiden pisteiden muodos- tamia kokonaisuuksia. Työssä päästiin lähes kaikilta osin YTV 2012 -ohjeistuksen määritte- lemiin tarkkuuksiin.</p>	
Avainsanat	multikopteri, fotogrammetria, inventointimalli, UAV

Author Title	Janne Hirvonen Multicopter photography in rooftop surveying
Number of Pages Date	36 pages + 2 appendices 5 May 2015
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Land Surveying
Instructors	Pekka Wilska, Modeling Engineer Jussi Laari, Senior Lecturer
<p>The purpose of this Bachelor's thesis was to find out how multicopter photography can be used for 3D surveying of building rooftops. An additional goal was to describe the the survey process from start to finish.</p> <p>The target building for the study was a school in Puotinharju, Helsinki. The imaging was done with a DJI S800 EVO drone and Sony NEX7 digital camera. For reference data the building was also measured with Leica P20 and HDS6000 laser scanners. The final year project also included a comparison with images taken with Sony NEX7 and GoPro Hero4Black digital cameras.</p> <p>The main comparison was conducted by modelling the same objects from different point clouds. The modelled objects were then compared with the objects modelled from the laser scanned point cloud to assess any spatial differences. The observed differences were then compared with the national accuracy requirements for BIM-models.</p> <p>In conclusion the point cloud precision depends heavily on the quality of the digital camera and sufficient image overlap. The key point in the modelling process is to analyse the spatial accuracy from several points rather than from a single point. Almost all results met the national accuracy requirements.</p>	
Keywords	UAV, drone, photogrammetry

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Multikopterikuvaus	2
2.1	Mikä on multikopteri?	2
2.2	Kamerajärjestelmät	5
2.2.1	Kamerat	5
2.2.2	Kameravakaajat	6
2.2.3	Kameran etähallinta	7
2.3	Lainsäädäntö	7
3	Fotogrammetria ja fotogrammetriset ohjelmistot	9
3.1	Fotogrammetria	9
3.2	Fotogrammetristen ohjelmien vertailu	10
3.2.1	Autodesk ReCap 360	10
3.2.2	Pix4Dmapper	11
4	Mittaustyöt	13
4.1	Alkuvalmistelut	13
4.1.1	Signalointi	13
4.1.2	Lähtöpaikan valinta	15
4.2	Sääolosuhteet	17
4.3	Esimerkkikohteen kuvaus	18
4.4	Kuvien prosessointi Autodesk ReCap 360 -ohjelmalla	19
5	Tarkkuus ja siihen vaikuttavat tekijät	23
5.1	Pistepilven tulkinta	23
5.2	Tarkkuuteen vaikuttavat tekijät	24
5.3	Yleiset tietomallivaatimukset 2012	26
5.4	Tulosten tarkastelu	27
5.4.1	Nurkkapisteiden tarkkuudet	28
5.4.2	Korkeuden tarkastelu	29
5.4.3	Visuaalinen tarkastelu	30
6	Yhteenveto	33

Liitteet

Liite 1. Vertailukuvat Päiväkoti Kaivopuistosta, Autodesk Revit

Liite 2. Vertailukuvat Jollaksen kartanosta, Autodesk Revit

Lyhenteet

BIM	Building Information Model. Rakennuksen kolmiulotteinen tietomalli.
GPS	Global Positioning System. Yhdysvaltain puolustusministeriön kehittämä maailmanlaajuinen satelliittipaikannusjärjestelmä.
Mpx	Megapikseli. Pikselien eli kuvapisteiden määrä miljoonina.
TIN	Triangulated Irregular Network. Epäsäännöllinen vektori kolmioverkko.
UAV	Unmanned Aerial Vehicle. Ilmassa toimiva miehittämätön alus.
YTV 2012	Yleiset tietomallivaatimukset 2012. Kansallinen tietomallien ohjeistus.

1 Johdanto

Multikopterit ja multikopterikuvaus ovat yleistyneet voimakkaasti viime vuosina. Vielä muutama vuosi sitten miehittämättömät ilma-alukset ja lennokit olivat suhteellisen pienen ryhmän ammatti- ja harrastuskäytössä. Nykyään kuka tahansa voi ostaa muutamalla sadalla eurolla lentovalmiin ja helposti hallittavan radio-ohjattavan multikopterin.

Multikopterien yleistymisen taustalla on mobiiliteknologian kehittyminen. Nykyaikaiseen älypuheliin mahdutetuilla sensoreilla pystytään tarkasti määrittämään puhelimen sijainti, asento ja liike. Nämä ympäristöä havainnoivat sensorit, kuten elektroninen gyroskooppi tai GPS-vastaanotin, on otettu käyttöön myös multikoptereissa. Sensoreiden avulla multikopterit lentävät vakaasti myös tuulisissa olosuhteissa, ja niille on mahdollista määrittää itsenäisesti lennettävä reitti. Kameran yläilmoihin nostavat multikopterit ovat uudistaneet erityisesti media- ja viihdealaa. Multikopterit ovat nykyään arkipäivää musiikkivideoiden, elokuvien ja uutisreportaasien tuotannossa. Pelastustöissä multikoptereita on käytetty mm. Laukaan Vihtavuorella räjähdysvaaran aiheuttaneen jätekontin tarkkailussa heinäkuussa 2013 [1].

UAV-laitteita (Unmanned Aerial Vehicle) on hyödynnetty useamman vuoden myös mittauskäytössä. Erityisesti kiinteäsiipiset ns. fixed-wing-tyyppiset lennokit ovat vakiinnuttaneet asemansa pienten alueiden kartoituksessa [20]. Viimeisintä ja yhä kehittyvää teknologiaa UAV-mittauksissa edustavat multikopterit. Kiinteäsiipisiin lennokkeihin verrattuna multikoptereissa on selkeitä etuja: multikopterit kestävät paremmin tuulta, ne eivät vaadi aukeaa lähetyspaikkaa ja ne mahdollistavat monipuolisemmat kuvakulmat. Siinä missä kevyt siipilennokki kykenee kuljettamaan ainoastaan pientä ja kevyttä kameraa, voidaan tehokkaalla multikopterilla nostaa jopa usean kilon painoisia kameroita ja mittalaitteita. Esimerkiksi itävaltalainen mittalaitteiden valmistaja Riegl esitteli lokakuussa 2014 RiCopter-nimisen laserkeilaimella varustetun multikopterin [2].

Tässä työssä selostetaan, kuinka multikopteria ja digitaalista kameraa käyttäen on mahdollista mitata rakennuksen vesikatto ja hyödyntää mittausaineistoa rakennuksen inventointimallintamisessa. Valokuvien prosessointi mittausaineistoksi suoritetaan Autodesk ReCap 360 -ohjelmistolla. Työn tarkoitus on myös selvittää, miten tarkkaa mittausaineistoa edellä mainituilla menetelmillä on mahdollista tuottaa ja mitkä tekijät tarkkuuteen vai-

kuttavat. Lopuksi tarkastellaan, riittävätkö tulokset kansallisen Yleiset tietomallivaatimukset YTV 2012 -ohjeistuksen suositustarkkuuksiin. Tämä työ on tehty yhteistyössä Helsingin kaupungin rakennusviraston Arkkitehtuuriosaston kanssa.

2 Multikopterikuvaus

2.1 Mikä on multikopteri?

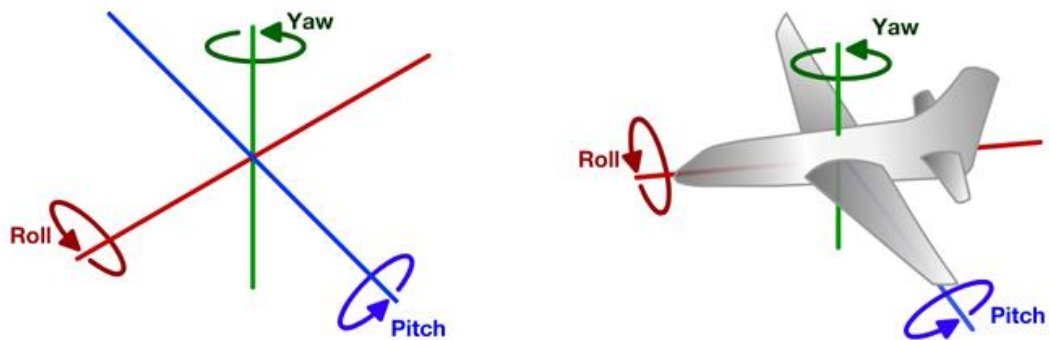
Multikopteri on moniroottorinen radio-ohjattava tai itsenäisesti lentävä UAV-laite. Muihin ilma-aluksiin ja lennokkeihin verrattuna multikoptereille on ominaista hyvin vakaa ja tarkka lennätettävyyttä. Multikoptereista on käytössä useampia nimityksiä, kuten roottorien määrästä kertovat nimitykset quad-, heksa- ja oktokoopperi. Puhekielessä on yleisesti käytössä nimitykset kamerakopteri, robottikopteri tai drooni. Miehitettävien ilma-alusten ja multikoptereiden keskeiset termit on selitetty taulukossa 1. [3; 4.]

Taulukko 1. Miehitettävien ilma-alusten terminologiaa [3; 4].

Termi	Selitys
UAS	Unmanned Aircraft System. Miehitettävien ilma-aluksen toiminnassa käytettävä järjestelmä, joka käsittää lennokin lisäksi maa-aseman ja ohjausjärjestelmän.
UAV	Unmanned Aerial Vehicle. Ilmassa toimiva miehitettävien alus.
quadkopteri	neliroottorinen kopteri
heksakopteri	kuusiroottorinen kopteri
oktokopteri	kahdeksanroottorinen kopteri
multikopteri	yleisnimitys moniroottorisille koptereille
lennokki	Harrasteväline, jota lennetään näköyhteydessä ja jota miehitettävien ammattimaisen lento-toiminnan sääntely ja lentomääräykset eivät koske.

kamerakopteri, robottikopteri, drooni	Multikopterista puhekielessä käytettäviä nimityksiä.
---------------------------------------	--

Vakaan lennätettävyyden mahdollistavat useat kopteriin asennetut sensorit. Näistä merkittävin on IMU-ohjausyksikkö (Inertia Measurement Unit) [5]. Ohjausyksikkö tarkkailee elektronisen gyroskoopin, kompassin ja kiihtyvyyssanturin avulla kopterin asentoa ja etenemissuuntaa. Multikopterin asento määritellään kiertymiskulmien roll (kallistuminen), yaw (kääntyminen) ja pitch (nyökkääminen) avulla (kuva 1). IMU-yksikkö säätelee kunkin sähkömoottorin kierrosnopeutta pitäen kopterin automaattisesti vaakatasossa.



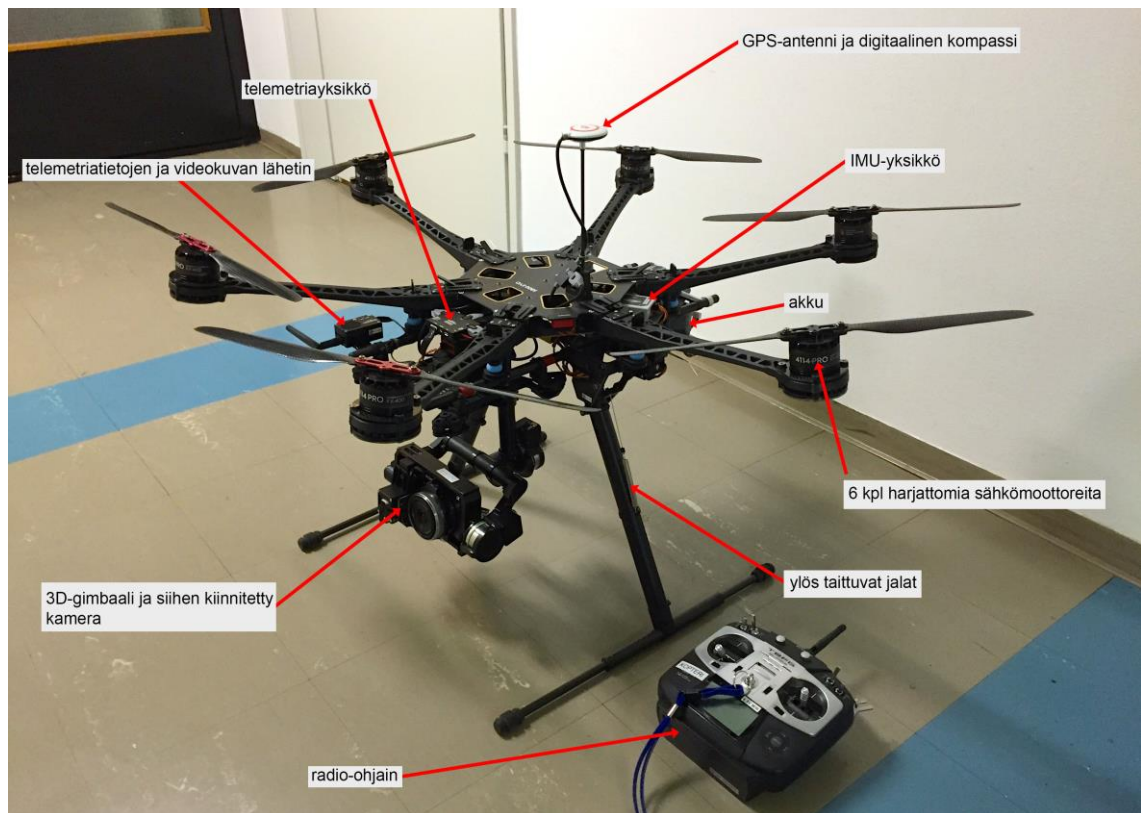
Kuva 1. Kiertymiskulmat (roll, yaw, pitch) kolmessa ulottuvuudessa [6].

Kopterin ohjaus perustuu kopterin asennon muuttamiseen. Kun kopteria ohjataan radio-ohjaimella, välittää IMU-yksikkö ohjaustiedon moottoreille siten, että kopteri kallistuu haluttuun suuntaan. Etenemisnopeus riippuu kallistuskulman suuruudesta. IMU-yksikkö estää automaattisesti liian suuren kallistuskulman päästämättä näin kopteria pyörähtämään ylösalaisin, mikä johtaisi kopterin hallinnan menettämiseen ja maahan syöksymiseen.

Multikopterin sijainti avaruudessa määrittyy GPS-vastaanottimen avulla. Vastaanotin mahdollistaa myös ennalta määritellyn reitin autonomisen lentämisen. Useissa multikoptereissa on niin kutsuttu fail-safe-toiminto, jonka ansiosta kopteri palaa itsenäisesti lähtöpaikalle, mikäli yhteys kopterin ja operoijan välillä katkeaa. GPS-paikannuksesta on hyötyä myös manuaaliohjauksessa: paikannuksen avulla kopteri pysähtyy automaatti-

sesti paikalleen, kun ohjaus lopetetaan. Kopteri leijuu paikallaan tuulesta huolimatta ilman, että lentäjän tarvitsee tehdä vastaliikettä tuulta vasten. Mikäli paikannus kytketään pois päältä, lähtee leijuntaan jätetty multikopteri liikkumaan tuulen mukana. Multikopteria lennätettäessä tulee huomioida, että GPS-paikannus toimii ainoastaan avoimessa maastossa, jossa on suora näköyhteys riittävän moneen paikannussatelliittiin. Mikäli kopterin satelliiteista saama sijaintitieto on epätarkkaa tai puutteellista, saattaa multikopteri tehdä arvaamattomia ja virheellisiä korjausliikkeitä.

Korkeuden määrittämisessä GPS-vastaanotinta avustaa IMU-yksikössä sijaitseva elektroninen barometri, joka laskee kopterin tarkan lentokorkeuden ilmanpaineen muutoksesta. Lentokorkeuden tarkka määrittäminen on ensiarvoisen tärkeää, jotta kopterilla voidaan laskeutua hallitusti maahan ja jotta korkeustieto on saatavilla, vaikka yhteys paikannussatelliitteihin menetettäisiin. Kuvassa 2 on esitetty multikopterin komponentit.



Kuva 2. Rakennusviraston DJI S800 EVO -multikopteri komponentteineen.

Multikopterin manuaaliohjaus tapahtuu perinteisellä radio-ohjaimella. Ohjaimen vasemalla ohjaussauvalla hallitaan korkeutta ja kopterin kääntymistä pysty akselin suhteen.

Oikealla ohjaussauvalla kopteria ohjataan vaakasuunnassa. Vaikka multikopterit pystyvätkin suorittamaan lennon täysin itsenäisesti, edellyttävät säädökset manuaaliohjauksen valmiutta ja ammattitaitoista lennättäjää. Lennätysäädöksiä käsitellään tarkemmin luvussa 2.2.

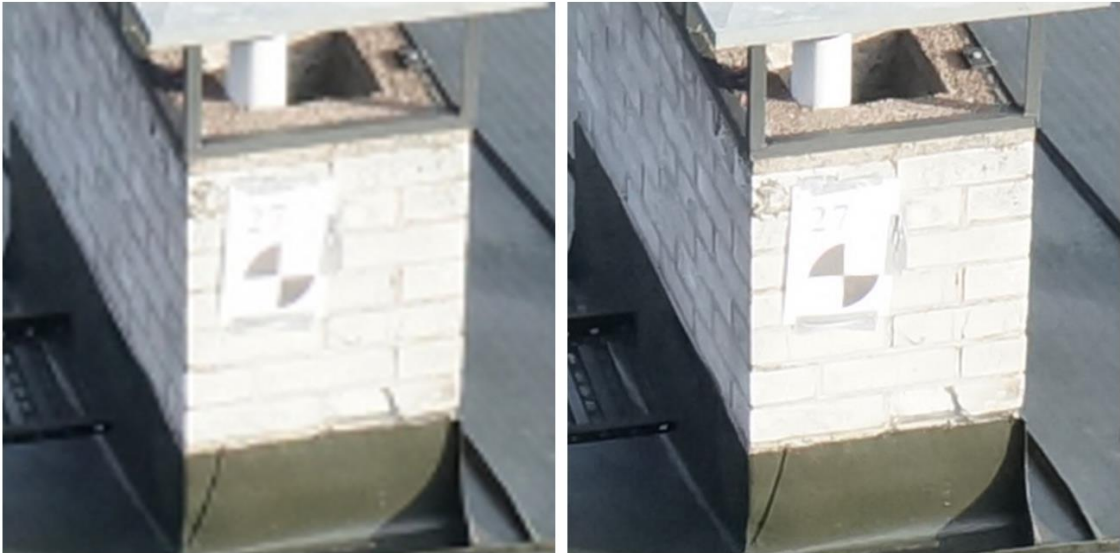
Multikoptereita on nykyään hyvin monta eri mallivaihtoehtoa eri kokoluokissa. Käytännössä erilaisia kokonaisuuksia on rajattomasti, sillä yleinen tapa on rakentaa kopteri itse valituista komponenteista. Täysin lentovalmiit mallit ovat myös yleistyneet voimakkaasti. Tällä hetkellä siviilikäyttöön tarkoitettujen multikopterien valmistajia on maailmalla 208 kappaletta [4]. Eri kopterimallien erot on yksinkertaista jaotella nostovoiman ja lentoajan perusteella. Pienet ja edulliset kopterit nostavat pienen kuorman, kuten pienen GoPro-action-kameran, kun taas isot ja kalliit kopterit jaksavat nostaa usean kilon kuorman, kuten digitaalisen elokuvakameran. Lentoaika riippuu akkujen kapasiteetista, painosta sekä moottorien virrankulutuksesta. Lentoajat vaihtelevat malleittain minuuteista noin puoleen tuntiin. Multikopterien hintaskaala on muutamasta sadasta aina kymmeneen tuhansiin euroihin asti.

2.2 Kamerajärjestelmät

Digitaalisten kameroiden kehitys on jatkunut nopeana viime vuosien aikana. Kameroista on tullut entistä suorituskykyisempiä, ja tekniikka on mahdutettu entistä pienempiin kuoriin. Hyvänä esimerkkinä kehityksestä on Nokian vuonna 2012 markkinoille tuoma Pureview 808 -matkapuhelin, jossa on 41 megapikselin digitaalinen kamerakenno. UAV-kuvauksen kannalta kameroiden kehitys on tuonut kaksi tärkeää parannusta. Ensimmäinen kameroiden pientyminen ja keventyminen vähentää multikopterin nostokuormaa ja näin pidentää lentoaikaa. Toinen tärkeä etu liittyy kamerakennon kuvapisteen, pikselien, kasvuun; tarkempi kamera tuottaa pienemmän maastopikselin, eli kuvan erotuskyky ja mittatarkkuus paranevat.

2.2.1 Kamerateat

Fotogrammetrista käyttöä ajatellen kameraa valittaessa korostuu hyvä erotuskyky eli kamerakennon suuri resoluutio. Valokuvien suuri erotuskyky edesauttaa laskennassa mahdollisimman monen vastinpisteen löytämisen ja niiden tarkan sijainnin yksilöimisen. Erotuskyvyn vaikutusta on havainnollistettu kuvassa 3.



Kuva 3. Resoluution vaikutus vastinpisteen sijainnin yksilöimisessä. Kuvasuurennotukset kahden megapikselin (vasen) ja 21 megapikselin (oikea) kuvasta.

Kuvasta 3 huomataan, että kahden megapikselin valokuvassa mustavalkotähyksen tarkka keskikohta on kadonnut näkyvistä. Tämä johtuu kuvan suuremmista maastopikseleistä, joiden takia tähyksen keskustan pikseleiden sävyarvoihin on sekoittunut sekä ristikon mustaa että pohjan valkoista. Ilmiö korostuu kuvausetäisyyden kasvaessa.

Kameran objektiivin tulisi olla mahdollisimman laajakulmainen, jotta kuvat peittäisivät mahdollisimman paljon kuvattavaa kohdetta. Laajakulmainen objektiivi kestää myös kapeamman polttovälin objektiivia paremmin kopterin moottoreiden aiheuttamaa mikrotärinää. Objektiivin polttovälin tulee olla sama jokaisessa kuvassa. Kiinteän polttovälin yksinkertaiset objektiivit on todettu parhaiksi ilmakuvauksessa tarkan piirron ja keveyden ansiosta.

2.2.2 Kameravakaajat

Koska kopterin ohjaus perustuu kopterin kulman kallistamiseen, täytyy kamera vakauttaa kameravakaajalla. Ilman vakaajaa kamera kääntyilisi kopterin kallistelujen mukana. Kameravakainten eli ns. gimbaalien toimintaperiaate perustuu elektroniseen gyroskooppiin ja servomoottoreihin. Servomoottorit pitävät kameran vaakasuorassa gyroskoopin havaitsemien kiertymiskulmien perusteella. Sellaisia kameravakaajia, joissa on kolme servomoottoria jokaisen kiertymiskulman akselin suhteen (roll, yaw, pitch), kutsutaan

3D-gimbaaleiksi (kuva 2). Tällaisilla 3D-gimbaaleilla kameran asento pysyy lukittuna valitussa suunnassa, vaikka kopteri kääntyy kaikkien kiertymiskulmien suhteen. Halvempia kahden servomoottorin kameravakaajia kutsutaan 2D-gimbaaleiksi. 2D-gimbaaleissa vakautetaan kopterin yaw ja pitch akselien suuntaiset kääntymiset. Kallistusten ehkäisyn lisäksi kameravakaaja vähentää multikopterin moottoreista aiheutuvan värinän välittymistä kuville, sillä vakaajaa kiinnitetään kopterin runkoon kumipusilla.

2.2.3 Kameran etähallinta

Kameravakaaja ja kamera yhdistetään radiolinkillä radio-ohjaimen. Kamerahallinnan voi linkittää joko suoraan samaan ohjaimen, jolla multikopteria lennetään, tai erilliseen ohjaimen. Kun kameran etäohjaus toteutetaan erillisellä ohjaimella, tarvitaan kaksi henkilöä, joista toinen keskittyy multikopterin lennätykseen ja toinen kameran hallintaan. 3D-gimbaaleissa kameran etäkäyttäjä pystyy vapaasti valitsemaan suunnan, johon kamera käännetään. 2D-gimbaaleissa pystytään valitsemaan kameran suunta pystykulman suhteen, mutta vaakasuunnassa kamera kääntyy kopterin ohjausliikkeiden mukana. Kameran etsimenä käytetään datalinkillä toimivaa monitoria, johon saadaan kameran näkemä videokuva. Monitorilla voidaan näyttää myös tärkeää telemetriaa kuten akkujen varauksen, kopterin korkeuden ja paikannussatelliittien lukumäärän.

Kuvauksen voi suorittaa myös ilman etähallintalaitteistoa, mikäli kamerassa on intervallikuvaustoiminto. Tällöin kamera asetetaan ottamaan kuvia määritetyin väliajoin ennen lentoa lähtemistä ja lopetetaan, kun kopteri on laskeutunut maahan. Kamera voidaan esimerkiksi asettaa ottamaan kuvia joka viides sekunti. Kuvien käsittelyvaiheesta intervallikuvasarjasta valitaan onnistuneet kuvat. Edellä mainittu menetelmä vaatii lentäjältä taitoa arvioida kameran suuntaus oikein näkemättä etsimen kuvaa.

2.3 Lainsäädäntö

UAV-toimintaa säädelään ilmailulailla sekä ilmailusäädöksillä. UAV-laitteiden nopea kehitys on herättänyt keskustelua sääntöjen ajanmukaisuudesta. Liikenteen turvallisuusvirasto Trafi on uudistamassa ilmailulakia siten, että se vastaa kasvavan UAV-toiminnan vaatimuksiin. Lakiuudistuksen oli tarkoitus astua voimaan ilmailumääräyksen OPS M1-23 myötä vuoden 2015 alussa, mutta määräyksen laadintavaiheessa todettiin, että mie-

hittämättömät ilma-alukset vaativat täysin oman ilmailumääräyksensä. Uudistuvat määräykset ovat toistaiseksi kohdistumassa ainoastaan ammattimaiseen lentotoimintaan. [3; 8.]

Nykyisellään miehittämättömillä ilma-aluksilla lennettäessä suurin sallittu lentokorkeus on 150 metriä, laitteen on oltava jatkuvan näköyhteyden päässä ja laitteen suurin sallittu massa noin 20 kg. Miehittämättömien ilma-alusten tulee pystyä aina väistämään muita ilma-aluksia. Väistämispakon takia myös itsenäisesti lentävissä laitteissa tulee olla mahdollisuus manuaaliseen ohjaukseen radio-ohjaimella. [3]

Nykyisiä määräyksiä tullaan tiukentamaan ja uusia lisäämään. OPS M1-23 -ilmailumääräyksen laadintavaiheen lausuntapyyntöissä ehdotettiin seuraavaa:

- Lennätyskorkeuden on oltava alle 120 metriä maan tai veden pinnasta.
- Kauko-ohjaajan tai kauko-ohjaustähystäjän etäisyys miehittämättömästä ilma-aluksesta saa olla enintään 500 metriä.
- Kauko-ohjaajan on oltava pätevä ohjaamaan kyseistä miehittämättömää ilma-alusta. Kauko-ohjaajan ja kauko-ohjaustähystäjän on oltava vähintään 18-vuotias.
- Tiheästi asuttuun alueeseen tai väkijoukkoon täytyy olla 150 metrin varoetäisyys.
- Mahdollisen häiriötilanteen varalta yli 5 kg:n painoisessa UAV:ssa täytyy olla järjestelmä, joka häiriötilanteessa vähentää liike-energiaa ja antaa varoitusta häiriötilanteen ajan. [9]

Edellä mainittujen säädösten oli määrä astua voimaan OPS M1-23 -ilmailumääräyksen myötä, mutta laadintavaiheen aikana luonnoksen tiukat määräykset aiheuttivat runsasta keskustelua alan harraste- ja ammattipiireissä. Keskustelun ja palautteen johdosta Trafi on aloittanut uuden ilmailumääräyksen työstämisen. Työstettävässä ilmailumääräyksessä sääntöjä todennäköisesti lievennetään. Trafin ylitarkastaja Heikki Jokinen tiedotti 6.2.2015, että sääntely tulee olemaan mahdollisimman kevyttä tukien kansallista innovaatiokehitystä [10]. Uusi ilmailumääräys valmistunee loppuvuonna 2015. [8; 11.]

Suoraan UAV-käyttöön tarkoitettujen määräysten lisäksi tulee myös huomioida kaikkea ilmakehän rajoittava lainsäädäntö. Pääosin ilmakehän käyttö on sallittua kaikkialla Suo-

messa, mutta aluevalvontalain pykälässä 14 kielletään sotilaskohteiden valokuvaus. Sotilaskohteiden lisäksi ilmailukartoissa on merkitty kielletyiksi kuvauskohteiksi jotkut erityisalueet kuten ydinvoimalat. [12; 13.]

Miehittämättömien ilma-alusten normiston ja sääntöjen pohdinta on käynnissä myös globaalilla tasolla. Suomi on mukana JARUS (Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems) -asiantuntijaryhmässä, joka laatii miehittämättömän ilmailun kansainvälisen mallinormiston. JARUS koostuu eri maiden kansallisista ilmailuviranomaisista, Yhdysvaltain ilmailuhallinnosta (FAA) ja Euroopan lentoturvallisuusvirastosta (EASA). Tuleva eurooppalainen RPAS (Remotely Piloted Aerial System) normisto tulee pitkälti perustumaan JARUS-organisaation normisuosituksiin. [14]

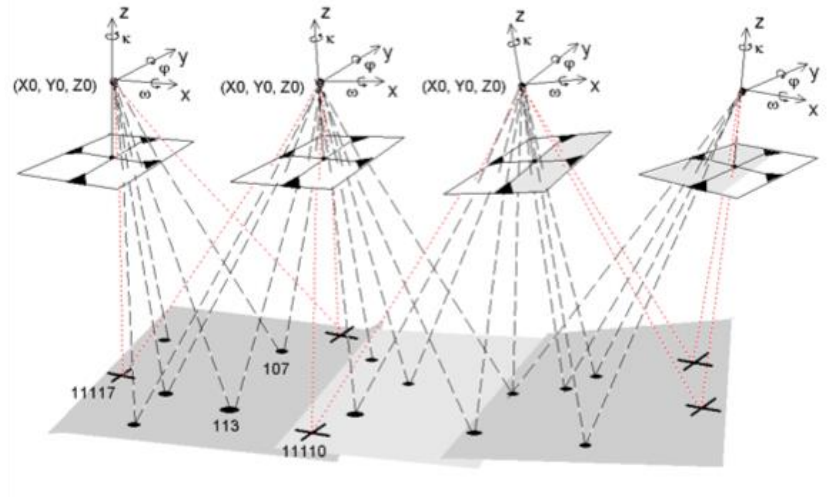
3 Fotogrammetria ja fotogrammetriset ohjelmistot

3.1 Fotogrammetria

Valokuvilta tehtävä kolmiulotteinen mittaus eli fotogrammetria on alana vanha. Esimerkiksi Suomessa stereokuvapareilta tehtävää mittausta ja kartoitusta on harjoitettu jo 1940-luvulta lähtien [15]. Digitaalisuus on muokannut voimakkaasti myös fotogrammetrian sovelluksia. Analogisista stereotyöasemista ja filmikuvista on siirrytty digitaalisiin valokuvaan ja tietokoneohjelmistoihin. Nykyaikaisilla fotogrammetrisillä ohjelmistoilla pystytään tuottamaan tarkkaa kolmiulotteista mittaustietoa kuvaamalla mitattavasta kohteesta useita valokuvia eri suunnista.

Fotogrammetristen ohjelmien toiminta perustuu samojen kohteiden, eli vastinpisteiden, tunnistamiseen eri kulmista otetuilta kuvilta. Vastinpisteiden ei tarvitse olla erikseen merkittyjä, vaan ohjelmistot osaavat automaattisesti tunnistaa niitä kuvilta. Ohjelmat tunnistavat kuvilta jopa tuhansia vastinpisteitä [16]. Vastinpisteiden avulla lasketaan sädekimp-putasoitus kameran sisäiseen orientointiin. Toisin sanoen laskennassa ratkaistaan tekijät (polttoväli, linssivääristymät), joiden kautta kuva on muodostunut kameran kennolle. Laskentavaiheessa määritetään myös kuvien ulkoinen orientointi eli kameran asento ja sijainti 3D-avaruudessa (kuva 4). Kun kameran sisäinen ja ulkoinen orientointi on selvitetty, voidaan kuvauskohteesta laskea geometrisesti eteenpäinleikkaamalla uusia pis-

teitä XYZ-koordinaatistoon. Kuvattava kohde sidotaan haluttuun paikalliskoordinaatistoon merkitsemällä kuviin koordinaateiltaan tunnettuja vastinpisteitä. [25; 26.] Tunnettujen vastinpisteiden sijoittamista kuviin käsitellään tarkemmin luvussa 4.2.



Kuva 4. Vastinpisteistä muodostuvien sädekimppejen avulla määritetyt kuvien ulkoiset orientoinnit. Kuvien projektiokeskusten sijainnit (X_0, Y_0, Z_0) ja kameras kallistukset $(\omega, \varphi, \kappa)$ [25].

3.2 Fotogrammetristen ohjelmien vertailu

Tässä luvussa vertaillaan kahta yleistä fotogrammetriaa hyödyntävää tietokone-ohjelmaa, jotka laskevat valokuvien perusteella kolmiulotteisen mallin kuvauskohteesta. Ohjelmat poikkeavat toisistaan oleellisesti siinä, että Autodesk ReCap 360 on selaimessa toimiva pilvipalveluun perustuva ohjelmisto, kun taas Pix4Dmapper on omalle tietokoneelle asennettava ohjelmisto.

3.2.1 Autodesk ReCap 360

Yhdysvaltalainen ohjelmistovalmistaja Autodesk esitteli vuonna 2013 ReCap 360 -sovelluksen [31]. ReCap 360 on osa Autodeskin ReCap-tuoteperhettä, joka on suunniteltu laserkeilaamalla ja valokuvaamalla tuotetun kolmiulotteisen pistepilviaineiston käsitteilyyn. ReCap 360 on toteutettu pilvipohjaisena sovelluksena ja sitä käytetään verkkoselaimen kautta. Ohjelma on käyttöliittymältään hyvin suoraviivainen ja yksinkertainen:

- Aluksi luodaan uusi projekti ja nimetään se.

- Seuraavassa vaiheessa valitaan, mitkä tiedostomuodot ohjelma tekee kuvauskohteessa.
- Kolmannessa vaiheessa kuvat ladataan ohjelman palvelimelle.
- Kun kuvat on ladattu, merkitään kuville tunnettuja vastinpisteitä.
- Kun tunnettujen vastinpisteiden merkintä on suoritettu, lähetetään projekti laskentaan serverille.
- Käyttäjä saa sähköpostiinsa ilmoituksen, kun projekti on laskettu ja ladattavissa.
- Valmiin mallin voi esikatsella verkkoselaimessa.

Ohjelman maksullinen versio tukee maksimissaan 250:tä valokuvaa. Ilmaisversiossa suurin kuvien määrä on rajoitettu 50 valokuvaan. ReCap 360 ei vaadi tehokasta tietokonetta, koska mallin laskenta tapahtuu Autodeskin servereillä.

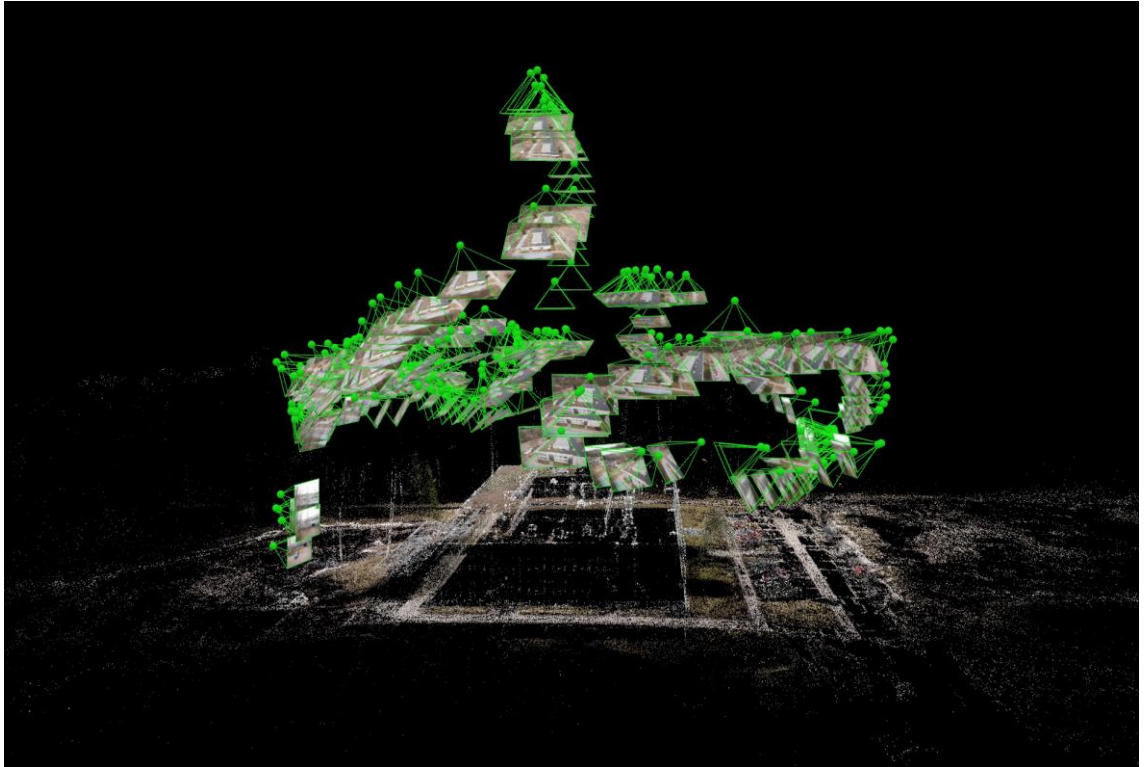
3.2.2 Pix4Dmapper

Pix4Dmapper on sveitsiläinen Pix4D-yrityksen tarjoama fotogrammetrinen laskentaohjelma. Yritys toi ohjelmiston markkinoille vuonna 2014. Sovellus on kasvattanut suosiotaan nopeasti esimerkiksi, kun National Geographic ja Time uutisoivat verkkosivuillaan Pix4D:llä mallinnetusta Marumin kraatterista Vanuatulla. [23; 24.] Autodeskin ReCap 360:n tavoin Pix4Dmapper pystyy laskemaan mistä tahansa kuvakulmista otetuista kuvasarjoista kolmiulotteisen mallin. ReCapista poiketen Pix4Dmapperissa mallin laskenta tapahtuu omalla tietokoneella. Erona löytyy myös huomattavan paljon kattavammat sääntömahdollisuudet ReCapin suoraviivaiseen käyttöliittymään verrattuna. [28]

Pix4Dmapper on selvästi kohdistettu kartoituksen käyttöön. Ohjelma tarjoaa työkalut mm. massalaskentaan, ortokuvat tuotantoon ja indeksoitujen karttojen luomiseen. Pix4D on myös kehittänyt mobiilisovelluksen, jolla DJI Phantom 2 -multikopterille voi luoda lento- ja kuvaussuunnitelman. Sovelluksen avulla kopteri voidaan myös lähettää suorittamaan itsenäistä lentoreitin mukaista kuvauslentoa. [28; 29.]

Pix4Dmapperista ladattiin ilmainen kokeiluversio syvempää tutustumista varten. Ilmaisversio antaa luoda pistepilven tai TIN-mallin (Triangulated Irregular Network), mutta mallien jälkiprosessointi ja eri tiedostomuotojen kirjoitus ei sillä onnistu. Ohjelmaan ladattiin Helsingin kielilukiosta otetut kuvat. Projektin alkuvaiheessa on valittavana mm. globaali

WGS84-koordinaatisto. Ohjelma osaa myös lukea georeferoituja valokuvia ja niiden perusteella sijoittaa laskettavan mallin koordinaatistoon. Kuvien valitsemisen jälkeen ohjelmalla suoritetaan esilaskenta, jossa määritetään kameran sijainnit ja luodaan karkea pistepilvi (kuva 5). Esilaskennan jälkeen tehdään raskas jälkilaskenta, jossa pistepilvi tiennetään.



Kuva 5. Esilaskennassa tuotettu karkea pistepilvi ja kuvauspaikat [21].

Ohjelma vaatii suorituskykyisen tietokoneen. Testimallinnus laskettiin suhteellisen tehokkaalla tietokoneella, jossa on neljän gigahertsin neliydinprosessori sekä 24 gigatavua keskusmuistia. Jälkilaskenta kesti noin viisi tuntia, jolloin prosessorin jatkuva rasitus oli yli 90 %:n ja keskusmuistia oli käytössä 11–16 gigatavua. Silmämääräisesti ohjelma tuotti hyvin samankaltaisen pistepilven kuin ReCap.

4 Mittaustyöt

Tässä luvussa käydään läpi rakennuksen vesikaton mittaustyö aina lennon alkuvalmisteluista kuvien jälkiprosessointiin. Mallinnuskohteena toimii Helsingin kielilukio Puotinharjussa. Työssä keskitytään rakennuksen vesikaton mittaamiseen, mutta menetelmää voi soveltaa myös muissa kohteissa.

Työssä käytettiin DJI S800 EVO -multikopteria, Sony NEX7 -digitaalikameraa ja Leica TCRP1201 -takymetria. Kuvien prosessointi tehtiin Autodesk ReCap 360 -ohjelmistolla. Vertailudatan saamiseksi rakennus mitattiin myös Leican P20 ja HDS6000 -laserkeilaimilla.

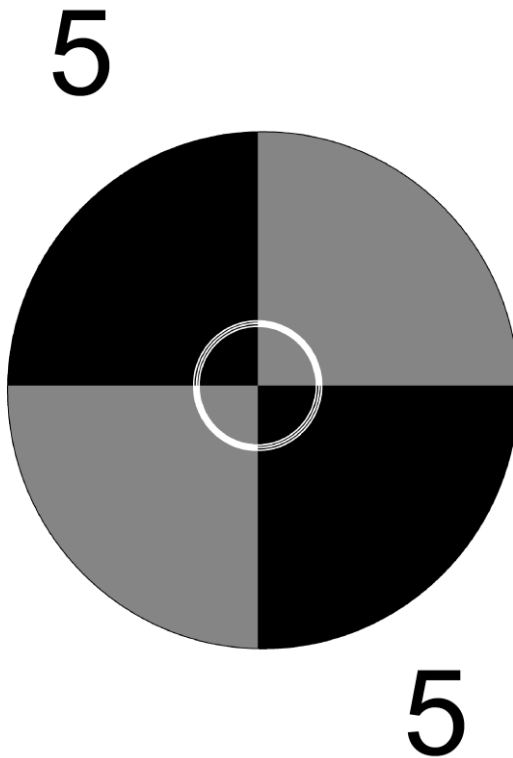
4.1 Alkuvalmistelut

Ennen varsinaista kopterin lennättämistä on tehtävä alkuvalmistelut, joihin kuuluu ainakin kuvauskohteen signalointi, signaalien mittaus haluttuun koordinaatistoon ja lennätyspaikkojen valinta.

4.1.1 Signalointi

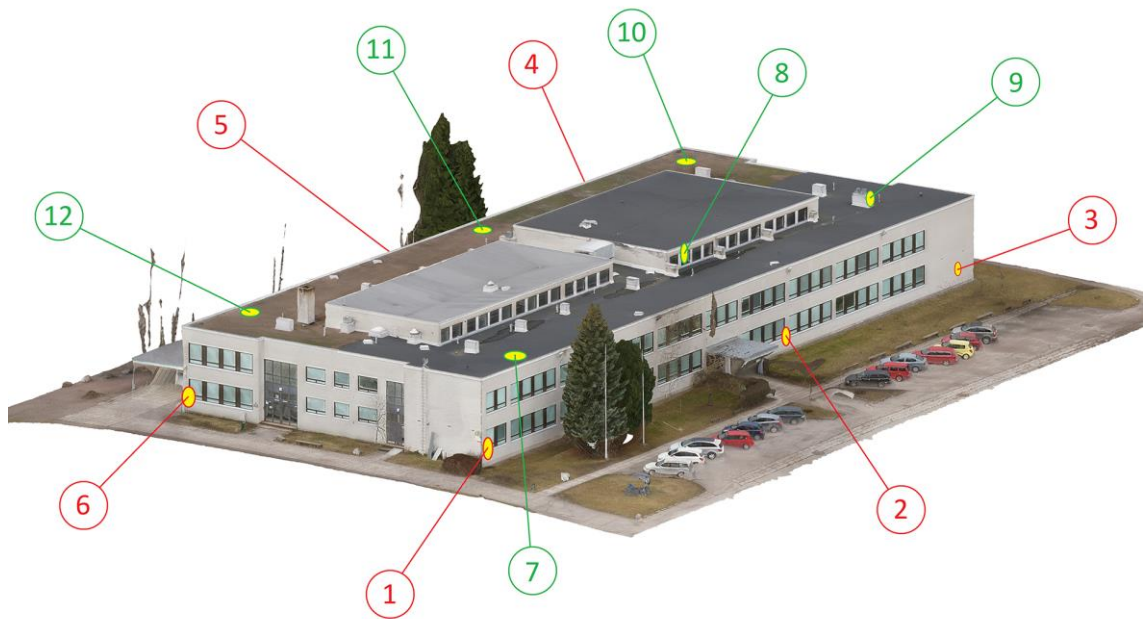
Signaloinnilla tarkoitetaan kuvausalueelle tehtäviä kuvista hyvin erottuvia kohteita, joille mitataan tarkka sijainti XYZ-koordinaatistossa. Mallinnettavan kohteen tarkkuusvaatimukset tai -tavoitteet määrittelevät signaloitujen kohteiden sijaintitarkkuudet. Signaalipisteiden tarkkuuden tulisi olla lopullisen mallin tavoitetarkkuutta parempi. Tässä työssä signaalipisteet mitattiin takymetrillä käytännössä alle yhden senttimetrin tarkkuuteen rakennuksen ympärille perustettuun paikalliseen koordinaatistoon.

Signaalipisteiksi kehitettiin A3-kokoiselle arkeille tulostettuja muovilaminoituja mustaharmaatähkyksiä (kuva 6). Aikaisemmissa koekuvauksissa todettiin, että perinteinen mustavalkotähys (kuva 3) erottuu valokuvissa huonosti pidemmiltä etäisyyksiltä, koska mustavalkotähkyksen valkoinen pohjaväri korostuu peittäen alleen mustan ristin keskuksen. Korvaamalla valkoinen pohjaväri harmaalla parannetaan mustan ristin erottumista valokuvilta.



Kuva 6. Multikopterikuvausta varten kehitetty mustaharmaatähys.

Signaalipisteet sijoitetaan niin, että ne kattavat koko kuvausalueen. Tässä työssä signaalipisteitä sijoitettiin yhteensä kaksitoista kappaletta rakennuksen seiniin muutaman metrin korkeuteen kivijalasta sekä rakennuksen katolle (kuva 7).



Kuva 7. Signaalipisteet seinillä (1–6) sekä vesikatolla (7–12). Pohjakuva: Autodesk Memento.

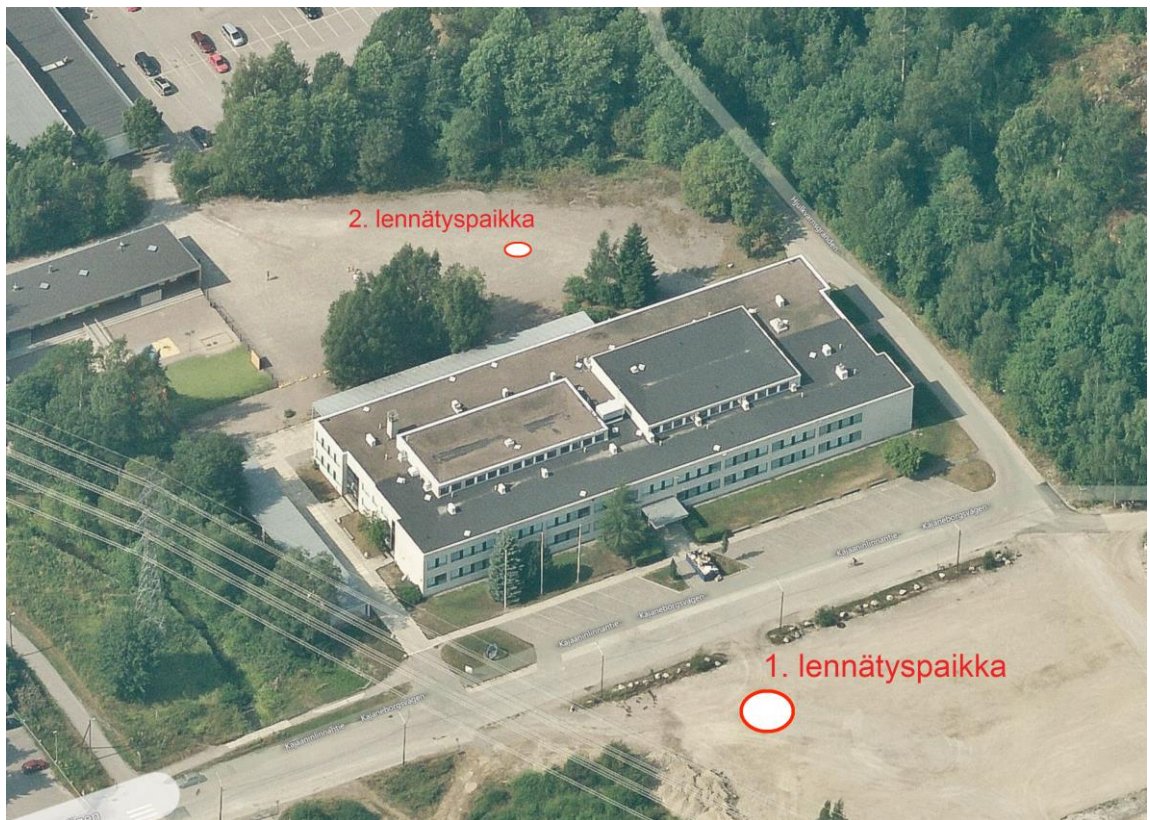
Signaalipisteiden tueksi kohteesta on mahdollista mitata takymetrilla kuvista hyvin tunnistettavia kohteita, joita voi käyttää hyväksi valokuvien rekisteröinnissä. Mikäli kohteen julkisivu on laserkeilattu, voidaan laserpistepilvestä jälkikäteen mitata vastinpisteinä käytettäville tunnistettaville kohteille koordinaatit.

4.1.2 Lähtöpaikan valinta

Multikopterin lähtöpaikkaa valitessa tulee huomioida, että näköyhteyden tulee säilyä koko lennon ajan. Suurikokoisia rakennuksia kuvatessa lennätys on hyvä toteuttaa kahdessa osassa rakennuksen eri puolilta. Tällöin lennätyspaikalta kuvataan vain lähtöpaikan puolinen osuus rakennuksesta. Kielilukio kuvattiin rakennuksen etu- ja takapuolelta (kuva 8).

Mikäli multikopteria lennetään paikannussatelliittien avustamana, tulee lähtöpaikkojen olla tarpeeksi avoimet, jotta kopterin GPS-vastaanotin saa yhteyden riittävän moneen satelliittiin. Kuvauksessa käytetty DJI S800 EVO -multikopteri vaatii vähintään kuusi satelliittia, jotta se voi tallentaa lähtöpaikan sijainnin ja palata sille itsenäisesti mahdollisessa vikatilanteessa [17]. Mahdolliset lentoesteet tulee myös huomioida ja suunnitella

lentoreitit niiden mukaan. Kielilukion tapauksessa merkittävän lentoesteen aiheuttavat tontin eteläreunassa sijaitsevat voimalinjat (kuva 8).



Kuva 8. Helsingin kielilukion lennätyspaikat ja merkittävän lentoesteen aiheuttavat voimalinjat. Pohjakuva: Bing Maps.

Alkuvalmistelujen jälkeen suoritetaan kohteen kuvaus. Kamera-asetukset tulee lukita manuaalitilaan siten, että jokaisella kuvalla on samat valotusarvot. Ennen lentoonlähtöä kameralla on hyvä ottaa testikuva ja sen mukaan säätää valotusasetukset vallitsevaan valoon sopiviksi. Valokuvien syvyysterävyyden tulee olla laaja. Laaja syvyysterävyys saadaan käyttämällä pientä aukkoarvoa. Toisaalta liian pieniä aukkoarvoja ei voida käyttää, koska tällöin suljinaikaa täytyy pidentää, mikä johtaa helposti tärähtäneisiin kuviin. Laajakulmaobjektiviilla sopivin aukkoarvo on välillä F6–F9.

Kun kameran asetukset on säädetty, on aika kytkeä virta ohjaimiin, monitoriin sekä multikopteriin. Monitorista tarkistetaan akun jännite, satelliittien lukumäärä ja varmistetaan kameran etäohjauksen toimivuus. Kuvaus suoritetaan kiertämällä vesikatko kehämäisesti muutamalta eri korkeudelta. Kuvattava vesikatko on kehän keskipisteessä, ja kuvia

otetaan noin 5–10 asteen välein. Vierekkäisten kuvien välillä tulee olla paljon päällekkäistä peittoa. Pienien rakennusten kohdalla koko vesikatto voi kerralla näkyä jokaisessa kuvassa. Suuremmissa kohteissa koko rakennuksen mahdollistamista kuvaan ei ole tarpeen yrittää, vaan riittää että kameran siirtymällä katetaan ketjumaisesti koko rakennus. Läheltä kuvaaminen edesauttaa tarkemman mallin laskemisessa, sillä maastopikselien koko on läheltä kuvattuna pienempi ja signaalipisteet erottuvat selvemmin. Esimerkkita-pauksessa rakennus kuvattiin kahdelta puolelta erikseen siten, että lentoradat olivat puolikehiä. Kuvia otettiin myös suoraan rakennuksen yläpuolelta.

4.2 Sääolosuhteet

Kameroiden kuvakennoilla on rajallinen radiometrinen erotuskyky. Tämä tarkoittaa sitä, että kamerat eivät pysty kovin kattavasti tallentamaan samaan kuvaan sekä hyvin kirkkaita että tummia kohteita. Suorassa auringonpaisteessa kuvatessa osa kirkkaista alueilta saattaa valottua puhki. Jos sen sijaan valotuksen säätää kirkkaita kohteita varten, jäävät kuvan varjoiset alueet helposti täysin tummiksi. Kaikista otollisin sääolosuhde fotogrammetrisen kuvauksen kannalta on pilvipouta. Tällöin pilviverho tasoittaa auringonvalon, jolloin kirkkaita heijastuksia ja voimakkaita varjoja ei synny. Pilvipouta edesauttaa myös valotuksiltaan ja väreiltään tasalaatuisten kuvasarjojen syntymisen. Puolipilvisellä säällä aurinko on välillä pilven takana ja välillä paistaa suoraan, mikä näkyy valotusten ja värien epätasaisuuksina eri kuvien välillä.

Toinen huomioon otettava säätökijä on tuulen nopeus. Vaikka multikopterit kestävät muita lennokkeja paremmin tuulta, on tuuleton lentosää aina eduksi. Mitä tyynempi tuuli on, sen helpommin lennolla saa onnistuneita tärähtämättömiä kuvia. Lisäksi tyynellä säällä lentoaika on pidempi, sillä kopterin ei tarvitse käyttää lentoreitillään pysyäkseen ylimääräistä tehoa tuulta vastaan. Multikopterien tuulenkesto vaihtelee malleittain. Vaikuttavat tekijät ovat moottoreiden teho ja ohjainyksikön reagointinopeus vaihtelevaan puuskittaiseen tuuleen. Testissä käytetylle DJI S800 EVO -multikopterille valmistaja suosittelee tuulta alle 8 m/s [17].

4.3 Esimerkkikohteen kuvaus

Helsingin kielilukion kuvaus suoritettiin 10.3.2015. Kuvauspäivänä oli pilvipouta ja puuskittainen noin 5 m/s puhaltava tuuli. Kuvauksessa olivat mukana Helsingin rakennusviraston mittausmiehet Teuvo Karkkulainen ja Markku Nuutinen. Karkkulainen vastasi kameran hallinnasta, ja Nuutinen mittasi signaalipisteiden sijainnit takymetrilla. Multikopterin lennätysten suoritti tämän työn kirjoittaja.

Kun signaalipisteet oli kiinnitetty ja mitattu, laitettiin multikopteri lentokuntoon. Ensimmäiseltä lennätyspaikalta (kuva 8) lennettiin yhden täyden akun antama lentoaika noin 10 minuuttia. Lennon aikana keskityttiin rakennuksen itäpuoliseen vesikattoon ja julkisivuun, jotka kuvattiin eri korkeuksilta ja kuvakulmista (kuva 9).



Kuva 9. Esimerkkikuvia ensimmäisen lennätysten lentoreitiltä.

Toinen lennätys suoritettiin rakennuksen länsipuolelta toiselta lennätyspaikalta (kuva 8) keskittyen rakennuksen länsipuolen vesikattoon ja julkisivuun (kuva 10). Jälleen lennettiin koko akun antama lentoaika, noin kymmenen minuuttia.



Kuva 10. Esimerkkikuvia toisen lennon lentoreitiltä.

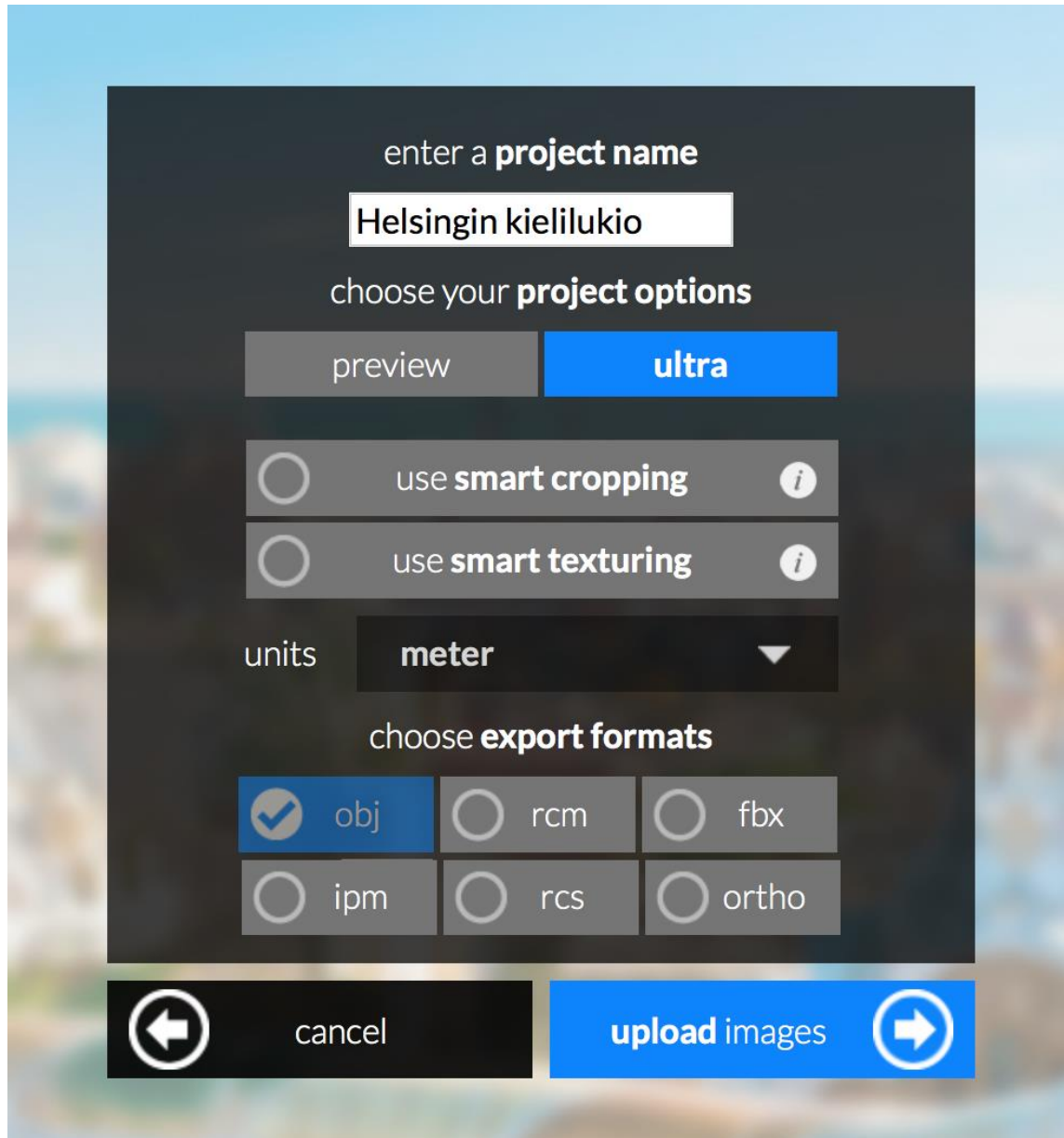
Kahdelta lennolta kuvia kertyi yhteensä 285 kappaletta. Aikaa koko työsuoritus vei noin puolitoista tuntia, josta signaalipisteiden kiinnitysten sekä niiden mittausten osuus oli tunti ja lennätyksen osuus puoli tuntia. Vertailuna rakennuksen julkisivun ja vesikaton laserkeilaus kesti yhteensä noin puolitoista työpäivää. Laserkeilaus oli suoritettu jo aikaisemmin osana koko rakennuksen mittaustyötä.

4.4 Kuvien prosessointi Autodesk ReCap 360 -ohjelmalla

Otetuista kuvista karsitaan pois tärhtäneet tai muilla tavoin epäonnistuneet kuvat. ReCap 360:n tukema kuvien maksimi lukumäärä on 250. Mikäli epäonnistuneiden kuvien poiston jälkeen kuvia on yhä yli sallitun rajan, voidaan kuvia harventaa paikoista, joissa on runsaasti päällekkäistä peittoa samoista kuvakulmista. Kielilukion kuvasarjasta seitsemän kuvaa oli tärhtänyt, joten onnistuneista kuvista piti harventaa vielä 28 kappaletta.

Sovellukseen kirjaudutaan verkko-osoitteessa <https://recap360.autodesk.com> ja sivustolla luodaan uusi kuvaprojekti. Projekti nimetään ja valitaan halutut asetukset (kuva 11). Valittavina tiedostomuotoina on mm. Autodeskin pistepilvimuoto RCS (Reality Capture

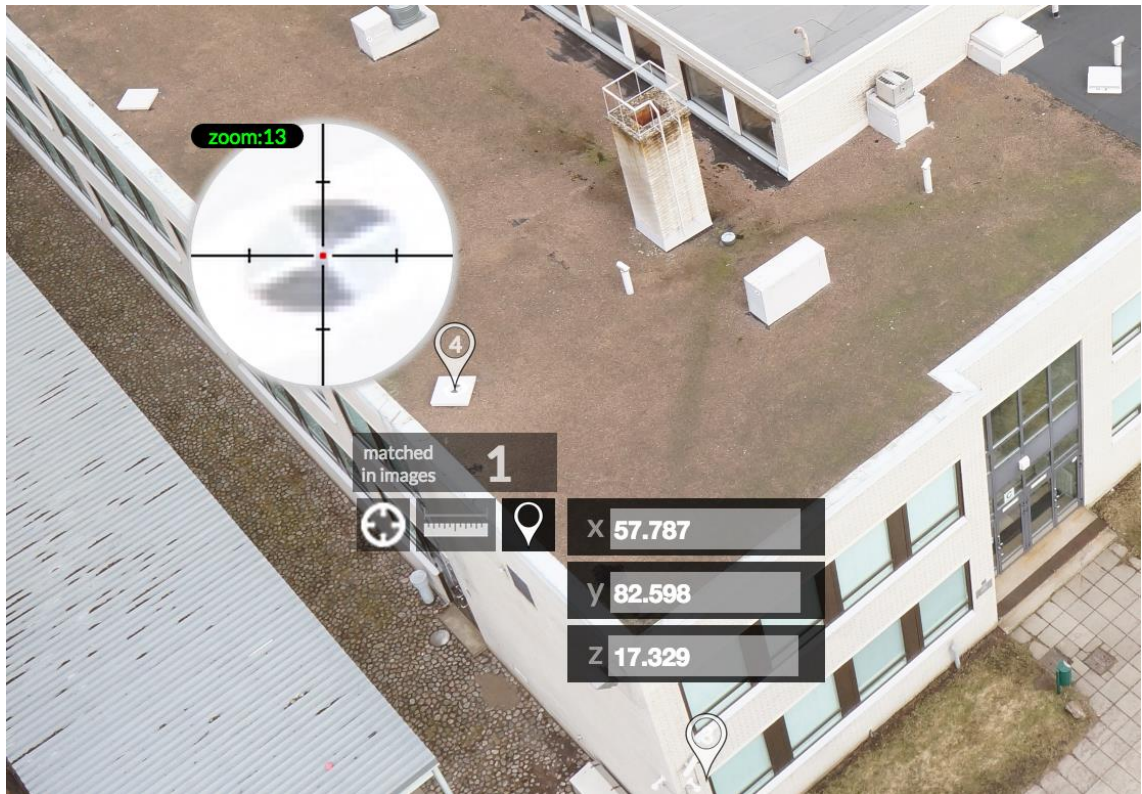
Scan), TIN-muoto RCM (Reality Capture Mesh) tai ortokuva [22]. Kun halutut asetukset on valittu, siirrytään lataamaan kuvat sovellukseen.



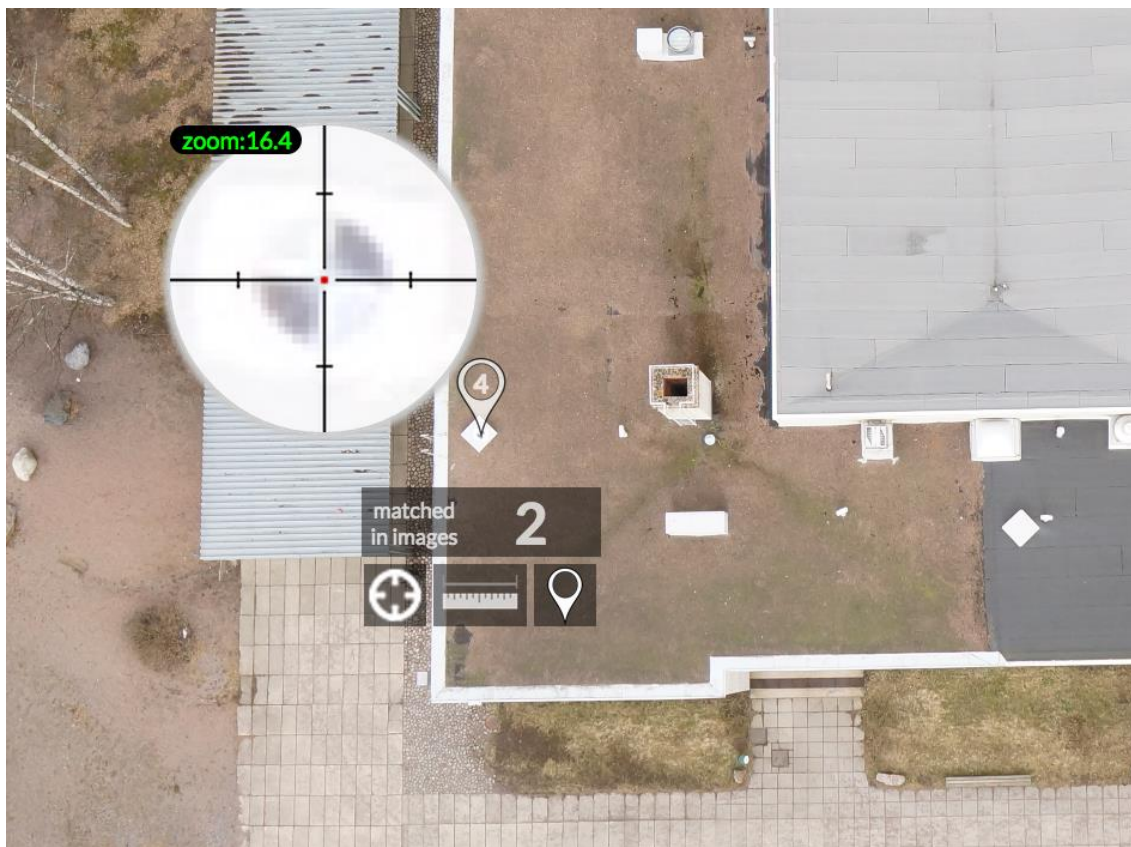
Kuva 11. Projektin nimeäminen ja asetukset ReCap 360 -sovelluksessa [22].

Kuvien latauksen jälkeen aloitetaan kuvien rekisteröinti. Rekisteröintivälilehti aukeaa, kun sovellusikkunan oikeasta alakulmasta kytketään päälle advanced tools -nappi. Rekisteröintinäkylässä pidetään yhtä aikaa auki kahta kuvaa. Ensimmäisessä kuvassa merkitään kuvassa näkyvä signaalipiste. Merkitsemistyökäluna toimii hiiren rullalla suurennettava tähtäysristikko. Toiseen kuvanäkymään valitaan eri kulmasta otettu kuva,

jossa on sama signaalipiste näkyvissä. Signaalipiste merkitään myös tähän kuvaan (kuva 12 ja 13). Samalla menetelmällä sama signaalipiste tulee merkitä neljään eri kuvaan. Signaalipisteelle annetaan koordinaatit pinnikuvakkeen alta metreinä, yhden millimetrin tarkkuudella (X = itä, Y = pohjoinen, Z = korkeus) (kuva 12).



Kuva 12. Signaalipiste nro. 12 merkittynä ensimmäisellä kuvalla ja mitatut koordinaatit syötettyinä. Kuva: Autodesk ReCap 360.



Kuva 13. Signaalipiste nro. 12 merkittynä toisella kuvalla. Kuva: Autodesk ReCap 360.

Edellä kuvattu menetelmä toistetaan samalla tavalla kaikissa signaalipisteissä siten, että jokainen signaalipiste on merkittynä neljässä eri kuvassa. Parhaimmassa tapauksessa yhden signaalipisteen merkityt kuvat ovat mahdollisimman paljon toisistaan eroavista kuvakulmista otettuja.

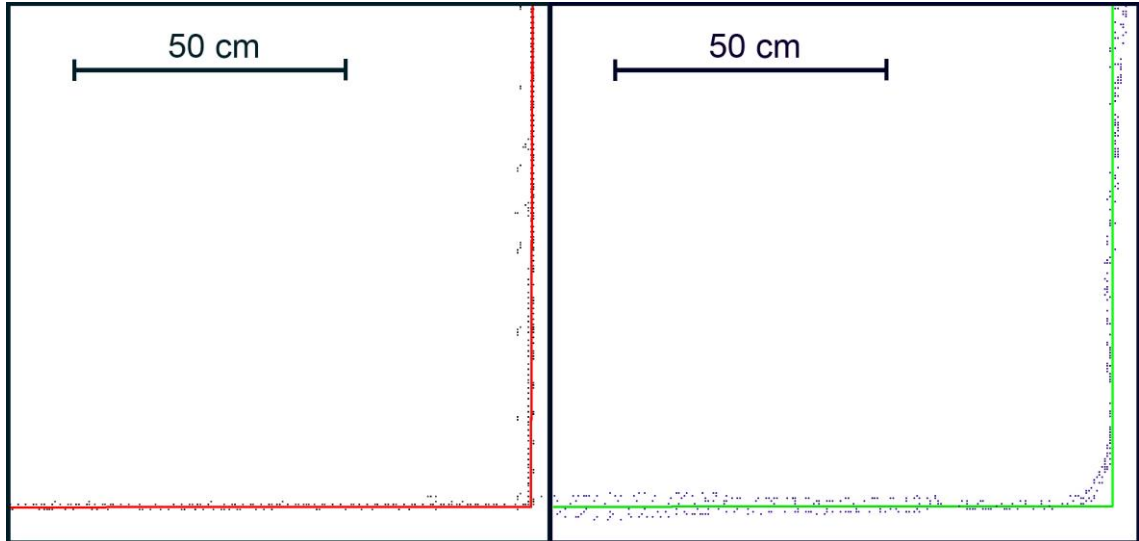
Rekisteröinnin valmistuttua kuvat voidaan lähettää palvelimelle laskettavaksi. Laskenta-aika riippuu kuvien lukumäärästä, valituista asetuksista sekä palvelimen ruuhkaisuudesta. Esimerkkikohteen laskenta kesti 12 tuntia. Laskennan edistymistä voi seurata sovelluksen pääsivustolla, <https://recap360.autodesk.com>. Käyttäjä saa sähköpostiinsa ilmoituksen, kun malli on valmis. Mallin karkeaa versiota pystyy esikatselamaan internet-selaimessa, ja tarkka malli ladataan paikalliselle koneelle halutussa tiedostomuodossa.

5 Tarkkuus ja siihen vaikuttavat tekijät

5.1 Pistepilven tulkinta

Kun mallintamisen lähtöaineistona käytetään pistepilveä, on mallintaminen käytännössä pistepilven tulkintaa. Tulkinnalla tarkoitetaan sitä, että esimerkiksi seinän pinta mallinetaan seinästä muodostuneen pistepilvitason keskiarvon mukaan. Suorasta seinäpinnasta mitattu pistepilvi ei tyypillisesti ole täysin tasainen. Laserkeilaimet aiheuttavat niin kutsuttua kohinaa, joka tarkoittaa pistepilven pientä aaltoilua. Pistepilven kohina on tunnistettavissa ja huomioitavissa mallinnusvaiheessa. Myös todelliset seinät ovat harvoin täysin tasapintaisia. Pienimmät seinäpinnan epätasaisuudet jätetään huomiotta, ja malliin tehdään yksinkertaistettu tasainen seinä.

Tarkkuutta tarkasteltaessa ei ole siis tarkoituksen mukaista tutkia pistepilven yksittäisten pisteiden sijaintitarkkuutta, vaan keskittyä pistepilviryhmistä tulkittujen rajapintojen sijaintien tarkasteluun. Esimerkiksi rakennuksen nurkkapiste on kahdesta seinäpinnasta tulkittujen vektorien leikkauskohta (kuva 14).



Kuva 14. Laserkeilaimen pistepilvestä (vasen) ja valokuvista lasketusta pistepilvestä (oikea) tulkitut seinälinjat ja nurkat.

Valokuvista lasketun pistepilven tarkkuutta verrataan kohteesta laserkeilaamalla mitattuun pistepilveen. Kuten mikä tahansa mittaus, myös laserkeilaus sisältää mittausvirhettä. Laserkeilaaminen on kuitenkin tarkin mahdollinen sekä käytännöllisin keino suuren rakennuskokonaisuuden kolmiulotteiseen mittaamiseen.

5.2 Tarkkuuteen vaikuttavat tekijät

Tarkkuuteen vaikuttaviksi tekijöiksi voidaan laskea ainakin seuraavat muuttujat:

- kuvien lukumäärä
- kuvien ottopaikat ja -etäisyydet
- kameran laatu
- kuvausolosuhteet
- signaalipisteiden lukumäärä
- signaalipisteiden sijainti.

Kuvien määrää vähentämällä heikennetään kuvapeittoa, jolloin mahdollisten vastinpisteiden määrä pienenee ja fotogrammetrisen laskennan luotettavuus heikkenee. Kuvamäärän vaikutusta tutkittiin laskemalla ReCapilla malli 75 kuvalla. Kuvanottoaikojen tasaisuuden säilyttämiseksi, kuvia harvennettiin tasaisesti lentoreittien kaikista kohdista.

Signaalipisteiden vaikutusta tutkittiin käyttäen laskennassa ensiksi kaikkia kahtatoista signaalipistettä. Tämän jälkeen laskettiin uusi malli käyttäen ainoastaan kuutta alas seiniin kiinnitettyä signaalipistettä (kuva 7).

Kameran vaikutusta tutkittiin suorittamalla kohteen kuvaus myös pienellä DJI Phantom -multikopterilla ja siihen kiinnitetyllä GoPro Hero4 Black -kameralla (kuva 15). GoPron 12 megapikselin kuvakennon ja kalansilmäobjektiivin tuottamat kuvat ovat paljon heikompi-laatuisia kuin Sony NEX7:n 24 Mpx:n kuvat (kuva 16). Koska DJI Phantomilla lennetyt lentoreitit ja GoProlla kuvattujen kuvien ottopaikat eivät ole identtiset DJI S800 EVO:n lentoreittien ja Sony NEX7:n kuvanottoaikojen kanssa, on vertailua tarkasteltava varauksin.



Kuva 15. Pääkamerana käytetty Sony NEX7 ja vertailukamerana käytetty GoPro Hero4 Black.

GoPron kalansilmäobjektiivin tuottama laaja kuvakulma aiheuttaa kohteiden piirtymisen pieninä, joten maastopikselit ovat suuria. Kuvan 16 kuvapari on otettu suunnilleen samalta etäisyydeltä rakennuksen suhteen. Rakennuksen elementit piirtyvät samasta kuvaväistyäisyydestä huolimatta pienempinä GoProlla otetussa kuvassa. Kuva havainnollistaa myös eron kameroiden tuottamien resoluutioiden suuruuksissa.



Kuva 16. Sony NEX7:n kuva (vasen) ja GoPro Hero4 Black:n kuva (oikea) lähes samasta paikasta kuvattuna.

Kaiken kaikkiaan eri lähtötiedoista laskettavia kuvapistepilviä tuli vertailuun neljä kappaletta taulukon 2 mukaisesti.

Taulukko 2. Vertailussa olevat pistepilvet lähtötietoineen.

Pistepilvi	Selite
Laserkeilain	Laserkeilaimilla mitattu referenssinä käytettävä pistepilvi.
12 signaalia, 250 kuvaa	250 kuvasta ja kaikkia 12 signaalipistettä käyttäen laskettu pistepilvi.
6 signaalia, 250 kuvaa	250 kuvasta ja kuudesta alhaalla seinissä sijainneista signaalipisteistä laskettu pistepilvi.
12 signaalia, 75 kuvaa	75 kuvasta ja kaikkia 12 signaalipistettä käyttäen laskettu pistepilvi.
GoPro	GoPro:n 250 kuvasta ja kaikkia 12 signaalipistettä käyttäen laskettu pistepilvi.

Pistepilvet on taulukoitu lähtötietojen perusteella oletettuun paremmuusjärjestykseen.

5.3 Yleiset tietomallivaatimukset 2012

Kansalliset tietomallien tarkkuusvaatimukset on säädetty usean tahon yhteisessä CO-BIM (Common BIM) -kehittämishankkeessa. Kehittämishankkeen pohjalta on julkaistu Yleiset tietomallivaatimukset 2012 -dokumenttikokonaisuus [18]. Dokumentin toisessa osassa selostetaan vanhojen rakennusten inventointimallien tarkkuusvaatimukset, jotka ovat

- rakennusosien nurkkapisteissä 10 mm

- pinnoilla, esim. seinissä ja lattioissa 25 mm
- vanhoissa epäsäännöllisissä rakenteissa, esimerkiksi vesikattorakenteissa 50 mm. [19]

Edelle luetut tarkkuudet muodostavat tavoitteet, joihin tuloksia verrataan. Dokumentissa mainitaan myös, että käytettävä mallitarkkuus sovitaan projektikohtaisesti. Lisäksi mainitaan, että tarkkuus voi vaihdella rakennuksen eri osien välillä. [19]

5.4 Tulosten tarkastelu

Tulosten tarkastelua varten on tärkeä valita merkitykselliset kohteet. Tarkastuspisteinä toimivat mm. rakennuksen nurkkapisteet, joille YTV 2012 antaa tiukimmat tarkkuusvaatimukset (10 mm). Korkeuden tarkastelua varten pistepilvistä on valittava selkeästi tunnistettavia tasoja, joilta korkeus on luotettavasti tulkittavissa. Korkeuksien tavoitetarkkuudeksi voidaan asettaa YTV 2012:n tasojen 25 millimetrin vaatimus. Muita tarkasteltavia kohteita ovat selkeästi erottuvat vesikaton kohteet.

Tarkkuuksien tutkimista varten pistepilvet avattiin Bentley Microstation -ohjelmassa omille tasoilleen. Nurkkapisteiden määrittämistä varten pistepilvistä leikattiin seinäosuu-
det ylimmän ikkunarivistön ja kattoräystään välistä. Leikatut pistepilvet asetettiin ylänäky-
mään seinälinjan piirtämistä varten. Seinälinjat piirrettiin vuoron perään toisistaan riippu-
mattomina jokaisen pistepilviversion seinän pistetason keskiarvon perusteella ja piirretyt
vektorit leikattiin nurkista kuvan 14 mukaisesti. Määritettyjen nurkkien koordinaatit tallen-
nettiin jokaisesta versiosta. Edellä mainittu menetelmä toistettiin myös katolla sijaitse-
vaan liikuntasalin korotuksen seiniin.

Korkeuden tarkastelua varten katolta valittiin ilmanvaihtolaitteiden vaakasuorassa ole-
vista päällisistä noin puolen neliömetrin alueet. Valittujen alueiden pistepilvien pisteiden
Z-koordinaateista laskettiin keskiarvot eli päällisten keskikorkeudet.

5.4.1 Nurkkapisteiden tarkkuudet

Eri valokuvapistepilvistä mallinnettujen rakennuksen nurkkien sijaintivirheet laserkeilaimen pistepilvestä mallinnettuihin nurkkiin verrattuna on esitetty taulukossa 3. Nurkkapisteeet on numeroitu myötäpäiväisessä järjestyksessä alkaen lounaisnurkasta ja päättyen kaakkoisnurkkaan.

Taulukko 3. Rakennuksen nurkkapisteiden sijainnit laserkeilaimen pistepilvessä ja valokuvapistepilvien erot millimetreinä.

Rakennus	nurkka 1		nurkka 2		nurkka 3		nurkka 4	
	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	X	Y	X (m)	Y (m)
Laserkeilain	49,778	83,991	132,411	84,081	132,425	50,058	49,800	49,998
	ero (X)	ero (Y)	ero (X)	ero (Y)	ero (X)	ero (Y)	ero (X)	ero (Y)
12 signaalia, 250 kuvaa	10 mm	-24 mm	2 mm	-6 mm	-1 mm	-8 mm	-21 mm	-26 mm
6 signaalia, 250 kuvaa	21 mm	-25 mm	7 mm	-1 mm	-1 mm	-7 mm	-38 mm	-31 mm
12 signaalia, 75 kuvaa	-26 mm	-80 mm	-1 mm	-12 mm	14 mm	23 mm	-15 mm	-6 mm
GoPro	-9 mm	-10 mm	-2 mm	-10 mm	99 mm	-22 mm	-43 mm	8 mm
	nurkka 1	nurkka 2	nurkka 3	nurkka 4				
	ero (XY)	ero (XY)	ero (XY)	ero (XY)				
12 signaalia, 250 kuvaa	26 mm	7 mm	8 mm	32 mm				
6 signaalia, 250 kuvaa	33 mm	7 mm	7 mm	49 mm				
12 signaalia, 75 kuvaa	84 mm	12 mm	28 mm	16 mm				
GoPro	13 mm	11 mm	102 mm	44 mm				

Tuloksista huomataan, että pistepilvien oletettu paremmuusjärjestys toteutuu, vaikkakin tarkkuudet vaihtelevat nurkittain paljon. Nurkalla 2 on pienimmät erot jokaisessa pistepilvessä. Ensimmäisen ja toisen pistepilven tarkkuuksissa ei ole merkittäviä eroja. Valokuvien lukumäärän vähentäminen 75:een kasvattaa selvästi nurkan 1 ja 3 virheitä. Heikkolaatuisen GoPro-kameran vaikutus näkyy joukon suurimpana virheenä nurkalla 3. Nurkkapisteiden tarkkuusvaatimukseen (10 mm) päästään nurkissa 2 ja 3 kummassakin NEX7:n 250 kuvan versiossa.

Nurkkapisteiden tarkastelu tehtiin myös katolla sijaitsevan liikuntasalin korotuksen kulumista. Tulokset on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Liikuntasalin kattokorotuksen nurkkapisteiden sijainnit ja erot millimetreinä.

Liikuntasalin korotus	nurkka 1		nurkka 2		nurkka 3		nurkka 4	
	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	X	Y	X (m)	Y (m)
Laserkeilain	57,8872	73,4669	86,4247	73,4946	86,4322	60,5371	57,9097	60,522
	ero (X)	ero (Y)	ero (X)	ero (Y)	ero (X)	ero (Y)	ero (X)	ero (Y)
12 signaalia, 250 kuvaa	4 mm	-23 mm	8 mm	-11 mm	21 mm	-5 mm	-6 mm	-8 mm
6 signaalia, 250 kuvaa	5 mm	45 mm	9 mm	-9 mm	28 mm	-3 mm	-2 mm	-19 mm
12 signaalia, 75 kuvaa	12 mm	-59 mm	12 mm	-12 mm	29 mm	-26 mm	-4 mm	19 mm
GoPro	-20 mm	33 mm	6 mm	40 mm	8 mm	29 mm	-12 mm	34 mm
	nurkka 1	nurkka 2	nurkka 3	nurkka 4				
	ero (XY)	ero (XY)	ero (XY)	ero (XY)				
12 signaalia, 250 kuvaa	24 mm	13 mm	21 mm	10 mm				
6 signaalia, 250 kuvaa	46 mm	13 mm	28 mm	20 mm				
12 signaalia, 75 kuvaa	61 mm	17 mm	39 mm	19 mm				
GoPro	38 mm	41 mm	30 mm	36 mm				

Tulosten paremmuusjärjestys noudattelee jälleen oletettua järjestystä. Tosin suurin yksittäinen virhe (61 mm) on 75 kovalta lasketun pistepilven nurkalla 1. Keskimääräisesti GoPro:n pistepilvi on kuitenkin edelleen heikoin. Kuuden signaalipisteen versiossa näkyy tarkkuuden heikentyminen verrattuna ensimmäiseen pistepilveen, jossa katon signaalipisteet olivat käytössä. Ensimmäisen pistepilven kaikki arvot riittävät YTV 2012:n määrittämän tasojen 25 millimetrin tarkkuusvaatimukseen [19].

5.4.2 Korkeuden tarkastelu

Korkeustarkkuuden tutkimista varten katolta valittiin tarkasteluun viiden ilmanvaihtolaitteen vaakatasossa olevat päälliset. Päällisten pistepilvistä rajattiin noin puolen neliömetrin omat pistepilvet. Näiden rajattujen pistepilvien yksittäisten pisteiden Z-koordinaateista laskettiin keskiarvot. Saaduista keskikorkeuksista laskettiin erot suhteessa laserkeilaimen pistepilvistä saatuihin keskikorkeuksiin. Tulokset on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Eri pistepilvien keskikorkeuksien erot millimetreinä laserkeilaimen pistepilven keskikorkeuksiin verrattuna.

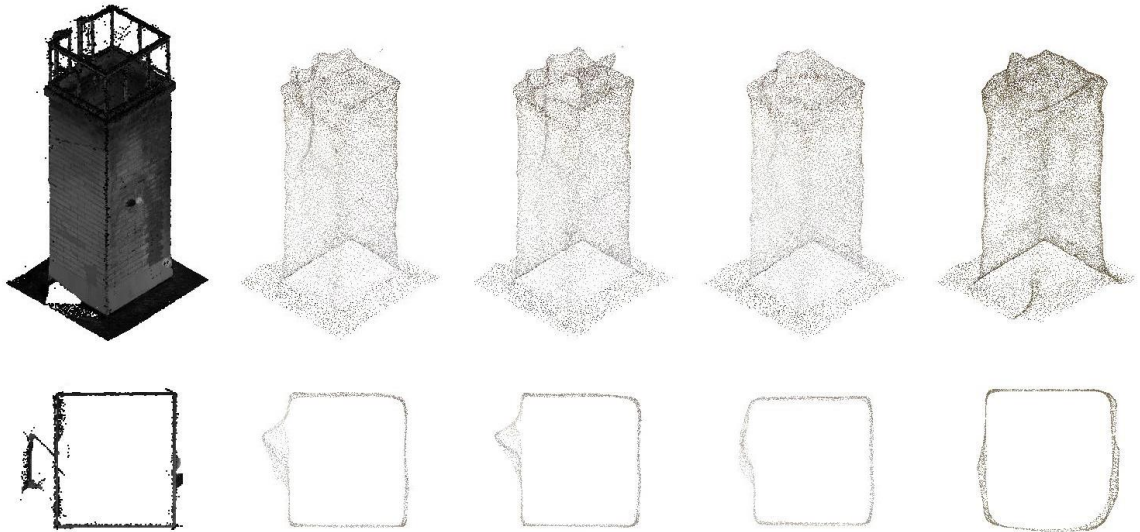
	korkeus 1	korkeus 2	korkeus 3	korkeus 4	korkeus 5
Laserkeilain	18,032 m	18,134 m	18,036 m	18,020 m	18,015 m
	ero (mm)	ero (mm)	ero (mm)	ero (mm)	ero (mm)
12 signaalia, 250 kuvaa	4	-12	13	6	16
6 signaalia, 250 kuvaa	1	-9	10	12	9
12 signaalia, 75 kuvaa	-26	18	20	15	20
GoPro	30	53	62	26	58

Parhaimmat tulokset saadaan ensimmäisestä ja toisesta valokuvapistepilvestä. Näiden kahden pistepilven tulokset riittävät hyvin YTV 2012:n määrittämään tasojen 25 millimetrin tarkkuuteen. Kuudesta signaalista lasketun pistepilven poikkeamat ovat keskimäärin jopa hieman pienemmät kuin 12 signaalin pistepilvessä. Signaalipisteiden lukumäärällä ei näytä siis olevan merkitystä korkeuden tarkkuuteen. Kuvapeiton väheneminen näkyy selvästi korkeusvirheiden kasvamisena 75 kuvan pistepilvessä. Kaikista heikoimmat korkeuslukemat antaa GoPron pistepilvi.

5.4.3 Visuaalinen tarkastelu

Visuaalinen tarkastelu on tärkeä osa kolmiulotteisen mittausaineiston tutkimista. Vaikka silmämääräisellä tutkimisella ei synnykään vertailtavia lukuarvoja, saadaan tarkastelussa selville olennaisia asioita. Tarkastelun kohteena on esimerkiksi geometrian säilyminen erimuotoisissa ja kokoisissa kohteissa, tai kuvattavan rakennuksen pintamateriaalien ja tekstuuriin vaikutus laskettavaan pistepilveen. Visuaalinen tarkastelu edesauttaa myös mallinnusvaiheen tulkintaa.

Kielilukion pistepilveä tarkastelemalla huomataan, että pienimmät kohteet kuten katto-
luukut kadottavat geometriansa helposti. Terävät kulmat pyöristyvät ja tasaisilla pinoilla
syntyy pientä aaltoilua. Kameran laadulla ja kuvapeitolla on merkittävä vaikutus geometri-
an säilyvyyden kannalta. Kuvassa 17 tarkasteluun on rajattu jokaisesta pistepilvestä
rakennuksen katolla sijaitseva piippu. Pistepilvet ovat paremmuusjärjestyksessä taulu-
kon 2 mukaisesti siten, että vasemmassa reunassa on laserkeilaimen pistepilvi ja oike-
assa reunassa GoPron pistepilvi.



Kuva 17. Piipun geometrian säilyvyys eri pistepilvillä. Kuva: Autodesk Revit.

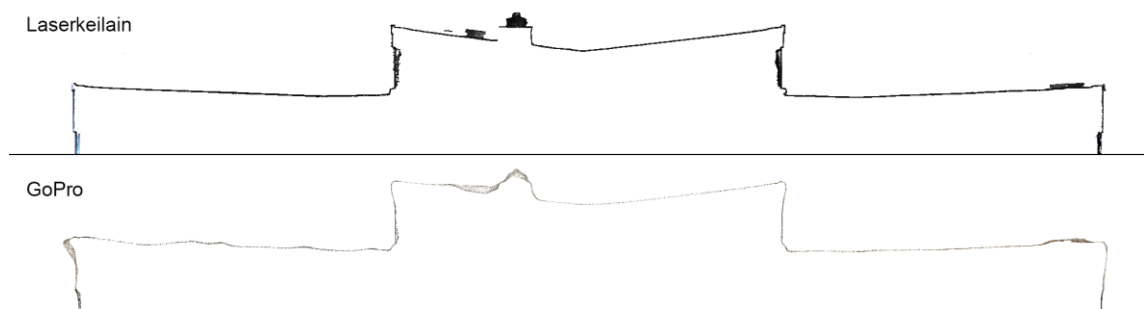
Kuvasta huomataan, että pienet kohteet kuten piipun kyljessä olevat tikkaat tai huipulla sijaitsevat kaiteet mallintuvat huonosti tai ei ollenkaan. Kaikissa Sony NEX7:lla kuvatuissa pistepilvissä tikkaat erottuvat kohoumina pystyleikkauskuvissa, mutta GoPron pistepilvessä tikkaita ei näy lainkaan. GoPron pistepilvi on muutoinkin geometrialtaan heikoin.

Kielilukion katon länsipuoli on soran peitossa ja itäpuolella on musta huopakatto. Sorakaton vaihteleva tekstuuri on vastinpisteiden löytämisen kannalta paljon parempi kuin huopakaton tumma tasaväri. Kattojen erilaisten tekstuurien vaikutuksen huomaa jokaisessa pistepilvessä. Pistetiheys sorakaton puolella on huomattavasti suurempi kuin huopakaton puolella. Kuvassa 18 eron näkee selvästi NEX7:n 250 kuvan ja 12 signaalin pistepilvessä.



Kuva 18. Pistetiheyden ero mustalla huopakatolla (vasen) ja sorakatolla (oikea). Kuva: Autodesk Revit.

Pistetiheyden lisäksi tekstuuri vaikuttaa pistepilven tarkkuuteen. Vastinpisteiden suuremman lukumäärän ansiosta sorakaton pinnassa on vähemmän aaltoilua kuin huopakatolla. Kuvassa 19 eron huomaa GoPron pistepilven leikkauksesta verrattuna laserpistepilven leikkaukseen.



Kuva 19. Leikkaus laserkeilaimen ja GoPron pistepilvien samoista kohdista. Mustan huopakaton aaltoilu näkyy GoPron pistepilven vasemmalla kattolappeella. Kuva: Autodesk Revit.

Kuvassa 19 on myös nähtävissä pienempien kohteiden geometrian katoaminen katolla sijaitsevan poistoilmapiputken ja sen vieressä olevan kattoluukun osalta.

6 Yhteenveto

Multikopterien yleistyminen on selkeästi muokannut UAV-lennokkitoimintaa. Multikopterien lennättämisen nopea oppiminen on madaltanut kynnystä hyödyntää lennokkeja ilmakuvauksessa. Tarkasti ja vakaasti lentävän multikopterin hallinnan oppii muutamassa tunnissa, kun perinteisten lennokkien lennättäminen vaatii pidempiaikaista syventymistä. Multikopterien lento-ominaisuuksien ansiosta onnistuu myös sellaisten kohteiden kuvaus, joihin perinteisillä siipilennokeilla ei ole mahdollista lentää.

Mittauskäytössä multikopterit avaavat uusia mahdollisuuksia pienimittakaavaiseen ilmakuvaukseen. Siipilennokeissa kamera on kiinnitetty kiinteästi lennokkiin osoittaen suoraan alaspäin, kun taas multikopteriin kiinnitetyllä gimbaalilla saadaan aina haluttu kuvakulma huolimatta kopterin kallisteluista. Tehokkaat multikopterit mahdollistavat myös raskaiden järjestelmäkameroiden käytön ilmakuvauksessa. Järjestelmäkameroiden tarkkuus on huomattavasti parempi kuin siipilennokeissa tyypillisesti käytettyjen kevyiden pokkarikameroiden. Kun kuva-aineiston tarkkuus on suuri, saadaan myös fotogrammetrisesti tuotetusta mittausaineistosta entistä tarkempaa. Multikoptereissa tullaan tulevaisuudessa kasvavissa määrin näkemään kameran lisäksi myös muita mittainstrumentteja, mistä Rieglin laserkeilaimella varustettu RiCopter on hyvä osoitus.

Tämän työn tarkoituksena oli selvittää, kuinka hyvin multikopterikuvaamalla rakennuksen vesikatosta tuotettu pistepilvi soveltuu rakennuksen inventointimallin mittausaineistoksi YTV 2012:n tarkkuusvaatimukset huomioiden. Helsingin kielilukion Autodeskin ReCapilla lasketut pistepilvet eroavat Leican laserkeilaimien pistepilvistä parhaimmillaan vain muutaman senttimetrin. Korkeimmillaankin NEX7:lla kuvatuissa täyden 250 kuvan pistepilvissä erot jäävät alle 5 senttimetrin, mikä riittää YTV 2012:n ilmoitettuihin kattorakenteiden 50 millimetrin tarkkuusvaatimuksiin. Rakennuksen nurkkapisteiden 10 millimetrin tarkkuusvaatimus ei toteutunut kaikilta osin. Toisaalta rakennuksen nurkkapisteet voidaan mitata helposti ja luotettavasti katutasolta joko laserkeilaimella tai takymetrillä. Näin ollen valokuvapistepilvien tarkkuudet rakennuksen nurkkapisteiden osalta eivät ole merkitykseltään ratkaisevia.

Tarkkuuteen vaikuttavista tekijöistä merkittävimmät ovat kameran tuottamien kuvien laatu, riittävä kuvapeitto ja kuvauskohteen pintatekstuuri. Signaalipisteiden sijainneilla ja lukumäärillä ei näytä olevan suurta vaikutusta tarkkuuteen.

Tulosten osalta on otettava huomioon, että tarkkuuslukemat on saatu yhden mittauskohteen perusteella. Lisäksi vertailuaineistona toiminut laserkeilausaineisto ei ole absoluuttisen tarkkaa. Tulosten luotettavuuden vahvistamiseksi tarkkuutta tulisi mahdollisuuksien mukaan tarkastella useamman mittauskohteen osalta.

Saatujen tulosten perusteella multikopterikuvaus otetaan käyttöön Helsingin kaupungin rakennusviraston Arkkitehtuuriosastolla osana rakennusten mittaustyötä. Menetelmä mahdollistaa jyrkkien vesikattojen helpon, nopean ja turvallisen mittaamisen. Aikaisemmin harjakattoiset vesikatot on mitattu mahdollisuuksien rajoissa viereisistä rakennuksista ja nostureista, tai ne ovat jääneet kokonaan mittaamatta. Puuttuvien mittausten tarkkia mallintaminen on joissakin tapauksissa jouduttu tekemään vanhojen ja epätarkkojen paperipiirustusten perusteella. Mittausaineiston lisäksi multikopterikuvauksella saadut valokuvat toimivat tärkeänä dokumentointina erityisesti vanhoista arvorakennuksista.

[30]

Lähteet

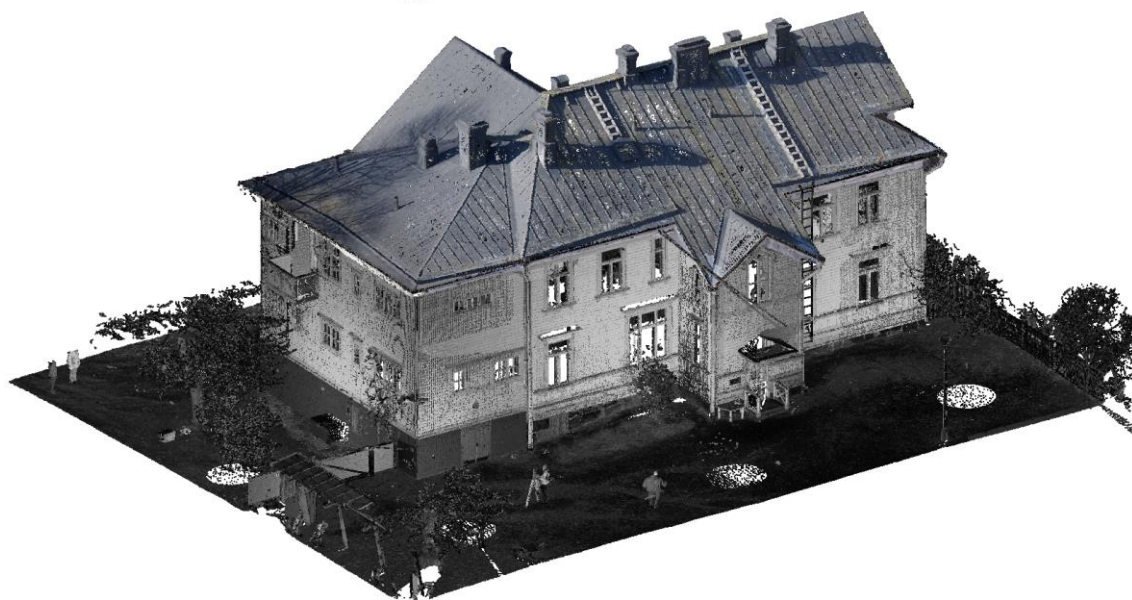
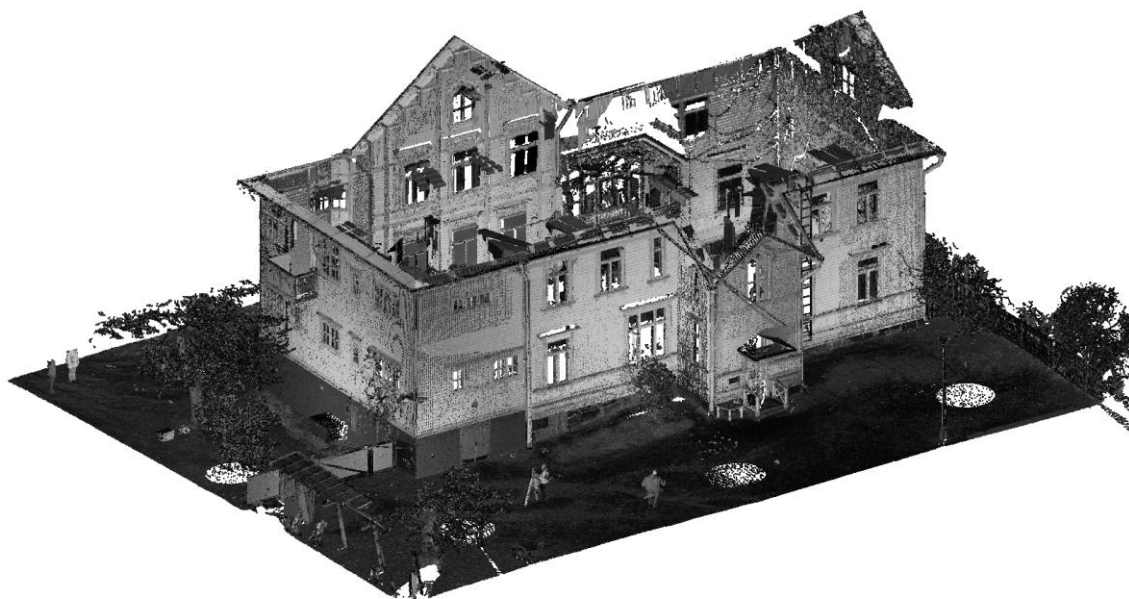
- 1 Kamerahelikopteri tarkkailee Laukaan räjähdysvaaraa. 10.7.2013. MTV-verkkouutinen. Verkkodokumentti. MTV. <<http://www.mtv.fi/uutiset/kotimaa/artikkeli/kamerahelikopteri-tarkkailee-laukaan-rajahdysvaaraa/1906282>> Luettu 28.2.2015
- 2 RIEGL Release Video of RiCOPTER UAV Flight Demonstration. 23.10.2014. DRONELIFE-verkkouutinen. Verkkodokumentti. DRONELIFE.com. <<http://dronelife.com/2014/10/24/riegl-release-video-ricopter-uav-flight-demonstration/>> Luettu 28.2.2015
- 3 Etäohjatun ilmailun aikakausi. Ilmailu-lehti. 1/2015. Lehtiartikkeli.
- 4 Lentävä kalupakki. Tekniikka&Talous-lehti. 30.1.2015. Lehtiartikkeli.
- 5 Ohjausyksiköt. 2014. Verkkodokumentti. Multicoptercenter.com. <<http://multicoptercenter.fi/pro-multicopters/flight-controllers.html>> Luettu 25.2.2015
- 6 Lentoaluksen kiertymiskulmat. 2013. Verkkodokumentti. The Boredengineerings. <<http://theboredengineers.com/WordPress3/wp-content/uploads/2012/05/Pitch-RollYaw.png>>
- 8 Lentotyötä koskeva määräys on annettu. 2015. Verkkodokumentti. Trafi. <http://www.trafi.fi/tietoa_trafista/ajankohtaista/3191/lentotyota_koskeva_maarays_on_annettu> Luettu 24.2.2015
- 9 Lausuntopyyntö ilmailumääräyksen OPS M1-23 muuttamisesta. 2014. Verkkodokumentti. Trafi. <http://www.trafi.fi/tietoa_trafista/ajankohtaista/2518/lausuntopyynto_ilmailumaarayksen_ops_m1-23_muuttamisesta> Luettu 24.2.2015
- 10 Miehittämättömille ilma-aluksille erittäin liberaalia sääntelyä. 6.2.2015. Verkkouutinen. Trafi. <http://www.trafi.fi/tietoa_trafista/ajankohtaista/3174/miehittamattomille_ilma-aluksille_erittäin_liberaalia_saantelya> Luettu. 26.2.2015
- 11 Trafi ilmailulaki - muutoksia 2014. Verkkokeskustelu. Kopterit.net. <<http://www.kopterit.net/index.php?topic=21712.350>> Luettu 26.2.2015

- 12 Aluevalvontalaki. 18.8.2000/755. Verkkodokumentti. Finlex. <<http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2000/20000755>> Luettu 26.2.2015
- 13 Hassinen, Alpo. 2013. UAV-lennokit, kokemuksia UAV-laitteista. Mekrijärven tutkimusasema, Itä-Suomen yliopisto. (PDF)
- 14 Miehitettämättömät ilma-alukset. 2014. Verkkodokumentti. Trafi. <http://www.trafi.fi/ilmailu/lentokelpoisuus/miehitattomat_ilma-alukset> Luettu 26.2.2015
- 15 Fotogrammetrian perusteet, luento 9. Verkkodokumentti. Aalto yliopisto. <<http://foto.hut.fi/opetus/300/luennot/9/9.html>> Luettu 30.2.2015
- 16 Laskentaraaportti. Pix4Dmapper. 16.3.2015
- 17 Wookong-M, tekniset tiedot. 2014. Verkkodokumentti. DJI. <<http://www.dji.com/product/wookong-m/spec>> Luettu 1.3.2015
- 18 COBIM. 2012. Verkkodokumentti. Rakennustieto. <<https://www.rakennustieto.fi/cobim/>> Luettu 15.3.2015
- 19 Rajala, Marko. 2012. Osa 2 Lähtötilanteen mallinnus, Yleiset tietomallivaatimukset 2012. Helsinki. Tietoa Finland Oy.
- 20 Jokinen, Ari-Pekka. 2014. UAV-kuvaus kiviainesten kartoituksessa. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 21 Lasketut kamerapaikat. Pix4Dmapper. 16.3.2015
- 22 Alkuasetukset ja valittavat kirjoitusmuodot. Autodesk ReCap 360. 14.3.2015
- 23 Drones Sacrificed for Spectacular Volcano Video. 20.2.2015. Verkkovideo. National Geographic. <<http://video.nationalgeographic.com/video/news/150220-volcano-drones-vin>> Katsottu 24.3.2015

- 24 Watch This Amazing Volcano Footage Shot By a Drone. 3.2.2015. Verkkodokumentti. Time. <<http://time.com/3693791/volcano-drone/>> Luettu 24.3.2015
- 25 Korpela, Ilkka. 2006. Fotogrammetrian ja ilmakuvauksen perusteita. Powerpoint-luentosarja. Geodeettinen laitos.
- 26 Haggrén, Henrik. 2002. Fotogrammetrinen kartoitus, luento 4. Verkkodokumentti. Aalto yliopisto. <<http://foto.hut.fi/opetus/220/luennot/4/4.html>> Luettu 26.3.2015
- 28 Pix4D enables autonomous mapping with DJI Phantom. 13.11.2014. Verkkodokumentti. MundoGeo. <<http://mundogeo.com/en/blog/2014/11/13/pix4d-enables-autonomous-mapping-with-dji-phantom/>> Luettu 20.3.2014
- 29 Products. Verkkodokumentti. Pix4D. <<https://pix4d.com/products/>> Luettu 20.3.2014
- 30 Wilska, Pekka. 2015. Helsingin kaupungin rakennusvirasto. Työn tulosten pohjalta käyty keskustelu. 1.4.2015
- 31 Making Reality Capture Easy and Affordable. 26.3.2013. Verkkodokumentti. Autodesk. <http://inthefold.autodesk.com/in_the_fold/2013/03/autodesk-recap-making-reality-capture-easy-and-affordable-.html> Luettu 28.4.2015

Vertailukuvat Päiväkoti Kaivopuistosta, Autodesk Revit

Päiväkoti Kaivopuiston julkisivusta Leica P20 -laserkeilaimella mitattu pistepilvi (ylempi kuva) ja sen päälle liitetty multikopterikuvauksella tuotettu vesikaton pistepilvi (alempi kuva).



Vertailukuvat Jollaksen kartanosta, Autodesk Revit

Leica P20 -laserkeilaimella mitattu pistepilvi (ylin kuva), multikopterikuvauksella tuotettu valokuvapistepilvi (keskikuva) ja molempien pistepilvien yhdistelmä (alin kuva).

