

Jaakko Tawast

UAV-kuvauksen prosessointi ja laatu

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Maanmittaustekniikka

Insinööriytyö

27.4.2015

Tekijä Otsikko	Jaakko Tawast UAV-kuvauksen prosessointi ja laatu
Sivumäärä Aika	37 sivua + 2 liitettä 27.4.2015
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	maanmittaustekniikka
Ohjaaja	lehtori Jussi Laari
<p>Tämän insinööriyön tarkoituksena oli selvittää miehittämättömällä ilma-aluksella kerätyn datan prosessointia ja sen laatua. Tavoitteena oli myös tutustua UAV-ilmakuvauksen prosessiin kokonaisuutena.</p> <p>Työssä käytettiin Metropolia Ammattikorkeakoululta valmiina saatua SenseFly Ltd:n Swinglet CAM -lennokilla kuvattua ilmakehän aineistoa, jonka GSD oli n. 3,8–5 cm. Kuvattu alue oli Nokian rengastestikeskus Nokialla.</p> <p>Kuvat prosessoitiin Agisoft PhotoScan -ohjelmalla pistepilveksi, ja lisäksi käytössä oli Pix4D-palvelussa prosessoitu pistepilvi. Pistepilviä vertailtiin maastomittauksiin, jotka mitattiin käyttäen RTK- ja takymetrimittausta. Maastomittausten lisäksi pistepilviä vertailtiin Maanmittauslaitoksen pistepilveen. Vertailu suoritettiin käyttäen Microstation V8i-TerraScan- ja CloudCompare-sovelluksia.</p> <p>Lopputuloksena selvisi, että kummallakin ohjelmalla saatiin asianmukaisia tuloksia käytettyyn kalustoon ja lähtötietoihin nähden. PhotoScanin aineiston tasotarkkuuden RMS-arvoksi selvisi 5,6 cm ja korkeustarkkuuden RMS-arvo oli 4 cm. Varsinkin korkeustarkkuus oli odotuksia parempi, mutta tuloksista löytyi systemaattista korkeusvirhettä. Ongelmana UAV-ilmakuvauksessa on aineiston epäluotettavuus joihinkin käyttötarkoituksiin sekä mahdolliset rajoitukset tulevaisuudessa lainsäädännössä. Tekniikka vaikuttaa silti lupaavalta ja tulee yleistymään tulevaisuudessa.</p>	
Avainsanat	UAV, UAS, fotogrammetria

Author Title	Jaakko Tawast UAV for mapping - Processing and quality
Number of Pages Date	37 pages + 2 appendices 27 April 2015
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Land surveying technology
Instructor	Jussi Laari, Senior Lecturer
<p>The purpose of this Bachelor's thesis was to get an overall picture of UAV surveying. For this, the accuracy of the data retrieved with an unmanned aerial system and the processing of the data to a final product was studied.</p> <p>The UAV used in the final year project was a swinglet CAM. Aerial images with a ground sample distance of about 3.8–5 cm were originally used in a test project. The aerial images were processed to a point cloud using Agisoft PhotoScan. The result was compared to points measured with RTK positioning and a total station. Furthermore, the point cloud was compared to point clouds processed by Pix4D and National Land Survey of Finland. In the comparison Microstation V8i, TerraScan and CloudCompare softwares were used.</p> <p>The result showed that both programmes performed well when the prerequisites were taken into consideration. With PhotoScan, the horizontal RMS was 5.6 cm and the vertical 4 cm. Despite the possible problems with data confidence and a potential tightening of the legislation in the future, the technology looks promising and it will become ever more common.</p>	
Keywords	UAV, UAS, photogrammetry

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	UAV-ilmakuvaus	2
2.1	UAS eli miehittämätön lentolaitejärjestelmä	2
2.2	Fotogrammetria ja kaukokartoitus	2
2.3	Käyttökohteet ja markkinat	5
2.4	UAV-toimintaa koskeva lainsäädäntö ja ohjeistukset	6
2.5	Insinööriyön aineistossa käytetty lennokki ja kamera	7
3	Ilmakuvauksen suorittaminen	8
3.1	Kuvaussuunnitelma	9
3.2	Signalointi	10
3.3	Lennoikin lennätys	11
4	Aineiston prosessointi	11
4.1	Ohjelmistot ja laitteisto	11
4.2	Kameran kalibrointi	12
4.3	Prosessoinnin vaiheet	15
4.4	Vaadittavat resurssit ja prosessointiin kuuluva aika	16
4.5	UAV-kuvauksesta saatavat aineistot	17
4.5.1	DSM-, DTM- ja DEM-malli	17
4.5.2	Pistepilvi	19
4.5.3	Ortokuva	20
5	UAV-kartoituksen laatu ja geometrinen tarkkuus	22
5.1	Ortokuvan tasotarkkuus Pix4D- ja PhotoScan-ohjelmilla	24
5.2	Pistepilven korkeustarkkuus Pix4D- ja PhotoScan-ohjelmilla	26
5.2.1	Korkeustarkkuus jarrusuoralla ja ympyränmuotoisella osalla rataa	27
5.2.2	Korkeustarkkuus muissa pisteissä	30
5.3	Korkeustarkkuus verrattuna Maanmittauslaitoksen pistepilviaineistoon	30
6	Yhteenveto	33
	Lähteet	35

Liitteet

Liite 1. Agisoftin raportti projektista

Liite 2. Raportti asemoinnista – Leica Viva TS15

Lyhenteet

DEM	Digital elevation model. Digitaalinen korkeusmalli, joka sisältää normaalisti vain maanpinnan.
DTM	Digital terrain model. Digitaalinen maastomalli, joka sisältää korkeusmallin lisäksi tietoa esimerkiksi maanpinnan peitteestä.
DSM	Digital surface model. Digitaalinen pintamalli, joka sisältää maaston ylimmän korkeustason.
GSD	Ground sample distance. Ilmaisee pikselikoon maastossa.
RTK	Real time kinematic. Reaaliaikainen kinemaattinen mittaus. Käyttää hyödykseen satelliitin kantoaallon vaihetta sekä tukiasemaa, joka voi olla myös virtuaalinen.
RMS	Root mean square. Neliöllinen keskiarvo. Käytetään ilmaisemaan aineiston tarkkuutta verrattuna referenssiaineistoon.

1 Johdanto

Miehittämättömät lennokit eli UAV:t (Unmanned Aerial Vehicle) ovat tulleet viimeisen parin vuoden aikana osaksi maanmittausta. Lisäksi ne ovat yleistyneet myös muilla aloilla. Teknologia kehittyä kovaa vauhtia: uusia laitteita, ohjelmia ja ominaisuuksia tulee kuukausittain. UAV:llä tehdyillä kartoituksilla on selkeästi tilausta, koska se täyttää tarpeita, joihin aikaisemmat mittaustavat eivät ole sopineet. Lentokoneesta tai helikopterista tehtävät mittaukset ovat hintansa vuoksi käytännöllisiä vain kartoittaessa suuria alueita. Perinteisellä maastomittauksilla monet työtehtävät ovat liian laajoja tehtäväksi. UAV-kuvauksen avulla pystytään tuottamaan esimerkiksi ilmakuvia, ortokuvia, pintamalleja, pistepilviä, 3D-objekteja ja tekstuureja niihin.

Sain insinööriyötäni varten Metropolia Ammattikorkeakoululta valmiin UAV:llä kesällä vuonna 2012 tehdyn kartoituksen Nokian Renkaiden testikeskuksesta ja Pix4D-palvelussa valmiiksi prosessoidun aineiston. Lisäksi sain käyttöön maastomittauksen, jota kävin itse myöhemmin täydentämässä omilla mittauksilla. Kuvauksen ja aikaisemmat mittaukset olivat tehneet Metropolia Ammattikorkeakoulun laboratorioinsinööri Ilkka Partonen ja lehtori Jussi Laari.

Työssä suoritin itse Agisoft PhotoScan -ohjelmalla aineiston prosessoinnin ja vertailin tuloksia Pix4D-palveluun sekä Maanmittauslaitoksen laserkeilattuun pistepilveen. Insinööriyön aloitusajankohtana ei ollut vielä juurikaan suomalaisia opinnäytetöitä, joissa aiheesta olisi annettu selkeitä lukuja tasotarkkuuden ja korkeustarkkuuden muodossa. Lisäksi minua kiinnosti, mistä asioista tarkkuus muodostuu UAV-kuvauksessa ja minkälainen rooli esimerkiksi georeferoinnissa käytettävillä kontrollipisteillä on tarkkuuden suhteen. Työn tavoitteena oli antaa myös itselle tietotaitoja liittyen fotogrammetriasta, jota oli opinnoissa käsitelty melko vähän, ja tutustua koko UAV-kuvauksen prosessiin kokonaisuutena.

2 UAV-ilmakuvaus

2.1 UAS eli miehittämätön lentolaitejärjestelmä

UAS (Unmanned Aerial System) on kokonaisuus, joka sisältää UAV-lennokin lisäksi myös kaiken muun tarvittavan laitteiston miehittämättömän lennon suorittamiseen. Yleensä UAS-kartoituksessa tulee olla ainakin lennokka, tietokone sovellusohjelmistoinen lentosuunnitelmaa varten, radiolinkki tietokoneen ja lennokin välillä sekä digitaalikamera. Mahdollisesti lennokissa voi olla myös muita mittausinstrumentteja, kuten laserkeilain tai lämpökamera.

UAV-lennokeilla tarkoitetaan lentäviä miehittämättömiä ilma-aluksia, jotka ovat yleensä rakenteeltaan kiinteäsiipisiä tai helikopterin mallisia. Ne toimivat sähkökäyttöisesti tai polttomoottorilla. Kartoituskäyttöön UAV-lennokkeja valmistavat esimerkiksi Trimble, SenseFly, Aibotix ja Microdrones.

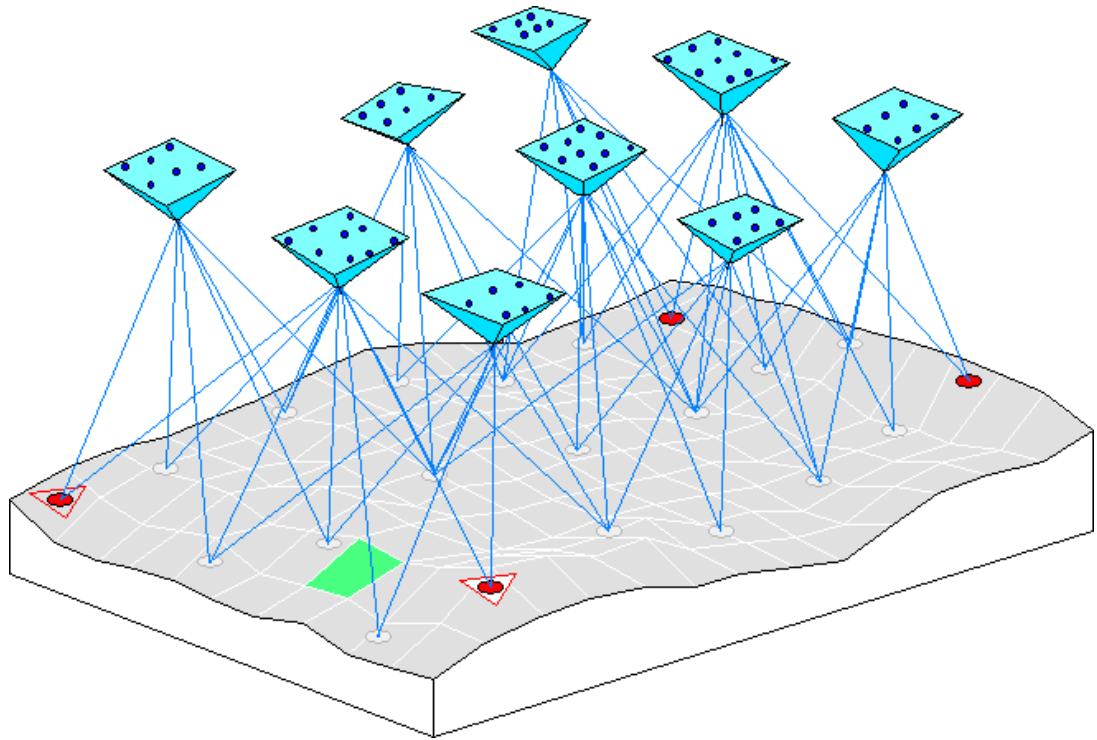
UAV-kuvauksessa tällä hetkellä tavallisin kuvausinstrumentti on tavallinen digitaalikamera, joka perustuu CMOS- tai CCD-kennoon. Kenno koostuu valoherkistä fotodiodeista, jotka muodostavat harmaasävykuvan. Diodien päällä olevat suotimet muodostavat kuvat väreihin. Useimmiten suotimien väreinä käytetään punaista, vihreää ja sinistä. Digitaalikameroilla kuvataan näkyvän valon aallonpituutta, mutta kennot pystyvät havaitsemaan myös lähi-infrapun aallonpituuksia, jos kamerassa ei ole infrapunasuodatinta, joka estää infrapunasäteilyn etenemisen kennolle asti. Osa kennoista havaitsee myös ultraviolettisäteilyä. [1, s. 1–2.]

2.2 Fotogrammetria ja kaukokartoitus

Fotogrammetria ja kaukokartoitus tutkivat kohteiden muodon ja ominaisuuksien selvittämistä valokuvien, satelliittikuvien ja laserkeilausten avulla [2]. Kaukokartoituksella tarkoitetaan kohteen mittaamista sähkömagneettisten aaltojen avulla etäältä kohteesta. Niiden historia voidaan jakaa neljään peräkkäiseen aikakauteen, mittapöytäfotogrammetriaan, analogiseen, analyttiseen ja digitaaliseen fotogrammetriaan [3, s. 1]. UAV-ilmakuvaus perustuu kokonaan näiden tieteenalojen sovellutuksiin.

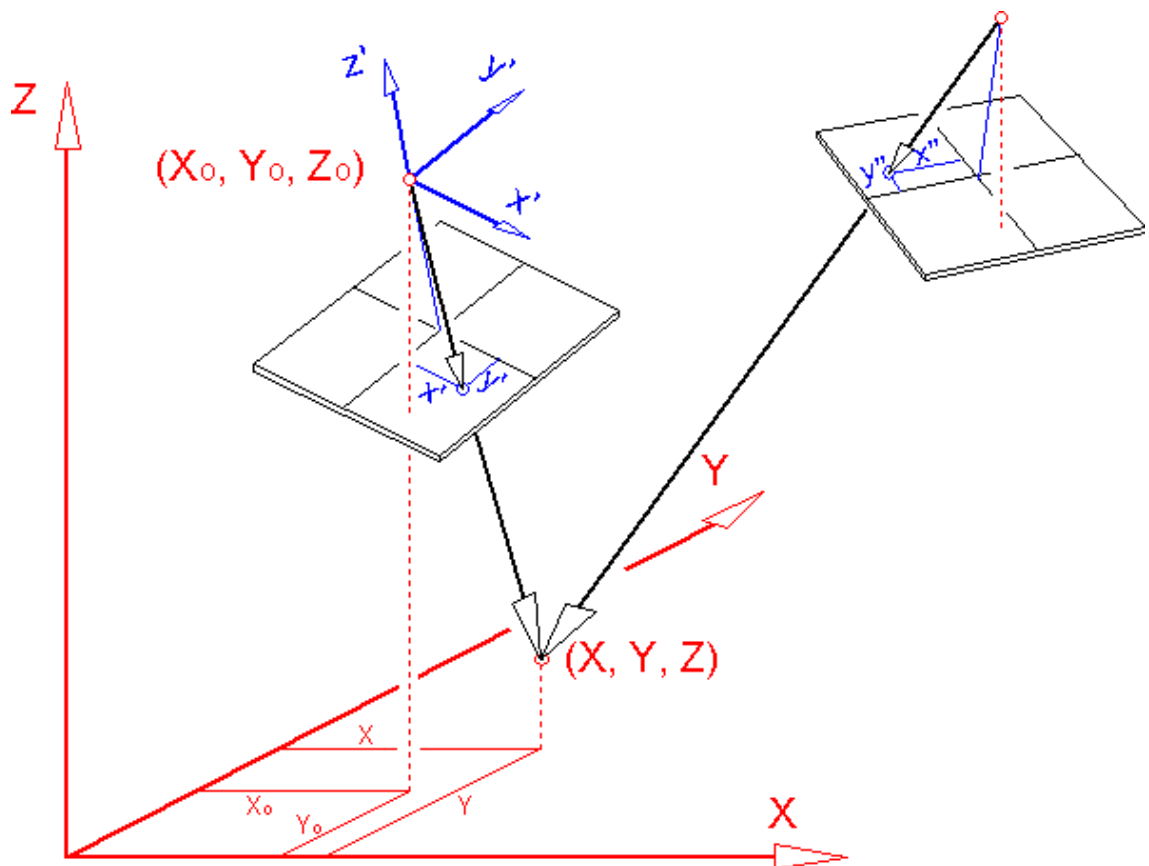
UAV-ilmakuvauks on osa kaukokartoitusta satelliittimittauksen ja lentokoneesta tehtävien mittausten lisäksi. Tekniikkana se on tulossa täydentämään lentokoneesta suoritettavien mittausten ja perinteisten maastomittausten väliin jäävää aukkoa. UAV mahdollistaa kartoittamisen, jota ei ollut ennen mielekästä tehdä työn suuruuden vuoksi GPS- tai takymetrimittauksella tai kartoituksen pienen koon takia esimerkiksi perinteisellä ilmakuvauksella.

Kuvilta mittaamisen tapoja ovat stereokuvaus, konvergenttikokuvaus, stereomittaus, yksin pistein mittaaminen, yksikuvamittaus ja monikuvamittaus [4]. UAV-ilmakuvauksesta mittaaminen perustuu yleensä monikuvamittaukseen, jossa kohdetta mitataan kuvaparilta tai kuvablokissa. Kameroiden sisäinen ja ulkoinen orientointi täytyy olla tunnettuja ennen kuvilta mittaamista. Sisäisellä orientoinnilla tarkoitetaan kameran projektiokeskustan sijainnin määrittämistä kuvatasoon eli pääpisteen sijainnin ja kameravakion (polttoväli) muuttujien tuntemista. Lisäksi ratkaistaan optiikan piirtovirheet. Nämä tiedot saadaan selville kameran ominaisuuksista ja kalibroinnista. Ulkoinen orientointi tarkoittaa kameroiden sijaintien ja kiertymien tuntemista toisiinsa nähden. Se voidaan selvittää esimerkiksi kolmioinnilla (kuva 1). Mahdollista olisi myös ottaa kuvat tunnetulta asemapaikalta, mutta käytännössä tähän asti UAV-kartoituksessa ilmakolmiointi on ollut parempi vaihtoehto. Uudet sovellukset käyttävät kolmioinnissa tuhansia automaattisesti löydettyjä luonnollisia vastinpisteitä sekä mahdollisesti signaloituja pisteitä. Ilmakolmioinnista saadaan tarvittaessa myös karkea korkeusmalli sekä mitattua pisteiden koordinaatteja 3D-avaruudessa [4].



Kuva 1. Havainnekuva ilmakolmioinnista [4].

Ulkoisen ja sisäisen orientoinnin ollessa selvillä voidaan pisteitä mitata 3D-avaruudessa eteenpäinleikkauksen avulla (kuva 2). Sillä lasketaan kahdesta tai useammasta kuvasta saman pisteen leikkauskohta avaruudessa. Hajonnan takia avaruussuorat eivät leikkaa toisiaan, ja jäännösvirhe tasoitetaan uuden pisteen koordinaatteihin [4]. Eteenpäinleikkauksen tarkkuuden määrittää kuvausgeometria ja ulkoisen orientoinnin tarkkuus. Kun pisteitä mitataan kuvablokissa paljon, niistä muodostuu pistepilvi. Pistepilvi voidaan georeferoida signaalipisteiden avulla lopulliseen koordinaatistoon. [4; 5.]



Kuva 2. Eteenpäinleikkaus avaruudessa [4].

2.3 Käyttökohteet ja markkinat

UAV:n historia ulottuu sotilaskäytössä melko kauas, mutta siviilipuolella niiden kehitys on voimistunut vasta 2000-luvulla. Suomessa UAV-sovellutusten hyödyntäminen on vielä melko vähäistä. Tällä hetkellä muutamat yritykset käyttävät tekniikkaa ilmakuvaukseen sekä kartoitukseen. Lennokkeja hyödynnetään TV-tuotannossa ja jonkin verran pelastustoiminnassa. Siviilipuolella lennokkeja voisi käyttää seuraavilla aloilla [6]:

- maatalous
- ilmakehän ja ympäristön seuranta
- logistiikka
- geologiset tutkimukset
- kuvaus ja kartoitus

- media- ja TV-tuotanto
- rakennusten tarkastus ja mittaus
- liikenteen valvonta
- poliisi, palo- ja pelastuspalvelut
- katastrofiapu
- valvonta.

Kaupallinen puoli avaa yrityksille mahdollisuuksia lähteä tuottamaan uusia palveluita monilla eri aloilla. Lennokin soveltuvuus erilaisiin työtehtäviin lisää sen käyttöasteen määrää. Tällä hetkellä ei ole olemassa monia suomalaisia yrityksiä, jotka keräävät, käsittelevät ja analysoivat edellä mainituista sovellutuksista saatua tietoa. Näiden lisäksi syntyy vielä koulutus- ja korjauspalveluita. [6]

Erityisesti UAV-sovellukset auttavat tilanteissa, joissa ympäristö on vaarallinen ihmisen toiminnalle. Tällaisesta tilanteesta on Suomessa esimerkkinä Vihtavuoren räjähdetehtaalla tapahtunut räjähdekontin kuumeneminen. Vaaratilanteessa päivystävä palomestari tilasi paikalle ilmakehävälä UAV-helikopterilla suorittavan yrityksen [4]. Lennokissa ei kuitenkaan ollut lämpökameraa, joten mittauksia jouduttiin tekemään ihmisvoimin vaara-alueen sisäpuolella.

On ennustettu, että tulevaisuudessa monipuoliset siviilipuolen markkinat ohittavat pitkälle kehittyneet sotilasmarkkinat [6]. Tällä hetkellä markkinoista 89 % on sotilaspuolella, ja markkinat arvoltaan ovat koko maailmassa noin 6,4 miljardia dollaria. Kymmenen vuoden kuluttua markkinoiden arvon ennustetaan kaksinkertaistuneen. UAV-sovellusten yleistymiseen vaikuttaa merkittävästi lainsäädännön suhtautumien asiaan. [8]

2.4 UAV-toimintaa koskeva lainsäädäntö ja ohjeistukset

Suomessa ei ole voimassa olevaa lainsäädäntöä koskien miehittämättömiä lennokkeja tämän insinöörityön kirjoitushetkellä, mutta TraFilla (liikenteen turvallisuusvirasto) on ohjeistuksia koskien miehittämättömien ilma-alusten käyttöä. Ohjeistuksena on, että lennokki ei saa ylittää 150 metrin korkeutta, siihen täytyy olla näköyhteys ja valvotun ilmatilan läheisyydessä täytyy ottaa yhteys lennonjohtoon [9]. EU-tasolla säädöksiä

ilmailuun laatii EASA ja kansainvälisesti ICAO. Seuraavien vuosien aikana on tulossa uutta lainsäädäntöä koskien UAS-ilmakuvausta kansallisesti ja kansainvälisesti [10]. TraFin mukaan kansainväliset säädökset tulevat syrjäyttämään kansalliset säädökset. TraFi itse haluaisi UAV:lle minimisääntelyn, joka takaisi tekniikalle kilpailukykyiset olosuhteet [10]. Näyttääkin todennäköiseltä, että UAV-ilmakuvaus saa tukea lainsäädännöstä. Nähtäväksi jää, miten jossain vaiheessa eteen tulevat onnettomuudet vaikuttavat tulevaisuudessa lainsäädäntöön.

2.5 Insinööriyön aineistossa käytetty lennokki ja kamera

Saamassani aineistossa oli käytetty lennokkina SenseFlyn valmistamaa pienikokoista Swinglet CAM -lennokkia. Swinglet CAM -mallin etuja ovat pieni koko, edullisuus ja helppokäyttöisyys. Lennokin hinta tarvittavine osineen on noin 10 600 dollaria [11], joten verrattuna kilpailijoihin on sen hinta todella edullinen. Lennokin pieni koko mahdollistaa sen liikuttamisen yksin sekä pienen tilantarpeen nousemisessa ja laskeutumisessa. Swinglet CAM laskeutuu alas kiertäen ympyrää, jonka halkaisija on 40 metriä. Monet muut lennokit vaativat laukaisutelineen ja jopa useita satoja metrejä tilaa laskeutumisen aikana. Swinglet CAMin 0,5 kg:n massa on myös sen heikkous, sillä kokemuksieni mukaan lennokin tuulenkestävyys on huono. Valmistaja ilmoittaa mallille tuulen kestävyudeksi 7 m/s. Swinglet CAMia ei voi suositella ammattimaiseen käyttöön, mutta testikäyttöön se soveltuu varmasti hyvin. Akku tässä mallissa kestää korkeimmillaan noin 30 minuuttia ja huippunopeus on 36 km/h. Lennokilla voidaan kartoittaa valmistajan mukaan 6 km²:n alue yhdellä, joka vaatii selvästi 150 m:ä korkeamman yli 900 m:n lentokorkeuden. [12]



Kuva 3. SenseFlyn swinglet CAM -lennokki lisäosineen sekä kannettava tietokone, jolla voidaan ohjata lennokkia [12].

Kuvat oli otettu 12 Mpx:n Canon Ixus HS220 -digitaalikameralla, jonka kenno on CMOS-tyyppinen ja polttoväliksi valittu 4,3 mm (kinokoossa 24 mm). Kamera on edullinen digipokkari, jonka kalibrointi voi olla hankalaa zoom-objektiivin takia (kuva 4).



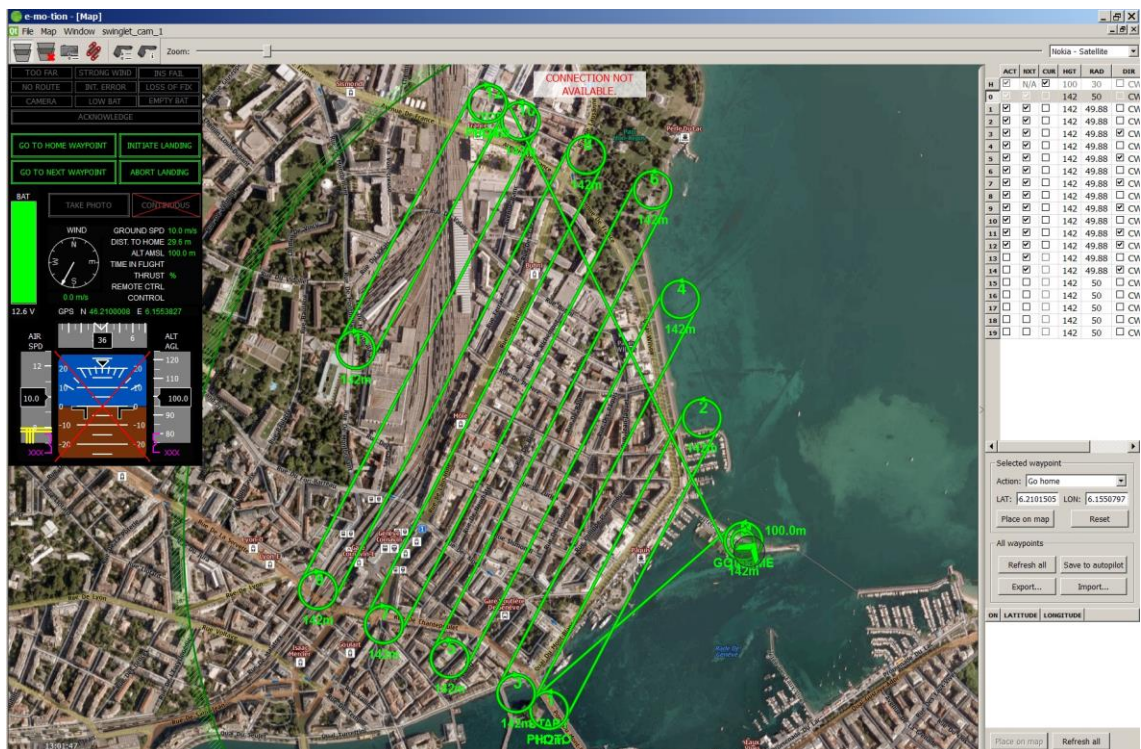
Kuva 4. Kartoituksessa käytetty kamera Canon Ixus HS220 [13].

3 Ilmakuvauksen suorittaminen

Ilmakuvauksen suorittamisessa tärkeitä vaiheita ovat järjestyksessä kuvaussuunnitelma, signalointi, varsinainen ilmakuvauksen suorittaminen ja kerätyn aineiston prosessointi.

3.1 Kuvaussuunnitelma

Kuvausta suunniteltaessa täytyy huomioon ottaa laatuvaatimukset, lainsäädäntö, lennokin ominaisuudet ja sää. Laatuvaatimukset ja tehtävät määräävät käytettävän kaluston, lentokorkeuden ja kuvien määrän. UAV:llä kartoittaessa on suositeltavaa käyttää suuria peittoprosentteja, esimerkiksi 85 prosentin pituuspeittoa ja 60 prosentin sivupeittoa. Uudet ohjelmat osaavat laskea valitun alueen, maaston korkeustietojen, kaluston avulla kuvaussuunnitelman. Esimerkiksi SenseFly Emotion -ohjelmaan (kuva 5) voidaan syöttää maaston korkeustiedot. GSD on todellisuudessa huonompi maanpinnan tasolla, joka täytyy huomioida tarkkuutta arvioidessa. Esimerkiksi kuvatessa syvää louhosta voi louhoksen pohja olla useita kertoja syvemmällä suhteessa lennokkiin kuin louhoksen yläpää, jos lentosuunnitelmassa ei ole tätä huomioitu. Kuvaussuunnitelmaa tehdessä on mietittävä mahdollisia nousu- ja laskupaikkoja lennokille sekä tarkistettava, onko alue valvottua ilmatilaa, jolloin lennonjohtoon täytyy ottaa yhteys ennen lentoa.



Kuva 5. Lentosuunnitelma SenseFly Emotion -ohjelmassa [14].

Sivutuuli aiheuttaa kevyillä lennokeilla ongelmia kuvien laadussa ja kuvauksen suorittamisessa. Tuulen vaikutusta voi vähentää kuvaamalla kuvia enemmän ja

poistamalla epäonnistuneet kuvat. Sateella lennokkeja ei monesti voi käyttää, ja pakkasen aiheuttaa ongelmia akkujen kanssa.

3.2 Signalointi

UAV-kuvauksen tarkka fotogrammetrinen prosessointi vaatii yleensä tunnettuja pisteitä ja yleensä niiden signalointia. Ilman signaalipisteitä voidaan mitata tarkasti, jos lennokissa on mahdollisuus RTK-mittaukselle (Real Time Kinematic). Agisoft suosittelee, että UAV-kartoituksessa tunnettuja pisteitä olisi ainakin 10 kappaletta [15]. Se on hieman epätarkka ohjeistus ilman tietoa kuvausalueen koosta. Signaalipisteitä tai tunnettuja pisteitä tulisi olla joka puolella kuvausaluetta ja varsinkin lähellä alueita, jotka halutaan mitata tarkasti.

Signaalipisteet mitataan GPS- tai takymetrikartoituksella. UAV-kartoituksen tarkkuuden tuntien voisi sanoa, että haluttaessa mahdollisimman luotettavaa aineistoa on olennaista mitata tunnetut pisteet hyvällä sisäisellä tarkkuudella eli käyttäen takymetriä. Käytännössä useimmissa tilanteissa pelkällä RTK-mittauksella päästään hyvin riittävään tarkkuuteen, jos satelliittigeometria ja olosuhteet ovat muuten hyvät. Takymetrin orientoinnin voi suorittaa runkopisteverkosta tai useista GPS-mittauksista tehdyillä havainnoilla.

Koululta saamassani kartoituksessa signaloituja tukipisteitä oli alun perin vain 5, mutta mittasin itse lisää selvästi tunnistettavia kohteita, joita pystyi käyttämään prosessoinnissa ja myöhemmin aineiston tarkastamisessa. Omien maastomittausten aikana kuvauspaikka oli lumen ja jään peittämä, joten selviä näkyviä kohteita oli hankala löytää. Lopulta käytin prosessoinnissa 13:a tunnettua pistettä (kuva 6), jotka eivät olleet kovin optimaalisia sijainniltaan, ja lopulta niiden käyttö georeferoinnissa osoittautui esimerkiksi maaliviivojen pienen koon takia varsin hankalaksi.



Kuva 6. Työssä käytetyt tukipisteet ortokuvalla.

3.3 Lennokin lennätys

Lennokin lennätys aloitetaan tarkastamalla nousu- ja laskupaikat. Lennokista riippuen alue voi vaatia useita satoja metrejä tilaa. Yleensä lennokit laitetaan laskeutumaan nousupaikalle. Tärkeää on myös tarkistaa, onko kuvausalueella kohteita joihin lennoki voisi törmätä. Sen jälkeen on tarkistettava lennokin kunto. Ennen lennokin lähetystä käynnistetään radioyhteys, avataan kuvaussuunnitelma tietokoneella, tarkistetaan kameran asetukset, tarkistetaan GPS:n toimivuus ja tarkkuus sekä varmistetaan akun varaustila. Lennon aikana valvotaan lennokin suoriutumista ja tehdään mahdollisesti muutoksia lentosuunnitelmaan. Laskeutumisen jälkeen tarkistetaan mahdolliset vauriot.

4 Aineiston prosessointi

4.1 Ohjelmistot ja laitteisto

Varsinaisena prosessointiohjelmana työssä käytin Agisoft PhotoScan Professional Edition -ohjelman versiota 1.03, jonka Agisoft antoi koekäyttöön. Agisoftin sivustolla on kattavat ohjeet monenlaiseen käyttöön ja PhotoScanin käyttäjäkunta on erittäin aktiivista sivuston keskustelufoorumilla, joten sieltä löytyy paljon tietoa ohjelman

käytöstä [15]. Kameran kalibroinnissa käytin Agisoft Lens -sovellusta. Lisäksi ilmakuvat ja lokitiedostot oli lähetetty koulun toimesta SenseFly Postflight Terra -sovelluksella käsiteltäväksi Pix4D:n prosessointipalveluun, josta aineistot saatu valmiina ilman itse tehtyä prosessointia.

PhotoScania käytin tietokoneessa, jonka keskeisimmät suorituskykyyn vaikuttavat komponentit ovat

- Intel Xeon E3-1230V3 -prosessori
- 8 GB DDR3 keskusmuistia
- AMD Radeon R9 290 -näytönohjain
- SanDisk Ultra Plus SSD 128 GB -kiintolevy.

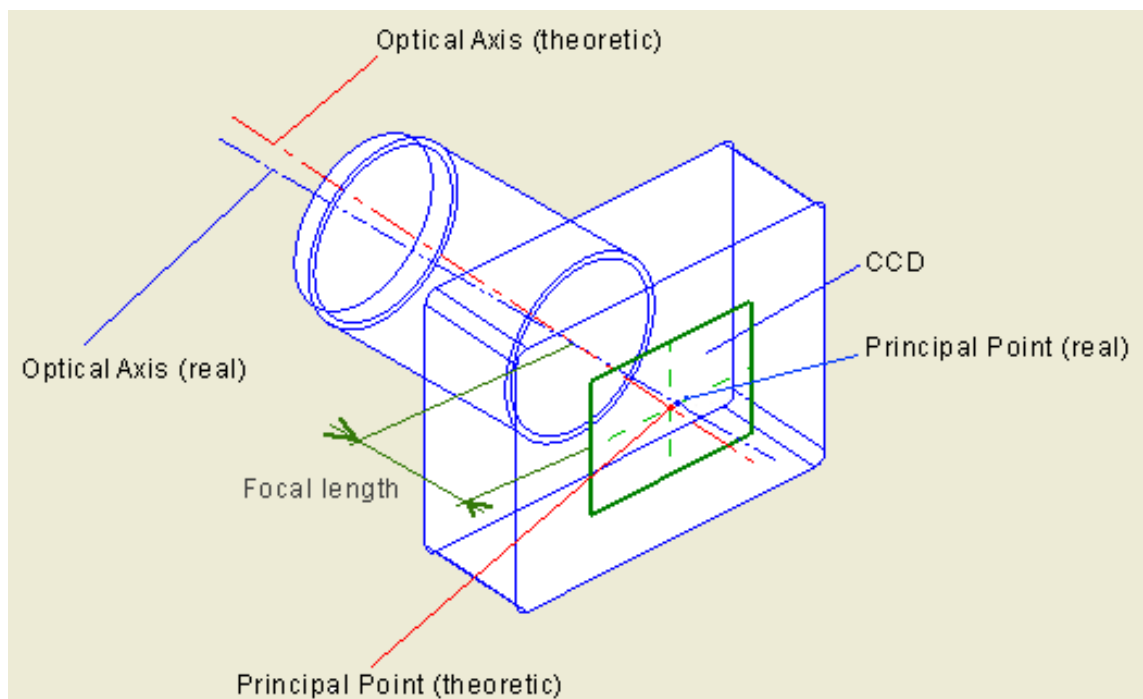
Kokeilin aineiston prosessointia myös suomalaisen PIEnengineeringin ohjelmistolla 2014 keväällä, mutta se oli vielä kyseisenä ajankohtana keskeneräisen tuntuinen. Olen kuullut ohjelman kuitenkin kehittyneen paljon siitä ajankohdasta. Sen lisäksi koitin prosessointia myös lyhyesti Pix4Dmapper Discovery -ohjelmalla, joka on ilmainen ja karsittu testiversio Pix4Dmapper Pro:sta. Pix4D:n sovellus tuntui suoraviivaisemmalta käyttää verrattuna Agisoftin PhotoScaniin. Kokemukseni mukaan Pix4D:llä saa oletusasetuksilla ainakin visuaalisesti tasalaatuisempia 3D-malleja pistepilvistä kuin PhotoScanilla, jolla esimerkiksi rakennuksiin saa näkymään enemmän yksityiskohtia, mutta ohjelma ei osaa kolmioida pistepilveä yhtä luotettavasti. PhotoScanilla prosessointi vaatii välillä paljon kokeiluja erilaisilla asetuksilla. Prosessointiin vaikuttaa paljon depth filtering -asetus, jolla päätetään yksityiskohtien määrä pintamallissa. Prosessoinnin nopeudessa ja muistin käytössä Pix4D oli ylivoimainen.

4.2 Kameran kalibrointi

Kameran kalibrointi on tehtävä, jotta kameran sisäisestä orientoinnista (kuva 7) sekä optiikan piirrosta aiheutuvia virheitä voidaan vähentää [16]. Tärkeintä kalibroinnissa on käyttää samoja asetuksia kuin ilmakuvausta tehdessä. Lisäksi on syytä huomioida kalibrointiformaatti ja sen sopivuus omaan prosessointiohjelmistoon. Kalibrointiarvot voidaan ilmoittaa eri kalibrointiformaateissa eri tavoilla.

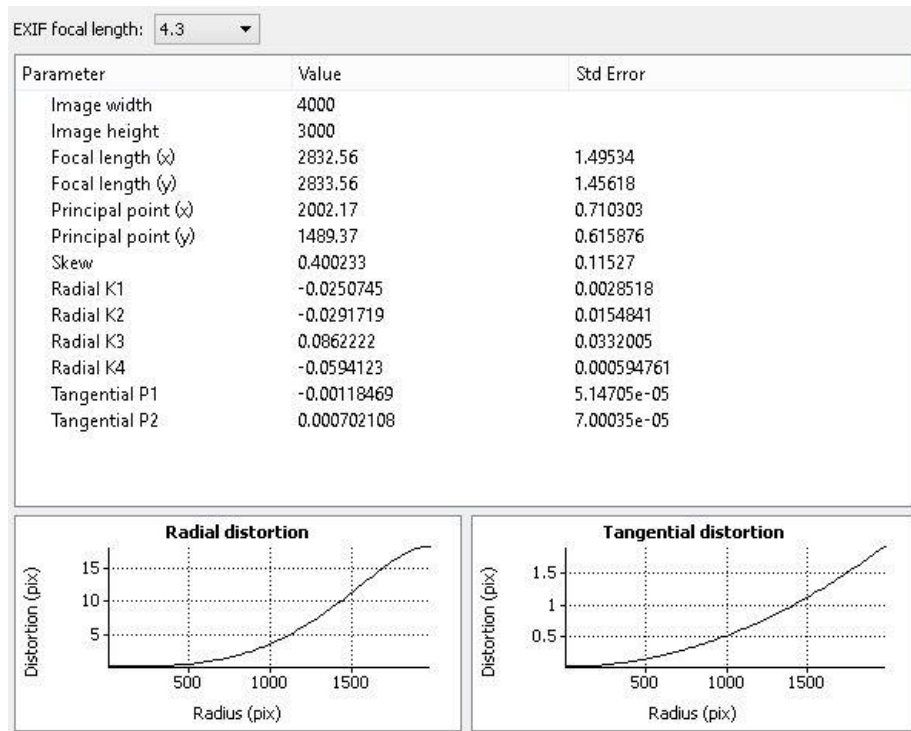
Esimerkiksi PhotoScan osaa tehdä alkuarvauksen kalibroinnille ja tarkentaa sitä prosessoinnin aikana, joten itse tehty kalibrointi ei ole välttämättömyys, mutta hyvin tehty kalibrointi parantaa aineiston luotettavuutta. Jotkut ohjelmat voivat vaatia kalibroinnin pakollisena.

Kameran kalibroinnin suoritin ohjelmiston yksinkertaisuuden ja ilmaisuuden takia Agisoft Lens -ohjelmalla. Se toimii kuvaamalla tietokoneen näytöllä näkyvää kalibroituruudukkoa useista eri kuvakulmista. Kalibrointiin tarvitaan vähintään 3 kuvaa eri suunnista. Itselläni oli kalibroinnissa 8 kuvaa.

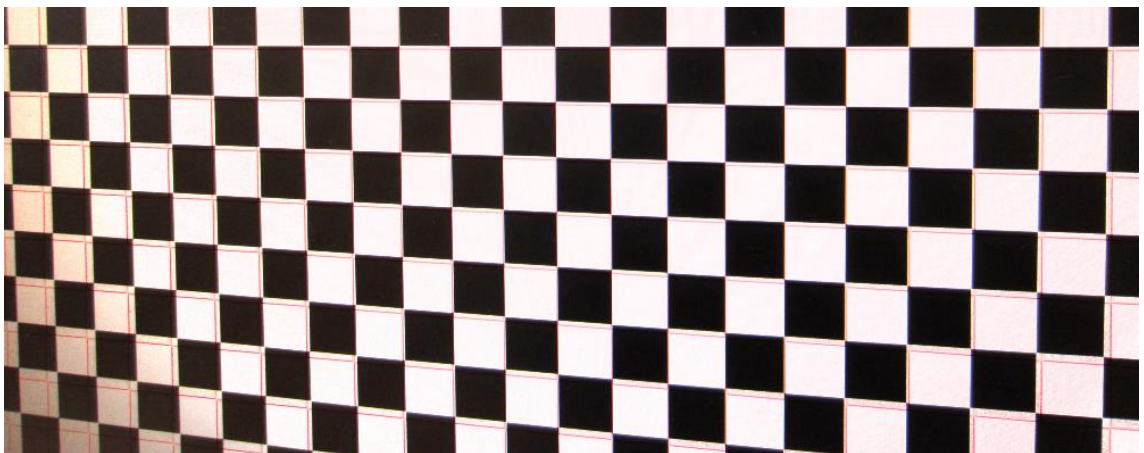


Kuva 7. Kuvassa on havainnollistettu todellisen optisen akselin ja teoreettisen optisen akselin eron merkitys [17].

Kalibroinnissa kuvan pääpiste on $X = 2002.17$ ja $Y = 1489.37$ (kuva 8), joten se eroaa yli 10 pikseliä kuvakoordinaatiston keskipisteestä, jossa $X = 2000$ ja $Y = 1500$. Kuvasta 9 näkee kalibroimattoman ja kalibroidun kuvan eron. Kuva on leikattu kalibroituruudukon alalaidasta. Kuvan vasemmasta alareunasta mitattuna piirtovirhettä on noin 50 pikseliä. On selvää, että ilmakuvien prosessoinnissa piirtovirhe aiheuttaisi sellaisenaan erittäin suuria virheitä.



Kuva 8. Agisoft Lens -ohjelman antamat arvot kalibroinnista



Kuva 9. Kalibroitu ja kalibroimattoman kuva päällekkäin. Kalibroimattoman kuvan neliöt mustalla värillä ja taustalla kalibroidut neliöt punaisilla viivoilla.

Kalibroinnin luotettavuutta voidaan tutkia laskemalla Lensin ilmoittamasta keskirheestä luottamusväli kaavalla $luottamusväli = X \pm Z * S$ [18], jossa X on keskiarvo, Z on standardoidun normaalijakauman arvo sekä S on keskirihe.

$$luottamusväli\ 95\ \% = 2002,17 \pm 1,96 * 0,710303$$

$$luottamusväli\ 95\ \% = 2002,17 \pm 1,39$$

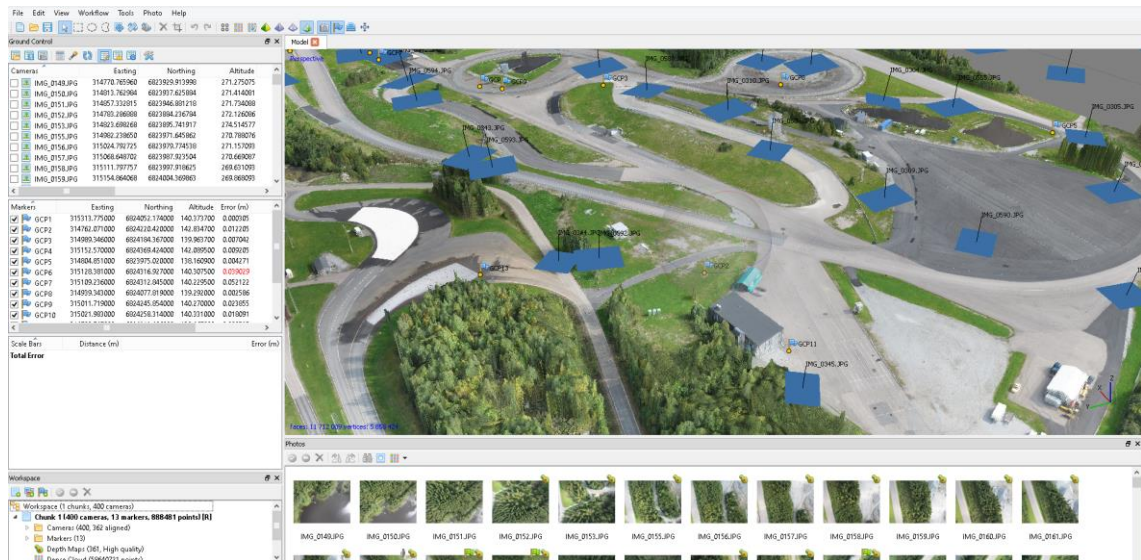
Kalibroinnissa laskettu pääpiste on X-akselilla 95 %:n todennäköisyydellä 1,39 pikselin sisällä kalibroidusta arvosta.

4.3 Prosessoinnin vaiheet

Kameran kalibroinnin jälkeen kopioin ilmakuvat omaan projektikansioon, jotta prosessoinnin aikana alkuperäiset kuvat pysyvät varmasti tallessa. Geotaggingin tein PostFlight Terra LT -sovelluksella siten, että lisäksi lokitiedostoista WGS84-koordinaatit sekä kiertymät kuvien EXIF-tietoihin.

PhotoScanissa noudatin enimmäkseen Agisoftin sivulta löytyviä ohjeita [15]. Latasin kuvat ja lajittelin ne ISO-luvun mukaan ja huomasin suurella herkkyydellä kuvattujen kuvien olevan huonolaatuisia tai heilahtaneita, joten poistin ne kokonaan projektikansiosta. Tässä vaiheessa tarkistin myös, että kaikki ohjelman asetukset ovat oikein Agisoftin ohjeiden mukaisesti. Seuraava vaihe oli kuvien sijaintien ja kiertymien tarkempi laskenta toisiinsa nähden. En käyttänyt valmiita lennokin tallentamia kiertymiä laskennassa, sillä käyttäjäkokemusten mukaan PhotoScan toimii paremmin ilman niitä. Sijaintien laskennassa PhotoScan ei osannut laskea kaikkien kuvien sijaintia, mutta en kokenut tarvetta kuvien manuaaliselle havainnoille, joiden avulla loppujenkin kuvien sijainnit saadaan laskettua.

Kuvien sijaintien laskennan jälkeen laskin harvan korkeusmallin, joka helpottaa georeferoinnissa: ohjelma osaa muutaman pisteen jälkeen näyttää automaattisesti kaikki kuvat, jossa valittu signaalipiste esiintyy ja tehtävä on nopeampi. Kontrollipisteiden koordinaattitiedot oli luettava tekstitiedostosta ohjelmaan. Georeferoinnissa PhotoScan suorittaa 7-parametrinen yhdenmuotoismuunnoksen, johon kuuluu 3 siirtoa, 3 kiertoa ja mittakaava [19]. Kaikkien mahdollisten kontrollipisteiden sijoittamisen jälkeen valitsin koordinaattijärjestelmäksi ETRS-TM35FIN:n ja suoritin kuvien sijaintien optimoinnin. Optimoinnissa PhotoScan tasoittaa pisteiden estimaatit ja syötetyt tai lasketut kameraparametrit [19]. Optimoinnin jälkeen suoritin tiheän pistepilven laskennan ja sen maapisteiden luokittelun. Pistepilvestä voidaan halutessa luoda pintamalli, jonka avulla voidaan tulostaa ortokuva. Pintamalli on mahdollista teksturoida (kuva 10) ja tallentaa 3D-objektiksi (OBJ-formaatti).



Kuva 10. Agisoft PhotoScanin käyttöliittymä ja valmis pintamalli teksturoituna.

4.4 Vaadittavat resurssit ja prosessointiin kuuluva aika

Fotogrammetrinen prosessointi vaatii tietokoneelta paljon laskentatehoa. Omassa tietokoneessani muistin määrä riitti laskemaan kuvien sijainnit parhaalla laadulla (kuvien alkuperäinen resoluutio) ja pistepilven muodostuksen hyvällä tarkkuudella (puolittaa kuvien resoluution). Tarkimmalla asetuksilla eli käyttäen alkuperäisen kokoisia kuvia pistepilven muodostus ei onnistunut. Prosessoinnin aikana PhotoScan käytti keskusmuistia noin 6 GB ja välilevymuistia lisäksi 13 GB. Ammattimaisesti vastaavanlaisia aineistoja käsiteltäessä tulisi olla keskusmuistia mielellään vähintään 32 GB:a, sillä kuvattavat alueet voivat olla suurempia kuin tässä projektissa, kuvat voivat olla resoluutiolta suurempia ja tarvittaessa tarkkuusasetuksia voidaan nostaa. Lisäksi prosessoinnissa saadaan nopeusetua, jos hitaan välilevymuistin käyttö korvataan keskusmuistilla.

PhotoScan osaa hyödyntää kaikkia tietokoneen prosessorin säikeitä, joten moniytimisten prosessorien suorituskyky käytetään kokonaisuudessaan hyödyksi. Lisäksi osassa prosessointivaiheista se osaa hyödyntää myös näytönohjainta. Valittaessa prosessoria tällaiseen käyttöön tulee ottaa huomioon, onko tarvetta nopeammalle työskentelylle. Työpäivän aikana ei saada kovin suuria aineistoja kartoitettua, joten normaali nykyaikainen pöytäkone ehtii prosessoida pienemmät aineistot seuraavaan aamuun mennessä. Isoissa useampien tuhansien kuvien prosessoinneissa hyödytään tehokkaammasta suorittimesta, ja tällaisessa tilanteessa

kannattaa harkita ammattilaiskäyttöön tarkoitettuja prosessoreita tai järjestelmää, jossa on kaksi suoritinta.

Photoscan-ohjelmalla hyvillä laatuasetuksilla prosessointiin kului aikaa noin 3 tuntia, kun 12 Mpx:n JPG-kuvia oli käytössä 400 kappaletta, ja alueen koko oli 0,5 km². Ohjelman suorittaman prosessoinnin lisäksi aikaa vie yhteensä 1–2 tuntia epäonnistuneiden kuvien poistaminen, geotagging, georeferointi ja laadunvarmistus. Kokonaisaika vastaavan kokoisessa prosessoinnissa omalla tietokoneellani on noin 5 tuntia, jos kaikki menee kerralla oikein. Prosessoinnin saattaa joutua ajamaan uudestaan eri asetuksilla, jos esimerkiksi kaikki tarvittava tieto ei ole tullut valmiiseen malliin. Samat asetukset eivät välttämättä toimi eri kuva-aineistoilla.

4.5 UAV-kuvauksesta saatavat aineistot

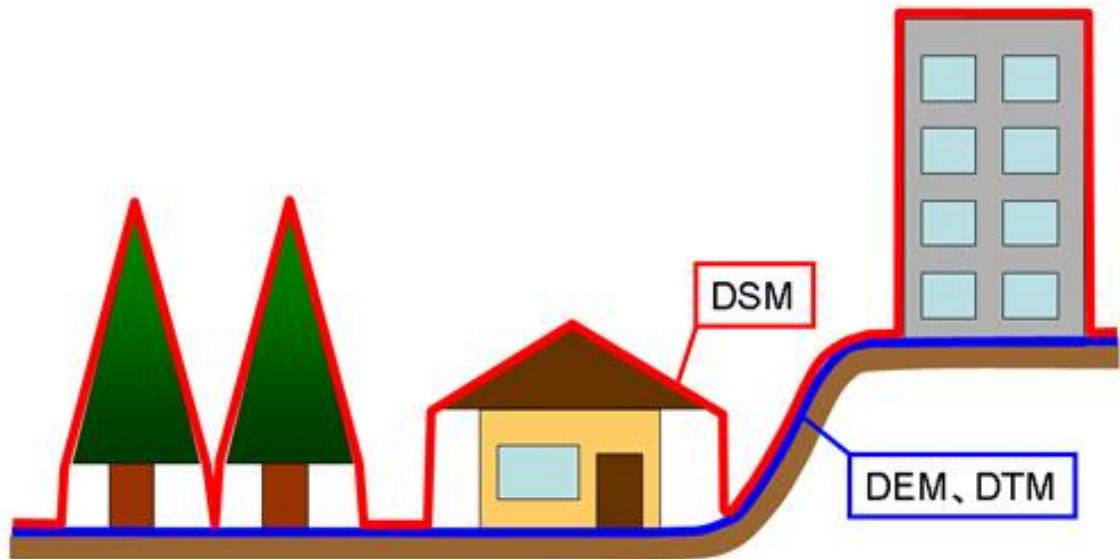
4.5.1 DSM-, DTM- ja DEM-malli

Maanmittauslaitoksen paikkatietokeskus kuvailee näiden mallien eroja seuraavasti:

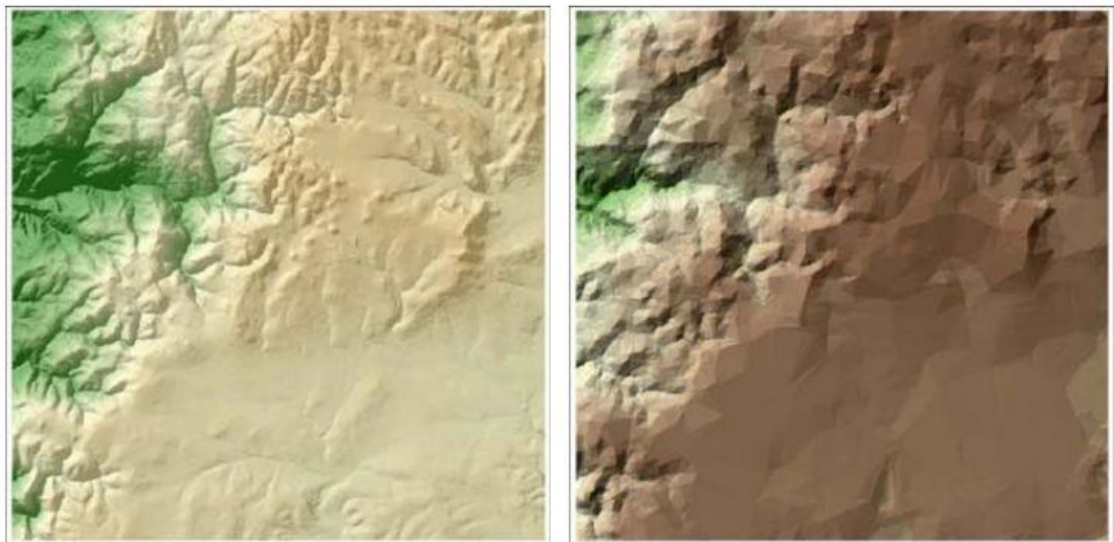
Korkeusmalliksi (Digital Elevation Model, DEM) kutsutaan maanpinnan muotojen numeerista esitystä, joka sisältää sekä varsinaisen pinnanmuotoja kuvaavan korkeuspisteiden joukon että menetelmän laskea arvoja korkeuspisteiden väliin. Tyypillisesti korkeusmalli tallennetaan tietojärjestelmään joko tasavälisenä hilana tai epäsäännöllisenä kolmioverkkona (TIN). Korkeusmalleista puhuttaessa esiin nousevat usein myös termit maastomalli (Digital Terrain Model, DTM) ja pintamalli (Digital Surface Model, DSM). Maastomallilla tarkoitetaan maanpintaa kuvaavaa mallia, joka sisältää korkeustiedon lisäksi muutakin tietoa esimerkiksi maan peitteestä, rinteiden kaltevuuksista ja viettosuunnista. Maastomallin tärkein elementti on korkeusmalli. Pintamalli taas on laserkeilauksen myötä käyttöön tullut termi, joka kuvaa maaston ylimmälle korkeustasolle asetettua pintaa. Näin ollen pintamalli sisältää maanpinnan korkeuksia ainoastaan avomaalla, mutta muilla alueilla pinta noudattaa esimerkiksi metsän latvustoa ja rakennusten kattoja. [20]

Useimmiten UAV-ilmakuvauksesta saadaan pintamalleja (DSM), sillä ilmakuvauksessa tallentuu yleensä vain ylimmän korkeustason pinta (kuva 11). Maastomallin (DTM) tekeminen onnistuu silloin, jos kuvattavalla alueella on vain vähän peitteitä maanpinnan yläpuolella. Sellaisessa tapauksessa esimerkiksi yksittäiset puut tai rakennukset saadaan suodatettua pois aineistosta. Laserkeilaus soveltuu paremmin maastomallien tekemiseen, koska laserpulssista rekisteröityy useampia paluukaikuja, jolloin saadaan mitattua myös maanpintaa kasvuston läpi.

Kolmioverkkona tallennetun mallin etuna on pieni koko, mutta toisaalta siitä katoaa tietoa verrattuna rasterimuodossa tallennettuun malliin (kuva 12). Kolmioverkon laatua voidaan kuitenkin vaihdella pinnan muotojen mukaan. Omien kokemusteni mukaan rasterimuodossa mallit ovat paremmin tuettuja eri ohjelmissa, sillä TIN-mallille ei ole olemassa laajasti eri sovelluksissa tuettua formaattia.



Kuva 11. DSM-, DTM- ja DEM-mallien erot havainnollistettuna [21].



Kuva 12. Vasemmassa kuvassa pintamalli rasterimuodossa ja oikealla vektorimuodossa [22].

4.5.2 Pistepilvi

UAV-ilmakuvista saadaan erittäin tiheä pistepilvi. Insinööriyössä lasketussa pistepilvessä pisteitä oli n. 58 miljoonaa eli n. 137 pistettä/m², joten sen tarkkuus riittää hyvin esimerkiksi 3D-mallien luontiin rakennuksista TerraScanilla (kuva 13). Huono puoli ilmakuvista mitatussa pistepilvessä on laserkeilaukseen kuuluvien intensiteettiarvojen ja paluukaikujen puuttuminen. Nämä seikat hankaloittavat pistepilven automaattista luokittelua. Pienillä alueilla luokittelua on onneksi nopea korjailta myös käsin.



Kuva 13. Pistepilven avulla rakennuksista automaattisesti vektoroidut 3D-mallit.

Matalalta kuvatuista vinokuvista on mahdollista luoda myös pistepilvi, jossa näkyy ylimmän pinnan lisäksi myös muita tasoja. Esimerkkinä tästä on kuvassa 14 luotu pistepilvi ja siitä kolmioitu 3D-malli käyttäen Pix4Dmapper Discoveryä. Kuva-aineiston latsin Pix4D:n omalta verkkosivustolta.



Kuva 14. Vasemmalla pistepilvi ja oikealla kolmioitu ja teksturoitu 3D-malli.

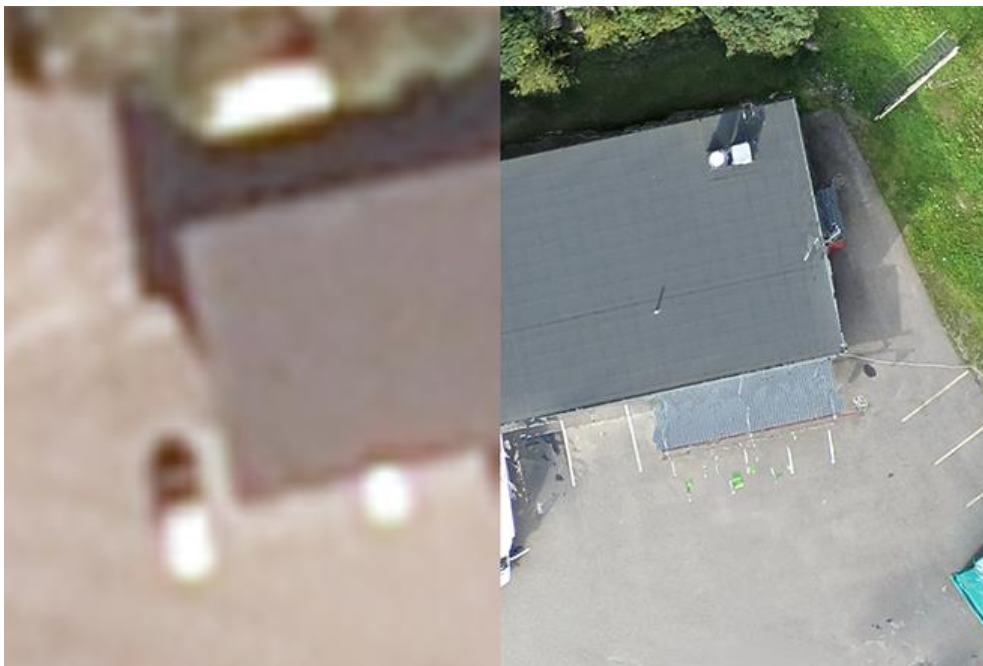
4.5.3 Ortokuva

UAV-ilmakuvauksesta on mahdollista luoda ortokuva. Orto-oikaisu perustuu ilmakuviin ja korkeusmalliin. Korkeusmallin avulla kuvien projektio muunnetaan keskusprojektiosta ortogonaaliprojektioon [4].

Photoscanilla saa tallennettua ortokuvan useampaan osaan tai vaikutettua tallennettavan ortokuvan resoluution ja pakkaukseen. Isoissa projekteissa se voi tulla tarpeen, koska tässäkin tapauksessa 3,8 cm:n resoluutiota käyttäen kuvan kooksi tuli TIFF-formaatissa hieman alle 1,2 GB. PhotoScanista saamani ortokuvan laatu on hyvä, mutta korkeusmallin reunoilla olevat virheet näkyvät esimerkiksi kuvan 15 oikeassa ylälaidassa ja rakennusten nurkissa kuvassa 16. Lopullisesta ortokuvasta kannattaa karsia korkeusmallin reuna-alueet ulkopuolelle. UAV-kuvauksesta saadun ortokuvan laatu on selkeästi parempi kuin Maanmittauslaitoksen ortokuva alueelta (kuva 16).



Kuva 15. PhotoScanista saatu ortokuva alueesta.



Kuva 16. Maanmittauslaitoksen ortokuva vasemmalla ja UAV-kartoituksesta saatu ortokuva oikealla.

5 UAV-kartoituksen laatu ja geometrinen tarkkuus

Kaukokartoituksen laatuun liittyvät seuraavat käsitteet [23]:

- radiometrinen laatu
- spektraali erotuskyky
- spatiaalinen erotuskyky
- temporaalinen erotuskyky
- geometrinen tarkkuus.

Radiometrisellä laadulla tarkoitetaan kuvan sävyjä ja kontrasteja. Radiometristä laatua parantaa kuvan värisyvyys. Parhaimmat järjestelmäkamerat ottavat 14-bittisiä kuvia, jossa jokaisella kanavalla (RGB) on 16 384 eri sävyä. Normaalit LCD-näytöt ovat vain 8- tai korkeintaan 10-bittisiä, joten 14-bittiset kuvat eivät toistu oikein. Visuaalista tulkintaa varten kuvia voidaan parantaa nostamalla esimerkiksi varjojen kirkkautta, mutta tällöin radiometrinen laatu heikkenee, koska kuvassa vähemmän eri sävyjä. UAV-ilmakuvauksen radiometristä laatua voi parantaa käyttämällä järjestelmäkameraa ja RAW-formaattia. [24]

Spektraalinen laatu määräytyy kuvalla näkyvien sähkömagneettisten spektrien määrästä. Heikoimmillaan spektraalinen laatu on, kun kuvataan vain yhtä kanavaa, kuten näkyvää valoa. Siviilipuolella UAV-ilmakuvauksessa kuvataan yleensä vain näkyvää valoa tai infrapuna-aluetta [24]. Tästä syystä se on heikompi spektraaliselta laadultaan kuin muut kaukokartoitusinstrumentit. Myös UAV-käyttöön on ilmestynyt lähiaikoina kevyitä hyperspektrikameroita kuten VTT:n ja Rikola Ltd:n kehittämä malli, jolla voidaan kuvata useita eri aallonpituuksia.

Spatiaalisella erotuskyvyllä tarkoitetaan pienintä mahdollista yksityiskohtaa, joka kovalta on erotettavissa [24]. UAV-ilmakuvauksessa spatiaalinen resoluutio on yleensä selvästi parempi kuin muilla kaukokartoitusinstrumenteilla, mutta kuvattavan alueen koko on selvästi pienempi.

Temporaalinen (ajallinen) resoluutio tarkoittaa, kuinka pitkin aikaväleihin samasta kohteesta saadaan tietoa [24]. Satelliittikuvia voi tulla samasta kohteesta parin kuukauden välein, mutta UAV:llä tietoa voidaan kerätä esimerkiksi viikoittain tai vieläkin

useammin tarpeen vaatiessa. Toisaalta talvella tai huonoissa olosuhteissa UAV:ta ei välttämättä voi käyttää.

Geometrisella laadulla tarkoitetaan datan sijainnin tarkkuutta. Tasotarkkuudeksi UAV:llä saadaan hyvässä tapauksessa $1 * GSD$ [25]. Pix4D:n tutkimuksessa UAV:llä on saatu korkeustarkkuudeksi $2-3 * GSD$ [26]. Tässä aineistossa hyvä teoreettinen tasotarkkuus olisi n. 4 cm ja korkeustarkkuus 8–11 cm. Prosessointiohjelmiston ilmoittamaa GSD:tä katsoessa täytyy huomioida, että se on keskiarvo koko mallista, johon vaikuttaa myös kameran etäisyys korkeimpaan maaston tasoon kuten puihin ja rakennuksiin. Aineistossa on myös eri korkeuksilta kuvattuja kuvia.

Tarkkuutta tutkiessani minua kiinnosti georeferoinnissa käytettyjen kontrollipisteiden läheisyyden riippuvuus aineiston tarkkuuteen. Tutkin asiaa tasotarkkuuden korrelaatiolla kontrollipisteiden etäisyyteen. Korrelaatio ei todista näiden riippuvuutta, mutta on hyvä vihje siitä.

Katsoessa saamiani tuloksia on ymmärrettävä tarkkuuden ilmoittamiseen liittyvät termit. Keskihajonta ilmoittaa kartoitetun aineiston keskimääräisen hajonnan verrattuna referenssipisteisiin ja ei ota huomioon systemaattista virhettä. RMS (Root Mean Square) on tässä tapauksessa keskihajontaa parempi tapa virheiden ilmoittamiseen, koska se sisältää systemaattisen virheen ja antaa siten luotettavamman kuvan tarkkuudesta. Keskiarvo dz ilmoittaa aineiston keskimääräisen etäisyyden noltaan ja siitä nähdään mahdollinen korkeussiirtymän määrä. RMS-arvosta laskin normaalijakautuneelle aineistolle 95 %:n ja 99 %:n luotettavuustasot, jotka saadaan kertoimilla 1,96 sekä 2,54. Luotettavuustasolla ilmoitetaan tarkkuus, jota parempaan tarkkuuteen esimerkiksi 99 % aineistosta sisältyy. Tasotarkkuudesta laskin 95 %:n luottamustason eli 2DRMS-luvun (2-Dimensional RMS). 2DRMS-lukua käytetään ilmoittaessa luotettavuutta kahdella akselilla. 2DRMS on $2 * RMS$. Minimi dz ja Maksimi dz ilmoittavat suurimmat virheet. [27; 28.]

Tässä insinööriyössä en käsittele erityisesti GPS- ja takymetrimittauksista syntyviä virheitä, mutta liitteessä 2 on luettavissa takymetrin orientoinnin tiedot. Orientoinnin jäännösvirheeseen täytyy lisätä kulma- ja etäisyysvirheet. Mittauslaitteina minulla oli käytössä Leica Viva TS15 -takymetri ja Viva GNSS GS15 -vastaanotin. SmartNet verkkoa käyttäen GPS-mittauksen RMS on avoimessa maastossa 2–3 cm [29]. Saamani maastomittaukset oli mitattu vastaavilla Trimblen laitteilla. Aineistot on aikaisempien

maastomittausten takia mitattu N60-korkeusjärjestelmään ja ETRS-TM35FIN-tasokoordinaatistoon, joten Maanmittauslaitoksen pistepilvi jouduttiin muuntamaan N60-korkeusjärjestelmään. Muunnosvirheet ovat aina alle 30 mm ja 83 %:n todennäköisyydellä alle 5 mm. [30].

Tuloksia katsoessa on huomioitava, että Pix4D:n aineisto on prosessoitu aikaisemmin, sen prosessointiin on käytetty vähemmän kuvia ja vähemmän kontrollipisteitä. Täten tuloksien suora vertailu toisiinsa ei ole mielekäästä.

5.1 Ortokuvan tasotarkkuus Pix4D- ja PhotoScan-ohjelmilla

Tasotarkkuutta tutkin lataamalla ortokuvan Bentley Microstation V8i -ohjelmaan ja käyttäen sen mittaustyökalua sain mitattua käsin matkoja omien kontrollipisteiden ja ortokuvan välillä. Mittaustyökalulla etäisyyksien mittaaminen on osittain arviointia, mutta tämä oli oikeastaan ainoa tapa saada tuloksia tasotarkkuudesta, kun aineisto oli jo valmiiksi kartoitettu, eikä ylimääräisiä signaalipisteitä ollut. Kontrollipisteet olivat mahdollisimman hyvin näkyviä maaliviivoja asfaltissa, joiden sijainti oli mitattu käyttäen GPS- ja takymetrimittausta. Käytännössä pisteen paikan valinta oli hyvin hankalaa, koska yhden pikselin virhe aiheuttaa vähintään 3,8 cm:n virheen mittaustuloksessa. Lisäksi kameran optiikka ja erotuskyky ei ollut tarpeeksi tarkka, että maaliviivat olisivat näkyneet täysin yksiselitteisesti. Tämän takia ilmakuvausta suorittaessa olisi hyvä olla paljon ylimääräisiä signaaleita, joiden sijainti on suuren koon vuoksi helpompi selvittää ja aineiston laatua voidaan tarkistaa.

Pix4D-aineistolla tasossa RMS on 8,4 cm ja PhotoScanilla 5,6 cm (taulukot 1 ja 2). Lukemat ovat hieman huonompia, kuin Trimble ilmoittaa tarkkuudeksi hyvässä tilanteessa omilla laitteillaan ja kuin itse odotin. PhotoScanin tarkkuus eroaa GSD:stä melko vähän, sillä ilmakuvissa GSD oli n. 3,8–5 cm. Osa virheestä johtuu varmasti mittaustavasta, jota jouduin käyttämään tasotarkkuuden selvittämisessä ja kontrollipisteiden syöttämisen epätarkkuudesta. Osa epätarkkuudesta voi aiheutua siitä, että ortokuvaa varten tarvittavassa pistepilven luonnissa käytettiin kuvista puolitettyä resoluutiota Agisoftin ohjeiden mukaisesti.

PIX4D:n tapauksessa korrelaatiokertoimesta 0,71 selviää, että etäisyydellä kontrollipisteisiin sekä tarkkuudella on positiivinen korrelaatio; pisteet ovat sitä

tarkempia, mitä lähempänä ne ovat kontrollipisteitä. Tämä vahvistaa myös sitä käsitystä siitä, että signaalipisteitä ei ole tarpeeksi PIX4D:n kartoituksessa. PhotoScanin ortokuvassa korrelaatiokerroin oli 0,47, joten myös sen tapauksessa on jonkin verran positiivista korrelaatiota.

Taulukko 1. Pix4D-palvelussa prosessoidun aineiston tasotarkkuus

piste	XY-virhe (m)	keskiarvo etäisyydestä kahdelle lähimmälle kontrollipisteelle (m)
1	0,0797	154,00
2	0,1007	156,00
3	0,0791	191,00
4	0,1277	281,00
5	0,0690	126,00
6	0,0692	126,00
7	0,0732	140,00
8	0,0537	124,00
9	0,0209	123,00
10	0,0881	147,00
11	0,0890	167,00
12	0,1039	143,00
RMS (m)	0,084	
2DRMS 95 % (m)	0,168	
korrelaatio	0,71	

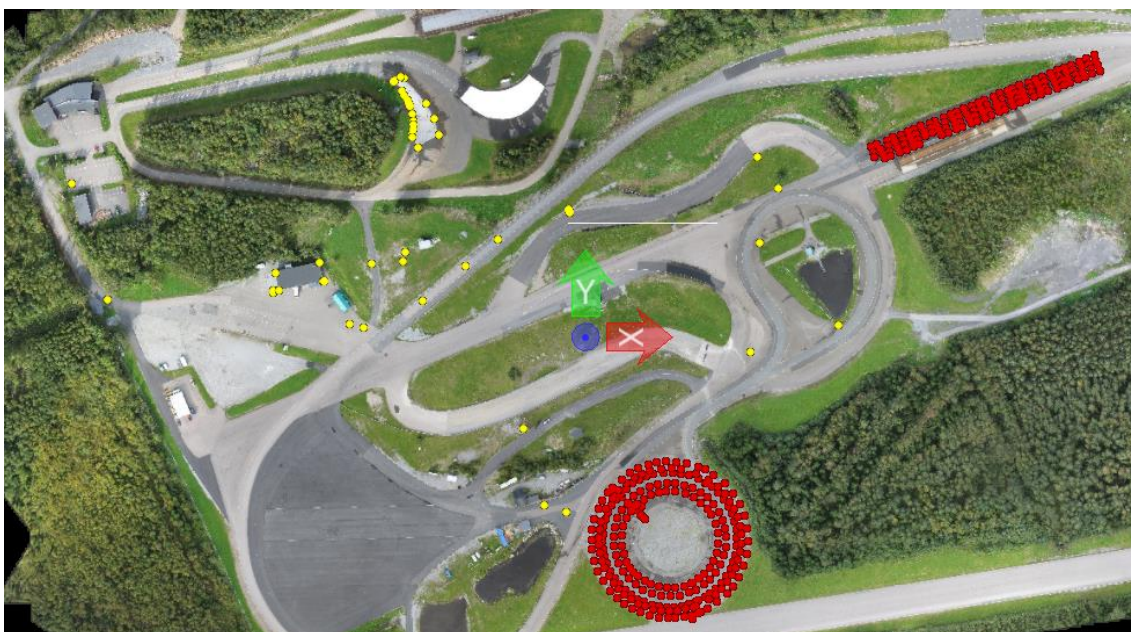
Taulukko 2. Agisoft PhotoScan -ohjelmalla prosessoidun aineiston tasotarkkuus

piste	XY-virhe (m)	keskiarvo etäisyydestä kahdelle lähimmälle kontrollipisteelle (m)
1	0,0679	65,50
2	0,0974	58,50
3	0,0388	84,00
4	0,0371	60,50
5	0,0500	112,00
6	0,0303	11,50
7	0,0617	62,00
8	0,0367	38,50
9	0,0534	40,50
10	0,0203	29,00
11	0,0745	15,00
RMS (m)	0,056	
2DRMS 95 % (m)	0,112	
korrelaatio	0,47	

5.2 Pistepilven korkeustarkkuus Pix4D- ja PhotoScan-ohjelmilla

Korkeustarkkuutta tutkin Terrasolidin Terrascan-ohjelmalla. Latasin pistepilviaineiston Terrascaniin ja käytin sen output control report -työkalua vertaamaan pistepilveä referenssipisteisiin. Työkalulla voi verrata pistepilven ja haluttujen pisteiden korkeuksia halutuun kriteeriin. Lopputuloksena se tulostaa kummankin pistejoukon yhteisen korkeuserojen keskiarvon, suurimman negatiivisen ja positiivisen korkeuseron, keskiarvoisen magnitudin, neliöllisen keskiarvon (RMS) ja keskihajonnan. Työkalua voi käyttää apuna systemaattisen korkeusvirheen poistamiseen ja esimerkiksi laserkeilaimen kalibrointiin.

Selvitin korkeustarkkuuden jarrusuoralle ja ympyräosuudelle, jotka näkyvät kuvassa 17 punaisina pisteinä (358 pistettä) sekä erikseen keltaisille eri puolilla aluetta sijaitseville hajapisteille (58 pistettä).



Kuva 17. Korkeustarkkuuden laskennassa käytetyt pisteet

Osan käytetyistä tarkistuspisteistä mittasin noin puoli vuotta myöhemmin talvella, joten maanpinnan korkeudenvaihtelukin on vaikuttanut tuloksiin. Mittauskohde oli rengastestirata, joten tämän virheen voisi kuvitella olevan aika pieni.

5.2.1 Korkeustarkkuus jarrusuoralla ja ympyränmuotoisella osalla rataa

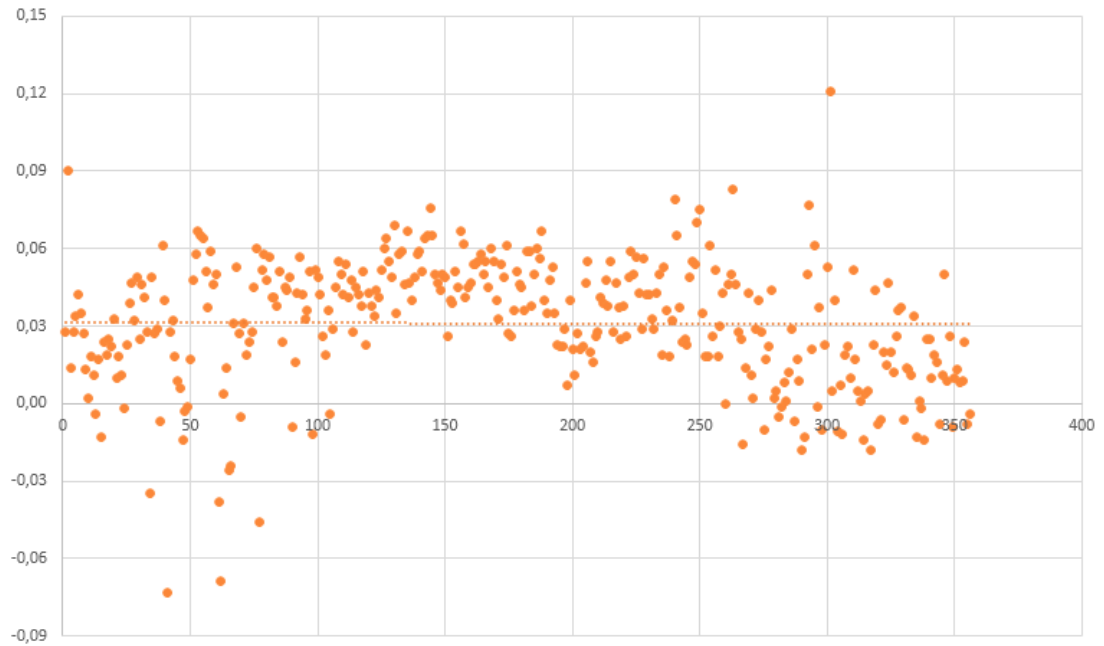
Keskiarvo dz:sta (taulukko 3) voidaan huomata, että pistepilvi on PIX4D:n käsittelemänä keskimäärin 18 mm alempana kuin maastomitatut tarkastuspisteet ja PhotoScanilla käsiteltynä pistepilvi on 31 mm korkeammalla kuin tarkastuspisteet. PhotoScanin tuloksissa on siten enemmän systemaattista virhettä verrattuna Pix4D-palvelun prosessoimaan aineistoon.. Keskihajonta on PhotoScanilla reilusti pienempi kuin PIX4D:llä. RMS on 40 mm, ja 99 %:n luottamustaso on alle 3 * GSD. Tarkkuus on systemaattisesta virheestä huolimatta parempi kuin Pix4D:llä. Suurimmat virheet ovat PIX4D:llä suuria (25 cm).

Taulukko 3. Aineistojen korkeustarkkuus kummallakin ohjelmalla

PIX4D		Agisoft PhotoScan	
keskiarvo dz (m)	-0.018	keskiarvo dz (m)	+0.031
minimi dz (m)	-0.250	minimi dz (m)	-0.072
maksimi dz (m)	+0.120	maksimi dz (m)	+0.101
RMS (m)	0.044	RMS (m)	0.040
keskihajonta (m)	0.041	keskihajonta (m)	0.025
95 % (m)	0,086	95 % (m)	0,078
99 % (m)	0,113	99 % (m)	0,102

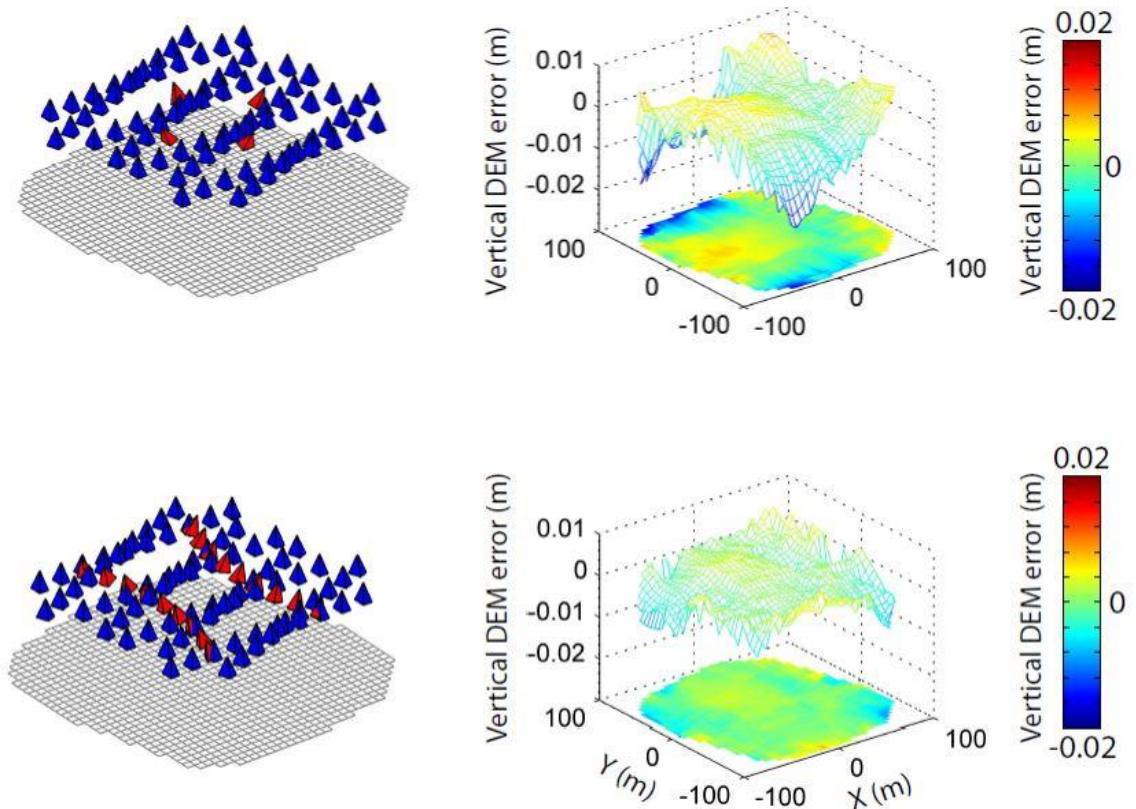
Kuviosta 1 voidaan nähdä systemaattinen korkeusvirhe. Pisteissä välillä 100–200 korkeussiirtymä on selvästi 3,1 cm:ä enemmän, ja pisteissä 260–358 se pienenee. Microsoft Excelin logaritminen trendiviiva osuu myös kohtaan 3,1 cm.

PhotoScanin ja referenssipisteiden korkeuksien erotukset



Kuvio 1. Pystyakselilla korkeuksien erotus metreinä ja vaaka-akselilla pistenumerot

Systemaattinen korkeusvirhe aiheutuu yleensä kameran kalibroinnista, kontrollipisteistä ja kuvausgeometriasta. Varsinkin kompaktkameroilla ilmakuvatessa pitäisi systemaattisen korkeusvirheen varalta kuvata myös vinokuvia (kuva 18) [31]. Vinokuvien kuvaaminen voi olla vaikeaa monilla laitteistoilla.



Kuva 18. Konvergenssin lisääminen vähentää suurimpia korkeusvirheitä [31].

Systemaattista korkeusvirhettä voidaan halutessa korjata Terrascanin työkalulla *transform loaded points*. Tällöin aineiston geometrinen laatu paranee ainakin keskimäärin referenssipisteiden alueella, mutta muualla virhettä voi tulla lisää. Pistepilveä lasketaan 3,1 cm alemmaksi. Pyörityksestä johtuen pistepilven ja tarkistuspisteiden välille jäi 1 mm keskiarvoinen korkeusero (taulukko 4). Minimi dz huonontui ja maksimi dz parani. Nyt RMS ja keskihajonta ovat käytännössä yhtä suuret. Normaalissa käytössä systemaattisen korkeusvirheen huomaaminen ei välttämättä olisi mahdollista, koska ei ole ajallisesti järkevää mitata useita satoja pisteitä tarkastamista varten paitsi tehtävissä, joissa samaa aluetta tullaan mittaamaan useita kertoja. Pistepilven laatua voi parantaa vielä poistamalla siitä pisteitä luokittelun avulla. Sitä kokeilin itse TerraScanin *classify air points*, ja *low points* -työkalujen avulla, joissa karkeasti ottaen määrätään alueen koko ja se, kuinka paljon piste saa erota muista alueen pisteistä luodusta pinnasta. Luokitellulla pistepilvellä RMS ja keskihajonta parantuivat vain 1 mm:n verran.

Taulukko 4. PhotoScanin tulokset systemaattinen korkeusvirhe korjattuna sekä pistepilvi luokiteltuna.

Agisoft PhotoScanin pistepilvi systemaattinen korkeusvirhe korjattuna sekä luokiteltuna	
keskiarvo dz (m)	+0.001
minimi dz (m)	-0.0103
maksimi dz (m)	+0.71
RMS (m)	0.024
keskihajonta (m)	0.024
95 % (m)	0,047
99 % (m)	0,061

5.2.2 Korkeustarkkuus muissa pisteissä

Korkeustarkkuutta mittaavat muut 56 pistettä sijaitsivat rakennusten katoilla, asfaltilla ja kasvittomalla maanpinnalla. PhotoScanin pistepilvestä ei löytynyt näiden pisteiden alueella systemaattista korkeuden siirtymää (taulukko 5). Edellisessä kappaleessa tehty korkeuden siirto olisi siten todellisuudessa huonontanut pisteiden tarkkuutta näiden pisteiden alueella. Pix4D:llä pisteet olivat keskimäärin 45 mm alempana kuin maastomitatut pisteet. PhotoScanilla RMS oli myös näissä pisteissä parempi kuin ennakkokäsitykseni oli ja myös 99 %:n luotettavuustaso on alle 3*GSD.

Taulukko 5. Kummankin ohjelman tulokset korkeustarkkuudesta

PIX4D		Agisoft PhotoScan	
keskiarvo dz (m)	-0.045	keskiarvo dz (m)	+0.001
minimi dz (m)	-0.261	minimi dz (m)	-0.171
maksimi dz (m)	+0.278	maksimi dz (m)	+0.086
RMS (m)	0.098	RMS (m)	0.041
keskihajonta (m)	0.088	keskihajonta (m)	0.041
95 % (m)	0,192	95 % (m)	0,080
99 % (m)	0,251	99 % (m)	0,105

5.3 Korkeustarkkuus verrattuna Maanmittauslaitoksen pistepilviaineistoon

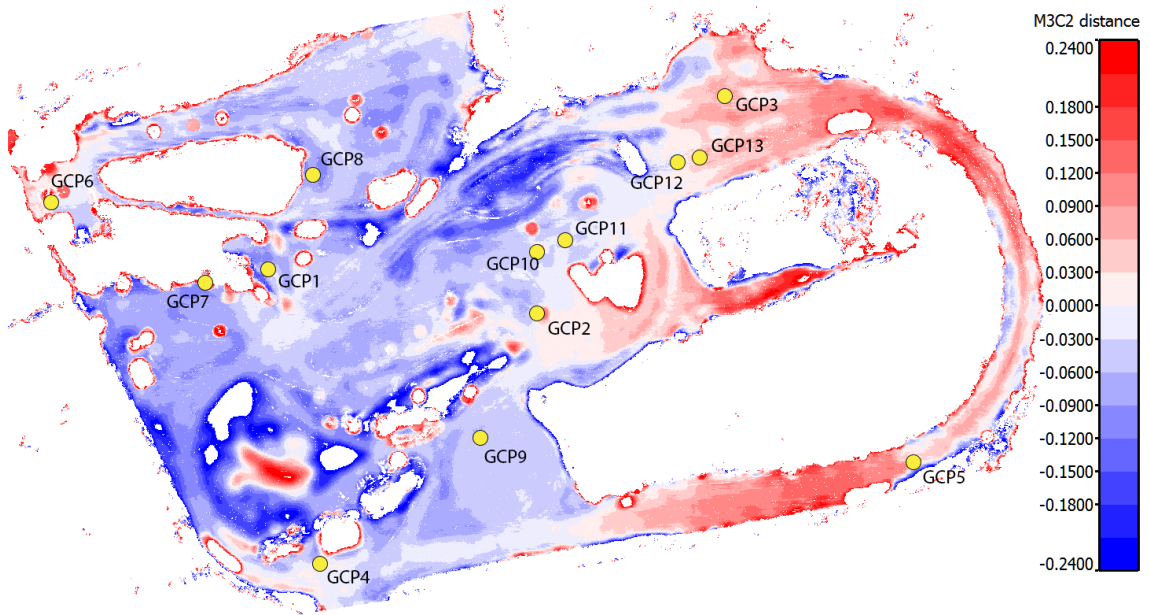
Latasin Maanmittauslaitoksen ilmalaserkeilauksella mitatun pistepilven ja vertailin sitä referenssipisteisiin jarrusuoralla ja ympyränmuotoisella osuudella rataa. Maanmittauslaitoksen pistepilveä jouduin laskemaan Maanmittauslaitoksen muunnospalvelun mukaisesti 31,4 cm, koska se oli N2000-järjestelmässä. Tarkkuuden tunnusluvut (taulukko 6) ovat huonompia kuin PhotoScanilla käsitellyssä aineistossa.

Maanmittauslaitoksen pistepilvessä keskiarvo dz verrattuna maastomittaukseen on vain +4 mm, joten pistepilvessä ei juuri ole systemaattista korkeusvirhettä.

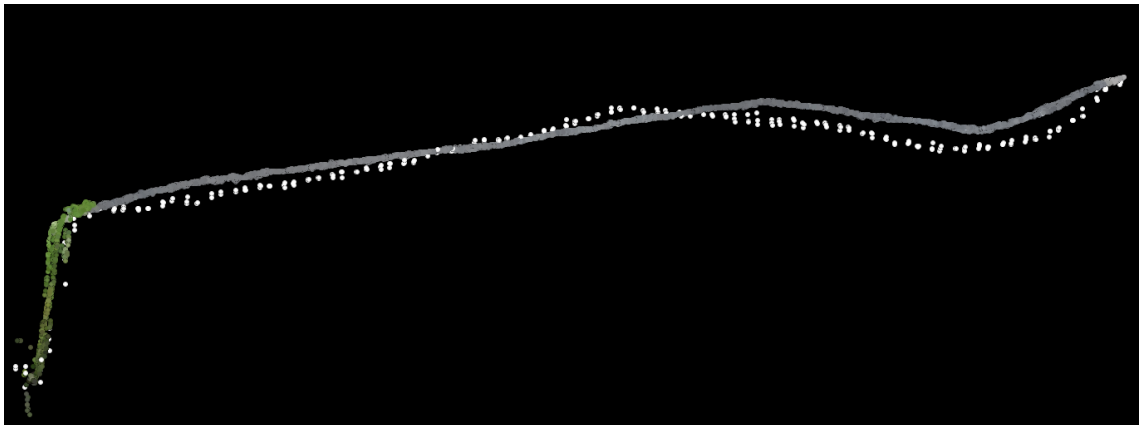
Taulukko 6. Maanmittauslaitoksen pistepilviaineiston korkeustarkkuus

Maanmittauslaitoksen pistepilvi	
keskiarvo dz (m)	+0.004
minimi dz (m)	-0.230
maksimi dz (m)	+0.280
RMS (m)	0.056
keskihajonta (m)	0.056
95% (m)	0,109
99% (m)	0,143

Kuvassa 19 on esitetty Maanmittauslaitoksen ja PhotoScanin pistepilvien välinen korkeusero. Vertailu on tehty ilmaisen CloudCompare-ohjelman versiolla 2.6.1 käyttäen M3C2-pluginia. Vertailussa on mukana TerraScanilla maapisteiksi luokitellut pisteet, jotka eroavat alle 24 cm Maanmittauslaitoksen pistepilvestä. Kuvasta selviää pistepilvien välinen suuri ero. Asfalttialueilla on useassa paikassa pahimmillaan noin 30 cm:n korkeuseroja (kuva 20), joten alueet jäävät valkoiseksi. Lisäksi oikealla puolella aluetta korkeusero on positiivinen ja vasemmalla puolella negatiivinen. Keskiosassa aluetta korkeuserot ovat pienimmillään, joka voi johtua kuvien suuremmasta määrästä ja kontrollipisteistä. Varsinkin kuvassa alueen oikealla puolella näkyvä korkeusero voisi selittyä UAV-kartoituksen laadulla. Alueella oli tien sivuilla tiheää metsää ja jouduin poistamaan monia tärähtäneitä kuvia. Kuvien huono määrä alueella näkyy myös PhotoScanin raportissa liitteessä 1.



Kuva 19. Maanmittauslaitoksen ja PhotoScanin pistepilven välinen ero sekä kontrollipisteet

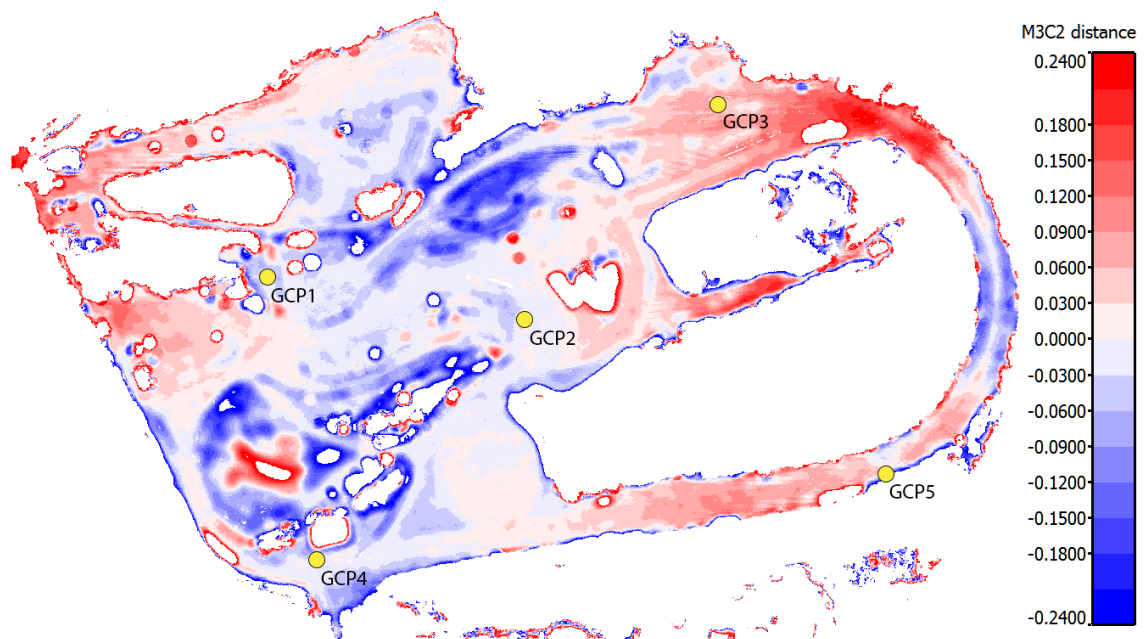


Kuva 20. Leikkauskuva Maanmittauslaitoksen pistepilvestä (valkoisella) ja PhotoScanin pistepilvestä (värillisellä). Korkeusero on 10-kertaistettu kuvan havainnollistamiseksi.

Omissa referenssipisteissäni ei ollut montaa pistettä alueilta, joilla korkeuserot olivat suurempia, joten on vaikea todistaa jompaakumpaa aineistoa tarkkuudeltaan paremmaksi. Maanmittauslaitoksen pistepilvi voi olla myös useita vuosia vanhempi. Kuvaa katsomalla näyttäisi kuitenkin olevan selvää, että PhotoScanin pistepilvi ei ole tasalaatuinen eri puolilla aluetta, sillä alueen keskiosassa maanmittauslaitoksen aineiston RMS oli vain 5,6 cm ja erot UAV-kartoitukseen alle 6,0 cm. 20–30 cm:n korkeuserot alueen reunoilla eivät selity pelkästään laserkeilauksen virheillä. Kuvasta voi huomata, että suurimmat korkeuserot ovat kaukana kontrollipisteistä. Tämä tukisi myös

aikaisemmin tasotarkkuus kohdassa saatuja havaintoja kontrollipisteiden ja tarkkuuden korrelaatiosta.

Pix4D:n ja Maanmittauslaitoksen pistepilvien korkeusero (kuva 21) on samankaltainen kuin PhotoScanin tapauksessa, mutta korkeuserot alueen keskiosassa ovat pienempiä kuin PhotoScanin aineistossa. Suurin ero löytyy kuvan vasemmasta yläkulmasta, josta Pix4D:n kartoituksesta puuttui signaalipiste, mutta ero voi selittyä myös kuvien pienemmällä määrällä.



Kuva 21. Maanmittauslaitoksen ja Pix4D:n pistepilven välinen ero sekä kontrollipisteet.

6 Yhteenveto

Insinööriyöni antoi tietoa erityisesti UAV-kartoitusten jälkikäsittelystä ja laadusta käyttäen edullista laitteistoa. Tasotarkkuus oli lähes teorian mukainen $1 * \text{GSD}$. Korkeustarkkuuteen liittyen minut yllätti systemaattisen korkeusvirheen määrä verrattuna keskihajontaan. Asiaa tutkiessani huomasin, että UAV-kartoituksiin liittyvistä alueittaisista korkeussiirtymistä oli huomioita muissakin tutkimuksissa. Korkeustarkkuus kokonaisuutena oli silti yllättävän hyvä ja alle $3 * \text{GSD}$. Sain silti käsityksen, että laajemmalla sekä tarkemmalla referenssiaineistolla alueen reunoilta olisi voinut löytyä

suurempia virheitä, jotka jäivät tarkkojen numeroiden puolesta tässä työssä selvittämättä. Käytettävissä olevaan aineistoon nähden olen tyytyväinen tuloksiini. Tuloksia voi pitää luotettavana.

Huonosti toteutetussa kartoituksessa on laajoja systemaattisia virheitä ja karkeita virheitä, jotka pysyvät käytännön työssä kuitenkin piilossa ilman laajoja vertailuaineistoja. Toisaalta sama ongelma koskee myös muita mittausmenetelmiä. Näyttäisikin siltä, että laadukas aineisto (tasotarkkuudeltaan $1 * GSD$ ja korkeustarkkuudeltaan $2 * GSD$) saavutetaan UAV-ilmakuvauksessa vain hyvällä kalibroidulla kalustolla sekä suurella määrällä kuvia ja kontrollipisteitä.

UAV:n hyödynnettävyyttä lisää sen monipuolisuus. Maanmittausalalla pintamallien ja ortokuvien lisäksi sillä voi esimerkiksi jo nyt ottaa valokuvia vaikeapääsyisistä paikoista suunnittelua varten, löytää lämpökameralla lämpövuotoja, kuvata hyperspektrikuvia metsä- ja maatalouden analyyseja varten. Pintamallit soveltuvat jo nyt hyvin massa- ja määrälaskentoihin.

Mielenkiintoista tutkittavaa aiheesta olisi esimerkiksi lennokin sijainnin määrittäminen vaihtoehtoisilla tavoilla. RTK-mittauksella tai takymetrillä lennokkia seuraamalla voitaisiin nopeuttaa prosessointia ja saavuttaa parempia tuloksia ulkoisen orientoinnin laskennassa. Myös signaalipisteiden määrän vaikutusta tarkkuuteen pinta-alaltaan suurissa aineistoissa olisi hyvä tutkia lisää.

Uskon UAV-ilmakuvauksen yleistyvän kartoituksessa aivan lähitulevaisuudessa, ja sen lisäksi monia maanmittaustekniikan sovellutuksia tullaan hyödyntämään muissa lennokkeihin liittyvissä sovellutuksissa.

Lähteet

- 1 Gilblom David, Yoob Sang Keun. 2004. Infrared and ultraviolet imaging with a CMOS sensor having layered photodiodes. Verkkodokumentti. <http://www.alt-vision.com/documentation/5301A-25.pdf> Luettu 25.2.2015
- 2 Fotogrammetria ja kaukokartoitus -esittelyteksti. 2014. Verkkodokumentti. Aalto yliopisto. <http://maa.aalto.fi/fi/research/gma/photogrammetry/> Luettu 24.2.2015
- 3 Haggren Henrik. 2011. 200 vuotta fotogrammetrian ja kaukokartoituksen historiaa. Verkkodokumentti. http://foto.hut.fi/seura/julkaisut/pjf/pjf_e/2011/PJF2011_3_Haggren.pdf Luettu 4.2014
- 4 Haggren Henrik. 2002. Fotogrammetrian yleiskurssi. Verkkodokumentti. Aalto yliopisto. <http://foto.hut.fi/opetus/301/luennot/1/1.html> Luettu 4.2014
- 5 Fraser C. S. 1996. Close-Range Photogrammetry and Machine Vision. Whittles Publishing.
- 6 Hyttinen Teemu. 2012. Miehittämättömiin ilma-alusjärjestelmiin perustuvat palvelukonseptit. Diplomityö. Aalto yliopisto.
- 7 Räjähdejätekontin kuumeneminen räjähdetehtaalla Laukaan Vihtavuorella. 2013. 10.7.2013. Tutkintaselostus. Verkkodokumentti. Onnettomuustutkintakeskus. <http://www.videodrone.fi/images/PDF/Y2013-02%20Vihtavuori.pdf> Luettu 11.2014
- 8 Teal Group Predicts Worldwide UAV Market Will Total \$91 Billion in Its 2014 UAV Market Profile and Forecast. 2014. Verkkodokumentti. Teal Group Corporation. <http://www.tealgroup.com/index.php/about-teal-group-corporation/press-releases/118-2014-uav-press-release> Luettu 24.2.2015
- 9 Hassinen Alpo. 2013. Kokemuksia UAV-laitteista. Verkkodokumentti. Itä-Suomen yliopisto. <http://mekri.uef.fi/uav/UAV-lennokit.pdf> Luettu 24.2.2015.
- 10 Määräyshankepääätös. 2015. Verkkodokumentti. TraFi. http://www.trafi.fi/filebank/a/1423742072/3eb96c37ec9abd66db6c8101974dc54d/16818-RPAS_OPS_2015.pdf luettu 24.2.2015
- 11 SenseFly set to release eBee industrial UAV. 2013. Verkkodokumentti. <http://www.gizmag.com/sensefly-ebee-uav/25851/> Luettu 24.2.2015
- 12 SenseFly swingleCAMin valmistajan sivusto. 2015. Verkkodokumentti. <https://www.sensefly.com/drones/swinglelet-cam.html> Luettu 4.2014

- 13 Canon Ixus 220 HS Tekniset tiedot. Verkkodokumentti. Canon.
http://www.canon.fi/for_home/product_finder/cameras/digital_camera/ixus/ixus_220_hs/ Luettu 4.2014
- 14 SenseFly Emotion -ohjelman kuva. Verkkodokumentti. <http://www.r-pod.ch/2012/06/19/journee-chaude-aux-paquis/>
- 15 Orthophoto and DEM Generation (with GCPs). Verkkodokumentti. Agisoft.
<http://www.agisoft.com/index.php?id=31> Luettu 4.2014
- 16 Haggren Henrik. 2008. Kameran kalibrointi. Luentomoniste. Aalto yliopisto.
http://foto.hut.fi/opetus/260/luennot/4/2008_maa57260_kalibrointi.pdf Luettu 25.2.2015
- 17 Kuva kameran sisäisestä orientoinnista. Verkkolähde. http://www.ds-t.com/software-cd/software/Qualup/Graphics/camera_01.png
- 18 Otantajakauma. Luentomoniste. Verkkodokumentti. Jyväskylän yliopisto.
<http://users.jyu.fi/~tatima/TER/Luento6%28oj+lv%29.pdf> Luettu 25.2.2015
- 19 PhotoScan Pro User Manual. 2014. Verkkodokumentti. Agisoft.
http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_1_en.pdf 25.2.2015
- 20 Korkeusmallit. Verkkodokumentti. Maanmittauslaitos.
<http://www.fgi.fi/fqi/fi/teemat/korkeusmallit> 24.2.2015
- 21 Q&A. 2007. Verkkodokumentti. Geospatial Information Authority of Japan.
<http://www.gsi.go.jp/WNEW/TEC-NEWS/2007-tec172.html> Luettu 4.2014
- 22 Digital Elevation II – TIN Data Structure. Verkkodokumentti. University of Arizona.
http://www.learningace.com/doc/4667192/df9f43df24c8aa9230b79077630405cb/lect4_tins Luettu 26.2.2015
- 23 Ortokuvat. Maanmittauslaitos. Verkkodokumentti.
<http://www.maanmittauslaitos.fi/node/12516> Luettu 25.2.2015
- 24 Ikola Timo. 1999. Satelliittidatoista ja niiden tarkkuudesta. Seminaariesitelmä. Verkkodokumentti. Teknillinen korkeakoulu.
<http://foto.hut.fi/opetus/270/esitelmat/1999/Timolkola/SEMINAA.htm> Luettu 15.1.2015
- 25 McCain, McMurray. 2014. Accuracy Assessment of an eBee UAS Survey. Verkkolähde. <http://www.slideshare.net/senseFlyDrones/accuracy-assessment-of-an-ebec-uas-survey> Luettu 25.2.2015§

- 26 How accurate are UAV surveying methods. 2014. Verkkodokumentti. Pix4D.
https://support.pix4d.com/hc/en-us/article_attachments/200932859/Pix4D_White_paper_How_accurate_are_UAV_surveying_methods.pdf Luettu 25.2.2015
- 27 Taavitsainen Veli-Matti. 2010. Tilastomatematiikan peruskurssi. Luentomoniste. Verkkodokumentti. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
http://users.metropolia.fi/~velimt/TilMat/tilmatpk_with_R.pdf Luettu 26.2.2015
- 28 GPS Position Accuracy Measures. 2003. Verkkodokumentti. NovAtel.
<http://www.mat.uc.pt/~gil/downloads/GPSMedidasExactidao.pdf> Luettu 25.2.2015
- 29 Toivonen Tuomas, Ylikoski Juho. 2013. Verkko-RTK-mittaus. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 30 Ahola Mikko ja Musto Matti. 2011. Valtakunnallinen N2000/N60-muunnos. Verkkodokumentti. <http://www.kolumbus.fi/eino.uikkanen/H-II/MikkoAhola/N2000muunnos.pdf> Luettu 20.2.2015
- 31 James Michael. 2014. Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. Verkkolähde. Lancaster University.
[http://www.research.lancs.ac.uk/portal/en/publications/-\(8ae031db-27f8-4a58-a900-7e9573a351ac\).html](http://www.research.lancs.ac.uk/portal/en/publications/-(8ae031db-27f8-4a58-a900-7e9573a351ac).html) Luettu 24.2.2015

Agisoftin raportti prosessoinnista

Agisoft PhotoScan

Processing Report
03 April 2014



Survey Data

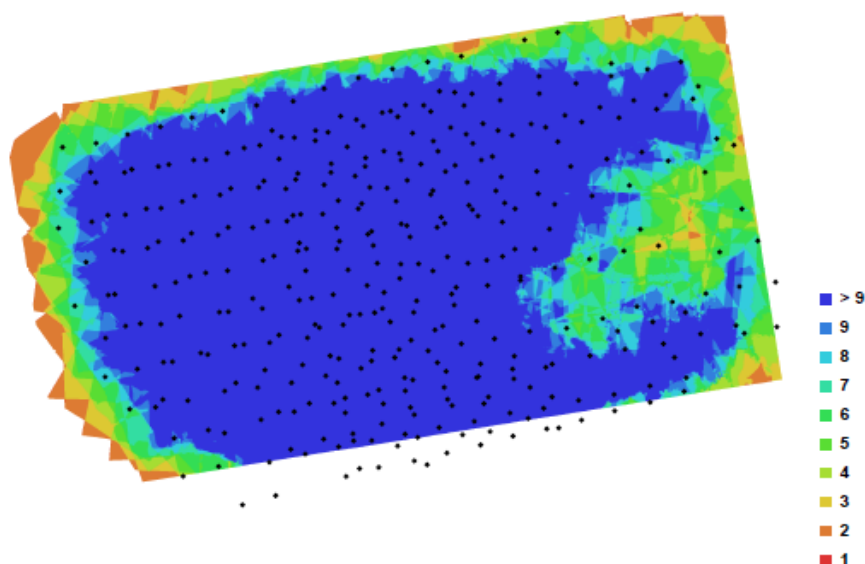


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	400	Camera stations:	362
Flying altitude:	122.294 m	Tie-points:	888481
Ground resolution:	0.0382776 m/pix	Projections:	2771424
Coverage area:	0.422834 sq km	Error:	0.642397 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
Canon IXUS 220HS (4.3 mm)	4000 x 3000	4.3 mm	1.5494 x 1.5494 um	Yes

Table. 1. Cameras.

Ground Control Points



Fig. 2. GCP locations.

Label	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
GCP1	-0.000192	-0.000107	-0.000212	0.000305	11	0.042424
GCP10	0.014931	0.008287	0.005972	0.018091	19	0.349717
GCP11	-0.004276	0.007363	0.000436	0.008525	13	0.192203
GCP12	0.000886	-0.001535	0.000944	0.002008	10	0.186886
GCP13	-0.000029	0.010520	0.001541	0.010632	15	0.324537
GCP2	0.005334	-0.010486	0.003249	0.012205	17	0.239028
GCP3	0.004223	-0.004604	0.003250	0.007042	23	0.214700
GCP4	0.001583	-0.008924	0.001611	0.009205	13	0.262608
GCP5	0.002254	0.002972	0.002082	0.004271	13	0.180294
GCP6	0.038252	0.003423	-0.006948	0.039029	19	0.710511
GCP7	-0.049530	-0.000397	0.016228	0.052122	17	0.693684

Label	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
GCP8	0.000923	-0.002222	-0.000949	0.002586	20	0.206489
GCP9	-0.022988	-0.004921	-0.004054	0.023855	16	0.305007
Total	0.019098	0.006180	0.005520	0.020819	206	0.370101

Table. 2. Control points.

Digital Elevation Model

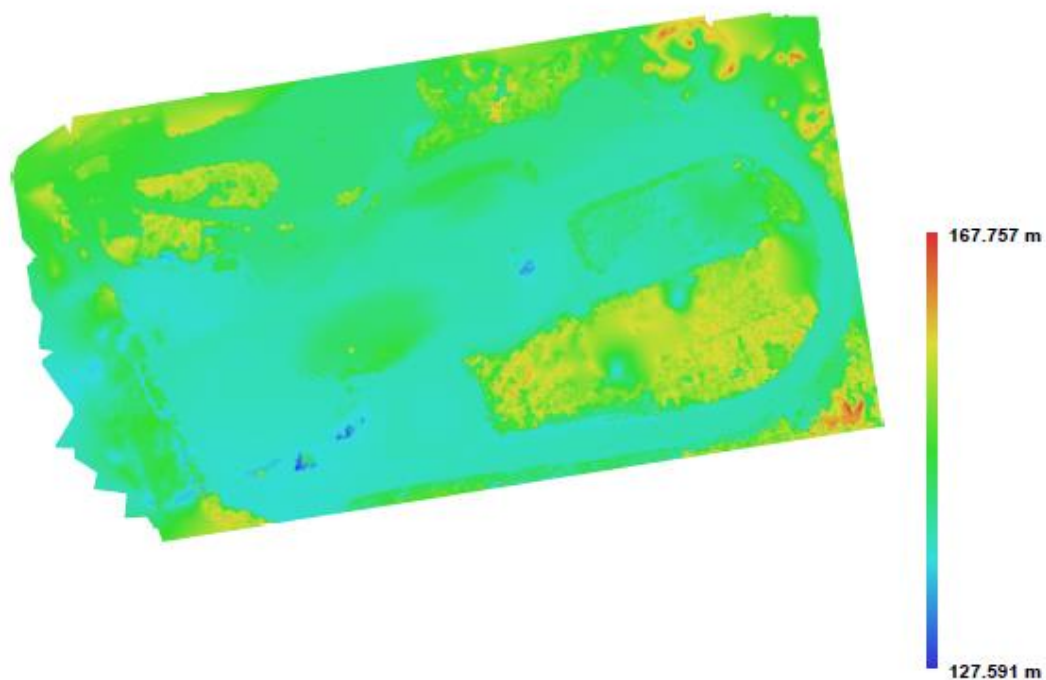


Fig. 3. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 0.0765551 m/pix
Point density: 62.4459 points per sq m

Raportti asemoinnista – Leica Viva TS15

Asemointi menetelmä "Vapaa asemapiste"					

Piste Nr.	Hz	V	Matka	Pri.K	Pri.Vakio
GPS217	160.7054	96.3915	7.345	1.941	0.0231
GPS218	250.8542	99.2890	6.147	1.941	0.0231
GPS219	350.2197	101.2092	9.261	1.941	0.0231
Jäännövirheet Piste GPS217	: dHz= 0.0232	dZ= -0.012		Käytä: 3D	
Jäännövirheet Piste GPS218	: dHz= 0.0022	dZ= -0.000		Käytä: 3D	
Jäännövirheet Piste GPS219	: dHz= -0.0155	dZ= 0.013		Käytä: 3D	
Tulokset					

Asemapiste Nr.	: 08021401				
		Y= 314761.616	X=6824195.713	Z=141.457	KojeK.= 0.000
Ori Korj.	: 44.1673				
Mittakaava	:				
Keskivirhe Y	: 0.003				
Keskivirhe X	: 0.004				
Keskivirhe Z	: 0.007				
Keskivirhe Ori.	: 0.0103				