

Ilkka Partonen

# Pienellä UAV-lennokilla (sUAV) kerätyn datan pistepilven korkeustarkkuuksista – case Nokian Renkaat

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (YAMK)

Rakentamisen koulutusohjelma

Maanmittauksen suuntautuminen

Opinnäytetyö

26.5.2014

<p>Tekijä Otsikko</p> <p>Sivumäärä Aika</p>	<p>Ilkka Partonen Pienellä UAV-lennokilla (sUAV) kerätyn datan pistepilven korkeustarkkuuksista – case Nokian Renkaat</p> <p>49 sivua + 12 liitettä 26.5.2014</p>
<p>Tutkinto</p>	<p>insinööri (YAMK)</p>
<p>Koulutusohjelma</p>	<p>rakentaminen</p>
<p>Suuntautumisvaihtoehto</p>	<p>maanmittaus</p>
<p>Ohjaaja</p>	<p>lehtori Jussi Laari</p>
<p>Opinnäytetyössä selvitettiin pienen UAV-lennokin (sUAV) käytön mahdollisuuksia maanmittaustekniikan sovellutuksissa ja sveitsiläisen Sensefly Ltd:n valmistaman, Swinglet-CAMilla kuvatun ja kuvausdatasta edelleen fotogrammetrisesti lasketun pistepilven tarkkuutta korkeuden osalta. Tutkimuksen tavoitteena oli myös selvittää, että onnistuuko perinteisillä fotogrammetrian sovellutuksilla UAV-lennokilla kerätyn datan käsittely. Tutkimus toteutettiin Nokian Renkaiden casen yhteydessä.</p> <p>UAV-datasta lasketun pistepilven korkeutta verrattiin ajoradan kahdesta eri kohtaa takymetrillä mitattuun korkeusmalliin nähden. Lisäksi pistepilveä verrattiin Maanmittauslaitoksen laserkeilausaineistoon laajemmasta osasta rata-aluetta. UAV-data prosessoitiin Agisoft LLC:n Photoscan Pro-sovelluksella. Pistepilvestä laskettiin korkeusmalli, jota käytettiin kuvamosaiikin orto-oikaisuun.</p> <p>Nokian Renkaiden lennökkikuvaus tehtiin noin 109 metrin korkeudesta. Käytettävissä olevalla kalustollamme se tarkoittaa noin 4 cm:n maastoresoluutiota. Pistepilven korkeustarkkuus radan kahdessa mitatussa kohdassa oli noin yksi pikseli ja radan ympäristössäkin avoimessa ja matalakasvuisessa maastossa noin 10 cm (2–3 pikseliä), kun vertauspintana käytettiin Maanmittauslaitoksen korkeusmallia.</p> <p>Lennökkikuvaukset Nokialla osoittivat, että UAV-lennokilla kerätyn datan tarkkuus riittää jo moneen maanmittaustekniikan sovelluksiin. Oletan UAV-lennokkien käytön lisääntyvän merkittävästi, kunhan tuleva ilmailulainsäädännön uudistus ei tule sitä estämään.</p>	
<p>Avainsanat</p>	<p>UAV, pistepilvi, korkeusmalli</p>

Author Title	Ilkka Partonen Accuracy of the height of the point cloud collected with a small UAV – case Nokian Tyres
Number of Pages Date	49 pages + 12 appendices 26 May 2014
Degree	Master of Engineering
Degree Programme	Civil Engineering
Specialisation option	Land Surveying
Instructor	Jussi Laari, Lecturer
<p>The aim of this Master's thesis was to study the possibilities of the use of small UAV's in land surveying. The data collected with a UAV was presented as a point cloud that was photogrammetrically processed to investigate the accuracy of the height of the points. Another aim was to find out if the traditional photogrammetric applications were able to process UAV data.</p> <p>A digital terrain model (DTM) was created from the point cloud. Also, data was collected with a tachometer from two separate areas of the test track and compared with the DTM. The point cloud data was also compared to laser scanning data that was produced by the Finnish National Land Survey (NLS). The DTM processed from the UAV data was used to ortorectify the aerial images taken.</p> <p>The height of the UAV flight was about 109 meters. With the equipment used that translates to ground sample distance of about four centimeters. The accuracy of the point cloud compared to the DTM on the test track was approximately one pixel. The accuracy in other areas that were compared to the laser scanning data from the NLS was approximately 10 centimeters (2-3 pixels).</p> <p>UAV data have already achieved a precision useable for many applications within land surveying. Therefore, the use of UAVs is likely to increase, provided the aviation regulations will not prevent it.</p>	
Keywords	UAV, UAS, Digital Terrain Model

## Sisällys

### Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	UAV-lennokit	3
2.1	Luokittelu	3
2.2	Lainsäädäntö	5
2.3	UAS-järjestelmä	9
2.3.1	SwingletCAM-lennokki	9
2.3.2	E-motion-sovellus	11
3	Lennättäminen	12
3.1	Lentosuunnitelma	12
3.2	Sääolosuhteet	14
3.3	Lennokin tarkistaminen	14
3.4	Nousu-/laskeutumispaikka	14
3.5	Kamera	15
3.6	Lentoon lähettäminen	16
3.7	Laskeutuminen	18
3.8	Lennon jälkeen tehtävät tarkastukset	18
3.9	Erikoistilanteet	18
4	Datan jälkikäsittely	21
4.1	Alkuvalmistelut	21
4.2	Pisterunko	22
4.3	Jatkoprosessointi	23

4.4	Agisoftin Photoscan Professional	23
4.4.1	Prosessoinnin aloitus	24
4.4.2	Runkopisteet	24
4.4.3	Kuvausblokin optimointi	25
4.4.4	Pistepilvi	25
4.4.5	Teksturoidi	26
4.5	Lopputuotteet	27
5	Case Nokian Renkaat	28
5.1.1	Radan korkeus- ja runkopisteiden kartoitus	31
5.1.2	Lennoikkokuvaus	39
5.1.3	Kuvaprosessointi	39
5.1.4	Pistepilvi – suora radanosuus	39
5.1.5	Ympyränmuotoinen radanosuus	42
5.1.6	Ortokuva	43
5.2	MML:n laserkeilausaineisto	44
6	Pohdintoja	46
	Lähteet	47
	Liitteet	
	Liite 1. Agisoft-raportti Nokian lennätyksestä	
	Liite 2. Sensefly-raportti Nokian lennätyksestä	

## Lyhenteet

CAA	<i>The Civil Aviation Authority.</i> Siviili-ilmailun viranomainen Englannissa.
DSM	<i>Digital Surface Model.</i> Pintamalli
DTM	<i>Digital Terrain Model.</i> Maastomalli
FAA	<i>Federal Aviation Administration.</i> Siviili-ilmailun viranomainen USA:ssa.
GSD	<i>Ground Sample Distance.</i> Sensorin pikselikoko maastossa.
INS	<i>Inertial Navigation System.</i> Navigointimenetelmä, joka perustuu kiihtyvyyksien mittaamiseen.
LIDAR	<i>Light Detection and Ranging.</i> Kaukokartoituslaite, joka mittaa laservalon pulssin kulku-aikaa.
UAS	<i>Unmanned Aerial System.</i> Miehittämätön ilma-alusjärjestelmä.
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle.</i> Miehittämätön ilma-alus.

## 1 Johdanto

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutustua vasta hankittuun UAV-järjestelmään SwingletCAM, tutkia sen käytön mahdollisuuksia maanmittaustekniikan sovelluksissa ja tutkia fotogrammetrisesti lasketun pistepilven tarkkuutta korkeuden osalta. Lisäksi selvitettiin, onnistuuko UAS-järjestelmällä kerätyn datan jatkokäsittely perinteisellä, oppilaitoksessa jo käytössä olevalla stereotyöasemasovelluksella. UAS-järjestelmiä ei ole alun perin suunniteltu mittatarkan tulosten keräämiseen, joten niiden epävakaata kuvausalusta ja tavallisen kuluttajakameran käyttö tuo haasteita kerätyn datan käsittelyssä.

UAV-järjestelmä hankittiin Metropolian silloisen maanmittaustekniikan koulutusohjelman laboratorioon syksyllä 2012. Metropolia ammattikorkeakoulu on pääkaupunkiseudulla toimiva monialainen ammattikorkeakoulu, jossa koulutusta annetaan tekniikan, liikenteen ja kulttuurin alalla. Metropolia on kaikkiaan noin 15 000 opiskelijaa. Maanmittaustekniikan koulutuksessa on tällä hetkellä noin 140 + 40 päätoimista tai monimuototyypistä insinööriopiskelijaa.

UAS-teknologia on voimakkaasti kehittyvä ja soveltava sovellusalue myös maanmittaustekniikan näkökulmasta katsoen. UAS-lyhenne tulee sanoista Unmanned Aerial System, eli miehittämätön ilma-alusjärjestelmä. Lähinnä ulkomaisessa kontekstissa puhutaan myös RPAS:sta (Remotely Piloted Aerial System). Itse lennokista käytetään myös nimitystä UAV (Unmanned Aerial Vehicle).

UAV-järjestelmät ovat alun perin kehitetty sotateollisuuden tarpeisiin, kuten esimerkiksi maali-, tiedustelu- ja jopa pommitustehtäviin. UAV-teknologian tärkein kehittäjä on ollut USA:n puolustusvoimat. UAS-järjestelmillä on jo nyt kuitenkin tukeva jalansija myös siviilisovelluksien parissa. Niiden laajamittaisemman käytön hidasteena siviilipuolella on ollut standardien, säännösten ja lakien puute. *Teal Group market tutkimuksen "World Unmanned Aerial Vehicle Systems—2011"* mukaan UAV-järjestelmiin vuosittain käytettävän rahamäärän ennustetaan seuraavan kymmenen vuoden aikana kasvamaan menneen vuosikymmenen 5,9 miljardista dollarista 11,3 miljardiin dollariin. (1)

UAV-lennokkien siipien kärkiväli vaihtelee Boeing 737:n kokoisen matkustajakoneen kärkivälistä alle yhteen metriin. Niiden käyttötarkoitus vaihtelee myös sotilasoperaatioista julkisen hallinnon pelastus- ja etsintätehtävistä kaupallisiin sovellutuksiin. FAA:n mukaan UAS-järjestelmien käyttö siviili- ja kaupallisella puolella tulee ehkä nopeimmin lisääntymään erityisesti pienten (sUAS) alusten käyttö, johtuen niiden monikäyttöisyyden ja verrattain alhaisten investointi- ja käyttökustannusten johdosta. (2) Tässä työssä käsitellään vain pienen UAS-järjestelmän (sUAS) ominaisuuksia paikkatiedon keruun näkökulmasta katsottuna.



## 2 UAV-lennokit

### 2.1 Luokittelu

Maailmanlaajuinen luokittelu UAV-lennokeille on vasta kehitteillä. Yhtenä siviilipuolen luokitteluperusteena on käytetty *siiven tyyppiä*. UAV-lennokki voi olla kiinteäsiipinen, ns. perinteinen lennokki, tai useammasta roottorista koostuva multikopteri (kuva 1). Jälkimmäisessä tapauksessa tyyppi nimetään pyörivien roottoreiden lukumäärän mukaan. Neliroottorista lentolaitetta kutsutaan *quadrokopteriksi* ja vastaavalla tavalla esimerkiksi kuusiroottorista laitetta kutsutaan *hexakopteriksi*. Roottorit sijoitetaan joko säteittäisesti keskipisteestä poispäin osoittavien varsien päähän tai kuten alla kuvatussa ”lentävässä laudassa”. Tässä on etuna mm. se, että roottorit ovat suojassa törmäykseltä sivulta päin tuleviin iskuihin. Myös ympäristö on suojassa nopeasti pyöriviltä potkurinsiiviltä.



Kuva 1. UAV-lennokki Aibotix X6 mapping (3)

Taulukossa esitetty UAV-laitteen luokittelu perustuu NATO:n luokitteluun painon mukaan ja siitä edelleen seitsemään alaluokkaan. Luokka I on jaettu "micro, mini- ja small"- luokkiin painon perusteella. Luokissa II ja III alaluokittelu perustuu taktisiin käyttötarkoituksiin. Muita tietoja ovat mm. tyypillinen lentotehtävän maksimikorkeus, toimintasäteen laajuus, ensisijainen tuettava yksikkö ja esimerkki UAV-laitetyypistä.

Taulukko 1. UAV-luokittelu (NATO:n mukaan) (4)

Class	Category	Normal employment	Normal Operating Altitude	Normal Mission Radius	Primary Supported Commander	Example platform
CLASS I (less than 150 kg)	MICRO < 2 kg	Tactical Pl, Sect, Individual (single operator)	Up to 200 ft AGL	5 km (LOS)	Pl, Sect	Black Widow
	MINI 2-20 kg	Tactical Sub-unit (manual launch)	Up to 3K ft AGL	25 km (LOS)	Coy/Sqn	Scan Eagle, Skylark, Raven, DH3, Aladin, Strix
	SMALL >20 kg	Tactical Unit (employs launch system)	Up to 5K ft AGL	50 km (LOS)	BN/Regt, BG	Luna, Hermes 90
CLASS II (150 kg to 600 kg)	TACTICAL	Tactical Formation	Up to 10,000 ft AGL	200 km (LOS)	Bde Comd	Sperwer, Iview 250, Hermes 450, Aerostar, Ranger
CLASS III (more than 600 kg)	MALE	Operational / Theatre	Up to 45,000 ft MSL	Unlimited (BLOS)	JTF COM	Predator B, Predator A, Heron, Heron TP, Hermes 900
	HALE	Strategic / National	Up to 65,000 ft	Unlimited (BLOS)	Theatre COM	Global Hawk
	Strike / Combat	Strategic / National	Up to 65,000 ft	Unlimited (BLOS)	Theatre COM	

CAA toimii siviili-ilmailun viranomaisena Englannissa. Taulukossa 2 on esitetty väliaikainen ohjeellinen luokittelu UAV-lennokeista Euroopassa. Siitä voidaan todeta muun muassa se, että alle 150 kg painavat UAV-lennokit kuuluvat kansallisen ilmailulainsäädännön piiriin.

Taulukko 2. UAV-luokittelu CAA:n mukaan (5, s. 26)

<b>Weight Classification Group</b>	<b>Civil Category</b>	<b>Mass (kg)</b>	<b>Broad Military Equivalent</b>	<b>Civil Regulation</b>
1	Small Unmanned Aircraft	20 or less	Micro (< 5 kg)	National
			Mini (< 30 kg)	
2	Light UAS	More than 20 to 150		National
			Tactical	
3	UAS	More than 150		EASA (State Aircraft are National)
			MALE	
			HALE	

## 2.2 Lainsäädäntö

Liikenteen turvallisuusvirasto Trafi on Suomen ilmailuviranomainen, joka huolehtii ilmailun yleisestä turvallisuudesta. Se toimii lisäksi Euroopan laajuisessa yhteistyössä mm. Euroopan lentoturvallisuusviranomaisen (EASA) kanssa. Vaikka EU-lainsäädännön osuus ilmailussa laajentuu jatkuvasti, Trafi antaa edelleen tarkempia, lakia täydentäviä kansallisia ilmailumääräyksiä. Useimpien ilmailumääräysten taustalla ovatkin kansainväliset standardit ja suositukset. (6)

Hallituksen esitys laiksi ilmailulain muuttamisesta 5/2013 pääasiallisessa sisällössä todetaan mm. seuraavaa:

Nykyisin vain kokeilu- ja tutkimustarkoituksiin käytettäville miehittämättömille ilma-aluksille lentosäännöistä säädetty poikkeus laajennettaisiin kattamaan kaikki miehittämättömät ilma-alukset ja näiden alusten rekisteröintiä koskevia säännök-

siä muutettaisiin. Rajaus kokeilu- ja tutkimustarkoituksesta poistettaisiin, kunhan miehittämättömän ilma-aluksen käyttö rajattaisiin muulta ilmailulta kielletylle tai tarkoitusta varten perustetulle tilapäisesti erotetulle alueelle. Ilmailulain 6 §, 3. momentti.

Miehittämättömien ilma-alusten osalta ehdotukseen sisältyy lisäksi muutos ilmailulain 77 §:n 6 momenttiin niin, että toimintamassaltaan alle 150 kilogramman miehittämättömiä ilma-aluksia voitaisiin käyttää lentotyössä, vaikka niitä ei ole rekisteröity Suomen ilma-alusrekisteriin. (7, s. 3)

Eduskunta on hyväksynyt seuraavan lain (alle kirjattu UAV:ta koskevat lainkohdat)

Laki ilmailulain muuttamisesta

Vahvistettu	Voimaantulo	Säädöskokoelma
19.04.2013	01.05.2013	<a href="#">280/2013</a>

Päätös: Hyväksytty

”6 §

*Eräitä muita ilma-aluksia ja laitteita koskevat poikkeukset*

-----

Miehittämätön ilma-alus saa poiketa lentosäännöistä muulta ilmailulta kielletyllä tai tarkoitusta varten tilapäisesti erotetulla alueella, jos poikkeava menettely on suunniteltu ja toteutetaan siten, ettei lentoturvallisuutta vaaranneta. Ilma-aluksen käyttäjän on saatava poikkeavaan menettelyyn lupa Liikenteen turvallisuusvirastolta”.

”77 §

*Lentotyölupa*

-----

Lukuun ottamatta miehittämätöntä ilma-alusta, jonka toimintamassa on alle 150 kilogrammaa, lentotyössä käytettävä ilma-alus on rekisteröitävä Suomen ilma-alusrekisteriin. Liikenteen turvallisuusvirasto voi sallia, että lentotyöhön käytetään toisessa jäsenvaltiossa rekisteröityä ilma-alusta, jos sen lentoturvallisuusvalvonta voidaan asianmukaisesti hoitaa. Jos lentotyöhön ei ole käytettävissä sopivaa jäsenvaltiossa rekisteröityä ilma-alusta ja jos lentoturvallisuus ei vaarannu, Liikenteen turvallisuusvirasto voi hyväksyä käytettäväksi kolmannen maan ilma-alusrekisteriin merkityn ilma-aluksen. Liikenteen turvallisuusvirasto voi antaa tarkempia määräyksiä siitä, millä edellytyksillä tällainen ilma-alus voidaan hyväksyä lentotyötehtäviin”. (9)

Lisäksi perusteluissa todetaan, että

..on tarkoituksenmukaista jättää laajamittaisemmat miehittämättömiä ilma-aluksia koskevat lainmuutokset ilmailulain kokonaisuudistuksen yhteyteen, jolloin niiden voimaantulo voidaan synkronoida EU-lainsäädännön tulevien muutosten kanssa. Miehittämättömien ilma-alusten käyttö on kuitenkin jo sen verran yleistynyt, että on välttämätöntä tehdä ilmailulakiin joitakin tarkistuksia, jotta lainsäädäntö ei muodostu kohtuuttomaksi esteeksi toiminnan kehittämiseksi.

Hallituksen esityksen vaikutuksista arvioidaan myös, että ”miehittämättömien ilma-alusten sääntöjen selkiyttäminen esityksen mukaisella tavalla taas selkiyttää lainsäädännöllistä tilannetta ja helpottaa Liikenteen turvallisuusviraston neuvonta- ja asiakaspalvelutyötä.” (7) Ehkäpä lain kokonaisuudistuksen keskeneräisyyden vuoksi en ole onnistunut saamaan Trafilta minkäänlaista vastausta esittämiini tarkentaviin kysymyksiin 6 §:n tulkinnasta käytännössä.

Tällä hetkellä kuitenkin ilmeisesti vielä pätee seuraava ohjeistus:

Lennättää saa alle 150 m maan tai veden pinnasta ja laite aina näkyvässä. Jos läheisyydessä valvottua ilmatilaa (CTR= lähialue), on otettava yhteyttä lennonjohtoon. (8, s. 10. )

CAA:n rooli Englannissa on varmistaa, että UAS-järjestelmien käyttö kansallisessa ilmatilassa täyttää vähintäänkin samat turvallisuusvaatimukset, kuin myös miehitetyiltä lennoilta vaaditaan. Riippuen UAV-lennokin painosta ja siitä, mihin käyttötarkoitukseen sitä lennätetään, saattaa Englannissa joutua anomaan lennätyslupa CAA:lta. Taulukossa 3 on yhteenveto vaatimuksista.

Taulukko 3. UAV:n lennätys- ja lennättäjävaatimukset Englannissa CAA:n mukaan (10)

Aircraft Mass	Airworthiness Approval?	Registration?	Operating Permission?	Pilot Qualification
20 kg and less	No	No	Yes (Note 1)	Yes (Note 1) BNUC-S™ or equivalent (Note 2)
More than 20 kg, up to and including 150 kg	Yes (Note 3)	Yes (Note 3)	Yes	Yes, BNUC™ or equivalent (Note 2)
More than 150 kg	EASA Permit to Fly or UK Permit to Fly in accordance with 'B conditions' (Note 3)	Yes	Yes	Yes, BNUC™, CPL(A) or equivalent (Note 2)

1) Applicable from 1 January 2010 for aircraft used for Aerial Work purposes or if flown within a congested area and/or close to people or property.

2) Equivalent pilot experience will be considered on a case-by-case basis during application for an operating permission.

3) It may be possible to obtain certain exemptions from the airworthiness and registration requirements.

## 2.3 UAS-järjestelmä

UAS-järjestelmä koostuu kolmesta eri elementistä. Ne ovat varsinainen lennokki varusteineen (UA), tietokonesovellus lentosuunnitelmaa ja lennonaikaista monitorointia varten (GroundControlStation), ja radioyhteys lennokin ja lennokkia ohjaavan tietokoneen välillä (Datalink). Maaston muodot tai rakennettu ympäristö saattaa häiritä radioyhteyttä lennokin ja PC:n välillä. Sen vuoksi myös radiolinkin sijainti on otettava huomioon lähtö-/laskeutumispaikkaa suunniteltaessa. Lennokkia voidaan ohjata käsin kauko-ohjaimen avulla. Tällöin kyseessä ei enää kuitenkaan ole lentosuunnitelman mukainen kuvaustehtävä.

### 2.3.1 SwingletCAM-lennokki

Metropolia Ammattikorkeakoulussa on opetus- ja tutkimuskäytössä sveitsiläinen SenseFly Ltd:n lennokki SwingletCAM (kuva 2). Lennokin runko on styroksia, joten se on hyvin kevyt ja siten myös helppo kuljettaa. Siipien kärkiväli on 80 cm. Paino sisältäen akun ja kameran on 0,5 kg. Käytössämme oleva kamera on Canonin INUX HS220, jossa on 12 megapikselin kenno. Akku on litiumpolymeeriakku, jolla saavutetaan maksimissaan 30 minuutin lentoaika. (11)

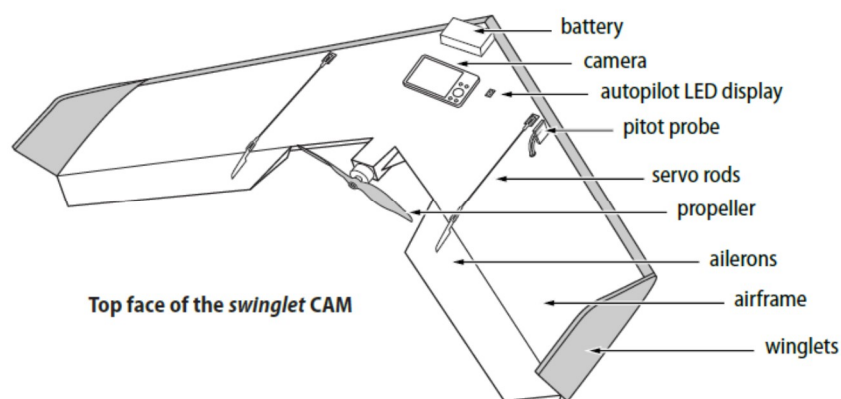


Kuva 2. Swinglet CAM

Nimellinen lentonopeus SwingletCAMilla on 10 m/s (36 km/h), ja lentoja voi teknisten tietojen mukaan suorittaa tuulessa, joka on enintään 7 m/s. Tasaisen tuulen voimakkuutta suurempi ongelma lennokille on käytännössä kuitenkin tuulen puuskaisuus. Voimakkaat puuskat ylittävät lennokin turvalliselle toiminnalle ohjelmoidut reunaehdot, jolloin lennätystä ei voi enää jatkaa, vaan lennokka palaa automaattisesti lähtöpisteeseen yläpuolelle. Ellei lennättäjä anna muuta ohjauskomentoa, lennokka laskeutuu kahden minuutin odotusjakson jälkeen automaattisesti.

Katettava kuvausalue maksimilentoajalla on  $1,5 \text{ km}^2 - 6 \text{ km}^2$ . Alueen pinta-ala riippuu lähinnä lentokorkeudesta ja katettavan alueen muodosta. Suomen tämänhetkisen lentomääräysten, tai oikeammin ohjeistuksen mukaan, ja käytössämme olevalla kameralla toimiessa todellinen yhdellä lennolla katettava alue on noin  $1,5 \text{ km}^2$ . Käytetty lentokorkeus on tällöin enintään 150 m ja lennokka koko ajan lennättäjän näkyvässä. Lennoilla otettujen kuvien maastoresoluutio on 3–6 cm, kun toimitaan Canonin IXUS HS220 -kameralla ja edellä mainitun maksimikorkeuden puitteissa. Maastoresoluutiolla tarkoitetaan kuvatiedostossa olevan yhden pikselin sivun pituutta vastaava matka maastossa

Kuvassa 3 on esitetty lennokkissa tarvittavat anturit ja laitteet. Niitä ovat akku, kamera, autopilot-, inertia- ja GPS-paikannus-järjestelmät, pitot-putki, potkuri, servotangot, siivekkeet, wingletit ja radiolinkin antenni.



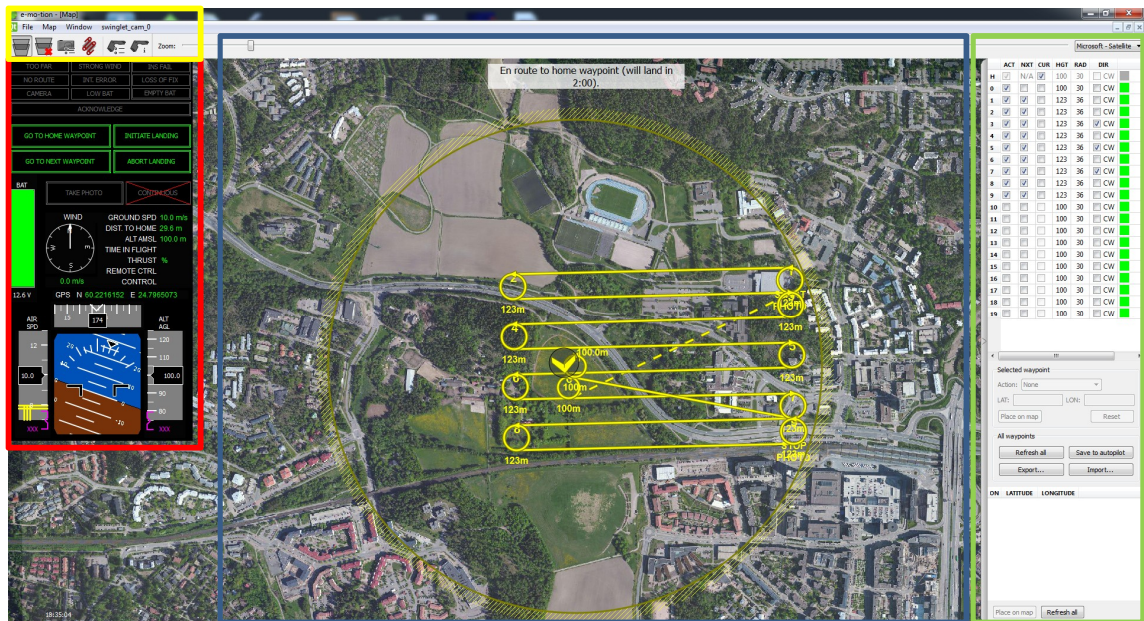
Kuva 3. Swinglet CAMin laitteisto (11, s.11)



### 2.3.2 E-mo-tion-sovellus

Senseflyn sovellus UAV-laitteen lentosuunnitelman tekoa, lennonaikaista monitorointia ja ohjaamista varten on nimeltään E-mo-tion. Kyseisellä sovelluksella voidaan haluttaessa myös simuloida suunniteltu lento. Lennon monitoroinnin aikana lentosuunnitelmaa voidaan muuttaa ”lennosta”, eli esimerkiksi käännepisteen paikka voidaan siirtää hiiren raahauksella tai lennokki voidaan määrätä laskeutumaan välittömästi.

Kuvassa 4 on esitetty E-mo-tion-sovelluksen käyttöliittymä. Kuvassa keltaisella reunaviivalla rajatulla alueella on päävalikon työkalut, joita käytetään mm. lentosuunnitelman tekoon. Varoitusviestit ja lennokin ajantasaiset asento- ja nopeustiedot esitetään punaisen suorakaiteen rajaamalla alueella. Näkymän oikeassa reunassa esitetään käännepisteiden säde, käännepisteen kiertosuunta (myötä- vai vastapäivään) ja lentokorkeus. Karttaikkunassa esitetään lentosuunnitelma graafisena viivapiirroksena, työalueen rajaus ja lennokin paikka kyseisenä ajanhetkenä.



Kuva 4. E-mo-tion: sovellusnäky

### 3 Lennättäminen

UAV-lentotehtävä voidaan operatiivisesti ajatellen jakaa seuraaviin työvaiheisiin:

1. Lentosuunnitelman teko PC-sovelluksella
2. Rungon mittaus ja signalointi (tarvittaessa)
3. Lennon toteutus
4. Lennätyksen jälkeen tehtävät tarkastukset
5. Kuvien prosessointi tuotteiksi

#### 3.1 Lentosuunnitelma

Lennon suunnittelu tehdään tietokoneavusteisesti e-motion-sovelluksella. Karttaikkunassa osoitetaan alue, joka halutaan valokuvilla kattaa. Tyypillisesti alue on suorakaitteen muotoinen, mutta se voi myös olla linjamainen kohde, esimerkiksi jokin tie- tai ratalinja. Alueen osoittamisen jälkeen määritellään kuvauksen pituus- ja sivupeitot ja haluttu maastoresoluutio. Sovellus laskee lentolinjat ja kuvanottoaikat annettujen parametrien mukaan. Valokuvat otetaan lennon aikana automaattisesti suunnitelman mukaisesti.

Pituuspeitolla tarkoitetaan lentolinjalla otettujen peräkkäisten kuvien päällekkäinen peitto maastossa. Sivupeitolla tarkoitetaan vierekkäisten lentolinjojen kuvien päällekkäisyyttä sivusuunnassa. Perinteisellä ilmakuvauksikalustolla toimittaessa pituuspeittona tyypillisesti käytetään 60:tä prosenttia ja sivupeittona 30:tä prosenttia (12). UAV-järjestelmällä toimiessa peittojen pitää olla huomattavasti suuremmat, pituuspeitto noin 70–90 prosenttia ja sivupeittokin vähintään 50 prosenttia.

Edellä mainituilla suuremmilla pituus- ja sivupeittovaatimuksilla varmistetaan siitä, että haluttu kuvausalue saadaan riittävän kattavasti kuvatuksi, ja tarvittaessa on voitava olla mahdollista jopa poistaa yksittäisiä, esimerkiksi tärähdyksestä johtuvia huonolaatuisia

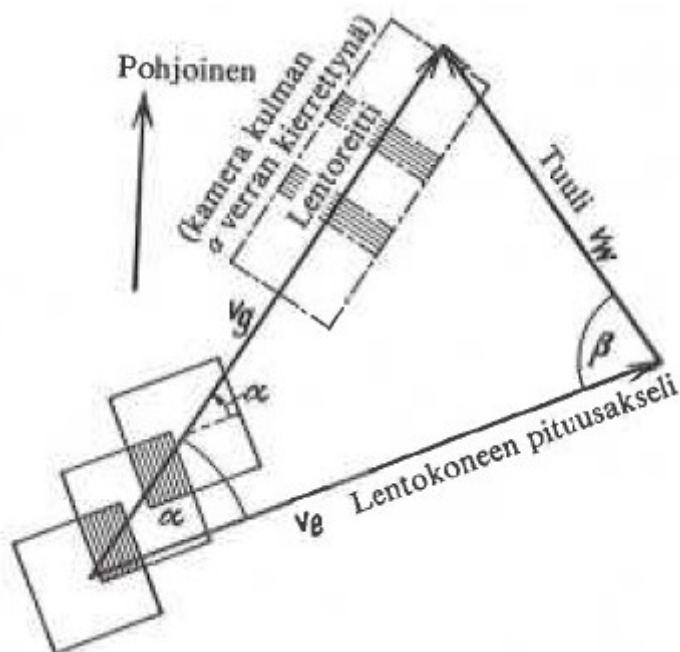
kuvia laskennasta. Myös laskentatekniikka vaatii, että kuvilla on paljon peittoa. Näin menetellen saadaan lisää ylimääräisiä kuvahavaintoja, ja siten luotettavampia tuloksia. SwingletCAM-lennokki on kuvausaluslana epävakaa, joten puuskien ja sivutuulen aiheuttamat vaikutukset kuvaushetkellä tulee kompensoida suuremmalla kuvamäärällä. Tässä taas ongelmana on se, että kun kuvaustilanteessa lennokin moottori on sammutettuna, lennokka on entistä alttiimpi sivutuulen vaikutukselle.

Perinteisissä ilmakuvauksissa sivutuulen vaikutus otetaan lentolinjoissa huomioon sortokulmana ja kameraa kierretään ilma-aluksessa, jotta kamera saadaan oikeaan asentoon suhteessa kuvausjonon suuntaan nähden. Lennokkikuvauksissa edellä mainittua kameran kiertämistä ja sortokorjauskulmaa ei voida käyttää.

Sortokulma (kuva 5) määritetään lentosuunnan ja -nopeuden sekä tuulen suunnan ja voimakkuuden mukaan seuraavalla kaavalla:

$$\sin a = \frac{v_w}{v_e} \sin(a + b), \quad (1)$$

jossa  $V_w$  on tuulen nopeus ja  $V_e$  on lentokoneen nopeus



Kuva 5. Sortokulman vaikutus kuvapeittoihin (13, s. 129)

### 3.2 Sääolosuhteet

Sääolosuhteet on otettava huomioon, jotta suunniteltu lentotehtävä saadaan suoritettua turvallisesti ja laadukkaasti. Tuulen sallittu maksimi nopeus swingletCAM:in teknisissä tiedoissa on 7 m/s. Tyypillinen lennätyskorkeus on noin 100–150 metrin korkeudessa, jossa tuulen voimakkuus voi olla huomattavasti kovempi kuin maan pinnan tasolla. Kovat puuskat saattavat estää lennätysten, vaikka tuulen keskinopeus olisi huomattavasti alhaisempikin. Alhainen lämpötila saattaa lyhentää akkujen toiminta-aikaa lennokissa ja kamerassa. Swinglet CAM:iä ei saa myöskään lennättää sateessa. (11, s. 11)

### 3.3 Lennokin tarkistaminen

Lennättäminen alkaa kaluston toimintakunnon tarkastuksilla. Laitteen rungon on oltava ehjä, eli esimerkiksi lennokin rungossa tai siivissä ei saa olla halkeamia. Potkurin on oltava oikeassa asennossa ja sitä kiinnittävät kaksi kuminauhaa ehjät ja paikoillaan. Servo-ohjatut ohjaustangot on oltava hyvin kiinni molempien päiden kiinnityskohtissa. Lentonopeutta mittaava pitot-anturi on oltava hyvin kiinni rungossa ja sen kaksi muoviputkea paikoillaan. Akkujen on oltava ladatut sekä kamerassa että potkuria pyörittävässä sähkömoottorissa. (11, s. 13)

### 3.4 Nousu-/laskeutumispaikka

Laskeutumispaikan valintaan on kiinnitettävä huomiota. Laskeutuminen tehdään normaalitilanteessa samaan paikkaan, kuin josta lentoon lähtö on suoritettu. Alueen ympäristö on oltava vapaa esteistä noin 40 m:n säteellä lähtöpaikasta (11). Esteillä tässä tarkoitetaan esimerkiksi rakennuksia, sähköjohtoja tai pylväitä. Laskeutumispaikan alustaan laatuun on myös hyvä kiinnittää huomiota. Lennokki nimittäin laskeutuessaan liukuu lyhyen matkan maan pintaa pitkin. Periaatteessa lennokille sanotaan soveltuvan lähes kaikki erityyppiset laskeutumisalustat, mutta esimerkiksi karkea sorapinta saattaa aiheuttaa runkoon halkeamia tai repeytymiä. Käytännössä on huomattu esimerkiksi tasaisen asfaltin sopivan hyväksi laskeutumispaikaksi. Vaikka em. alusta on kova, niin runko liukuu hyvin tasaisella pinnalla. Myös nurmikko pehmeänä alustana ja viljelty pelto sopivat hyvin laskeutumispaikaksi.

Lentoon lähtö painavammilla lennokeilla suoritetaan usein katapultin avulla. Suomen oloissa menetelmän huonona puolena voidaan pitää sitä, että kyseinen laite tarvitsee pitkän ja avonaisen kiitoradan paikan nousua ja laskeutumista varten. Lisäksi kun nousut ja laskeutumisesta on aina suoritettava vastatuuleen, edellä mainittu vaatimus saattaa hankaloittaa kuvauslennolle sopivan ajankohdan löytämistä huomattavasti. Swinglet-CAM heitetään kädestä ilmaan, ja laskeutuminen tapahtuu noin 20 metrin säteistä ympyrää hitaasti alaspäin liitäen (moottori sammutettuna), joten pitkälle kiitoradalle ei ole tarvetta.

### 3.5 Kamera

Merkittävä ero perinteisesti käytettyihin mittakameroihin on se, että tässä järjestelmässä käytettävä kamera on edullinen digipokkari, jota ei saa esimerkiksi kiinteäpolttovalisella objektiivilla varustettuna. Edellä mainittu mitätöi tarkan kamerakalibroinnin tulokset ja sen tarjoamat korjaukset jälkikäsitelystä. Käyttämämme PhotoScan Pro -sovellus määrittelee kuitenkin ”lennossa” jokaiselle tehdylle kuvablokille uuden kamerakalibroinnin. Kameran kalibroititietoja pidetään oletuksena kyseisten tietojen ”alkuarvauksena”, joita parannetaan kuvien liitosten laskennan yhteydessä. Tarkkaa mittakameraa käytettäessä pitää kyseinen kameraparametrien optimointi ottaa pois laskennasta. (13)

Kamera-asetuksissa määritellään mm. kuvausohjelman käyttö, automaattitarkennusasetukset, salaman ja vakaustoiminnon poisottaminen käytöstä. Koulumme SwingletCAM-järjestelmässä käytettävissä oleva kamera on mallia Canon IXUS 220 HS. Kuvakennon tyyppi on 1/2,3 tuuman taustavalaistu CMOS-kenno, jossa on noin 12,1 miljoonaa kappaletta tehollisia pikseleitä. (14)

Kameran liitäntä järjestelmään voidaan vielä tarkistaa ennen lennätyksen aloittamista. Tämä tapahtuu siten, että lennokkia ”ravistetaan” kolmesti ylös- ja alaspäin (laitetta pidetään käsissä ja vaakatasossa). Tällöin kameraan saadaan virta päälle. Kameran virta sammutetaan toistamalla äsken mainittu uudelleen. Lennätyksen aikana kameraan ei mene virta päälle, jos lennokin korkeus on alle 35 metriä. Täten estetään kameran vahingoittuminen laskeutumisvaiheessa, sillä kameran objektiivi on suojassa lennokin rungon sisällä virran ollessa pois päältä. (11, s. 17)

On huomattava, että kuvauksen pituuspeittoa voidaan editoida vain, kun kamera on liitetty lennokkiin, lennokissa on virta päällä ja radioyhteys PC:n ja lennokin välille on muodostettu. Vaikka lennokki on testattu lämpötilan ollessa  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ :n ja  $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$ :n välillä, kameran käyttöympäristö on vain  $0\text{--}40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Käytännössä olemme kohdanneet ongelmia lähellä nolla asteen lämpötilan, kun kamera ei ole ottanutkaan valokuvia suunnitelman mukaan. Pakkasen purevuusindeksiksi saadaan ilmatieteenlaitoksen interaktiivisen taulukon mukaan arvoksi  $-5,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , kun lennetään  $+1$ -asteisessa lämpötilassa nopeudella  $10\text{ m/s}$ .

Alla olevasta kuvaruutukaappauksesta (kuva 6) voidaan todeta, että kuvauslennon aikana objektiivin polttoväli ja aukon koko pidetään vakiona, mutta valotusaika muuttuu.

Label	Size	Align	Quality	Date & Time	Make	Model	Focal length	Aperture	ISO	Shutter
BMG_0281.JPG	4000x3000		✓	0.801904	2012.08...	Canon	Canon EOS 5D...	f/2.7	100	1/640
BMG_0282.JPG	4000x3000		✓	0.809159	2012.08...	Canon	Canon EOS 5D...	f/2.7	100	1/500
BMG_0283.JPG	4000x3000		✓	0.808054	2012.08...	Canon	Canon EOS 5D...	f/2.7	100	1/500
BMG_0284.JPG	4000x3000		✓	0.788459	2012.08...	Canon	Canon EOS 5D...	f/2.7	100	1/500
BMG_0285.JPG	4000x3000		✓	0.819728	2012.08...	Canon	Canon EOS 5D...	f/2.7	100	1/640
BMG_0286.JPG	4000x3000		✓	0.819561	2012.08...	Canon	Canon EOS 5D...	f/2.7	100	1/800
BMG_0287.JPG	4000x3000		✓	0.781378	2012.08...	Canon	Canon EOS 5D...	f/2.7	100	1/640
BMG_0288.JPG	4000x3000		✓	0.762093	2012.08...	Canon	Canon EOS 5D...	f/2.7	100	1/640
BMG_0289.JPG	4000x3000		✓	0.699562	2012.08...	Canon	Canon EOS 5D...	f/2.7	100	1/800
BMG_0290.JPG	4000x3000		✓	0.76023	2012.08...	Canon	Canon EOS 5D...	f/2.7	100	1/640
BMG_0291.JPG	4000x3000		✓	0.76395	2012.08...	Canon	Canon EOS 5D...	f/2.7	100	1/800
BMG_0292.JPG	4000x3000		✓	0.794881	2012.08...	Canon	Canon EOS 5D...	f/2.7	100	1/640
BMG_0293.JPG	4000x3000		✓	0.741497	2012.08...	Canon	Canon EOS 5D...	f/2.7	100	1/640
BMG_0294.JPG	4000x3000		✓	0.777942	2012.08...	Canon	Canon EOS 5D...	f/2.7	100	1/800
BMG_0295.JPG	4000x3000		✓	0.759312	2012.08...	Canon	Canon EOS 5D...	f/2.7	100	1/400
BMG_0296.JPG	4000x3000		✓	0.768996	2012.08...	Canon	Canon EOS 5D...	f/2.7	100	1/320
BMG_0297.JPG	4000x3000		✓	0.742742	2012.08...	Canon	Canon EOS 5D...	f/2.7	100	1/400
BMG_0298.JPG	4000x3000		✓	0.769884	2012.08...	Canon	Canon EOS 5D...	f/2.7	100	1/400
BMG_0299.JPG	4000x3000		✓	0.731722	2012.08...	Canon	Canon EOS 5D...	f/2.7	100	1/500
BMG_0300.JPG	4000x3000		✓	0.762097	2012.08...	Canon	Canon EOS 5D...	f/2.7	100	1/400
BMG_0301.JPG	4000x3000		✓	0.787423	2012.08...	Canon	Canon EOS 5D...	f/2.7	100	1/400
BMG_0302.JPG	4000x3000		✓	0.78872	2012.08...	Canon	Canon EOS 5D...	f/2.7	100	1/500
BMG_0303.JPG	4000x3000		✓	0.769085	2012.08...	Canon	Canon EOS 5D...	f/2.7	100	1/640
BMG_0304.JPG	4000x3000		✓	0.81124	2012.08...	Canon	Canon EOS 5D...	f/2.7	100	1/800
BMG_0305.JPG	4000x3000		✓	0.743948	2012.08...	Canon	Canon EOS 5D...	f/2.7	100	1/800
BMG_0306.JPG	4000x3000		✓	0.766811	2012.08...	Canon	Canon EOS 5D...	f/2.7	100	1/640
BMG_0307.JPG	4000x3000		✓	0.791319	2012.08...	Canon	Canon EOS 5D...	f/2.7	100	1/640
BMG_0308.JPG	4000x3000		✓	0.802418	2012.08...	Canon	Canon EOS 5D...	f/2.7	100	1/640
BMG_0309.JPG	4000x3000		✓	0.769468	2012.08...	Canon	Canon EOS 5D...	f/2.7	100	1/640
BMG_0310.JPG	4000x3000		✓	0.771912	2012.08...	Canon	Canon EOS 5D...	f/2.7	100	1/640
BMG_0311.JPG	4000x3000		✓	0.794823	2012.08...	Canon	Canon EOS 5D...	f/2.7	100	1/640

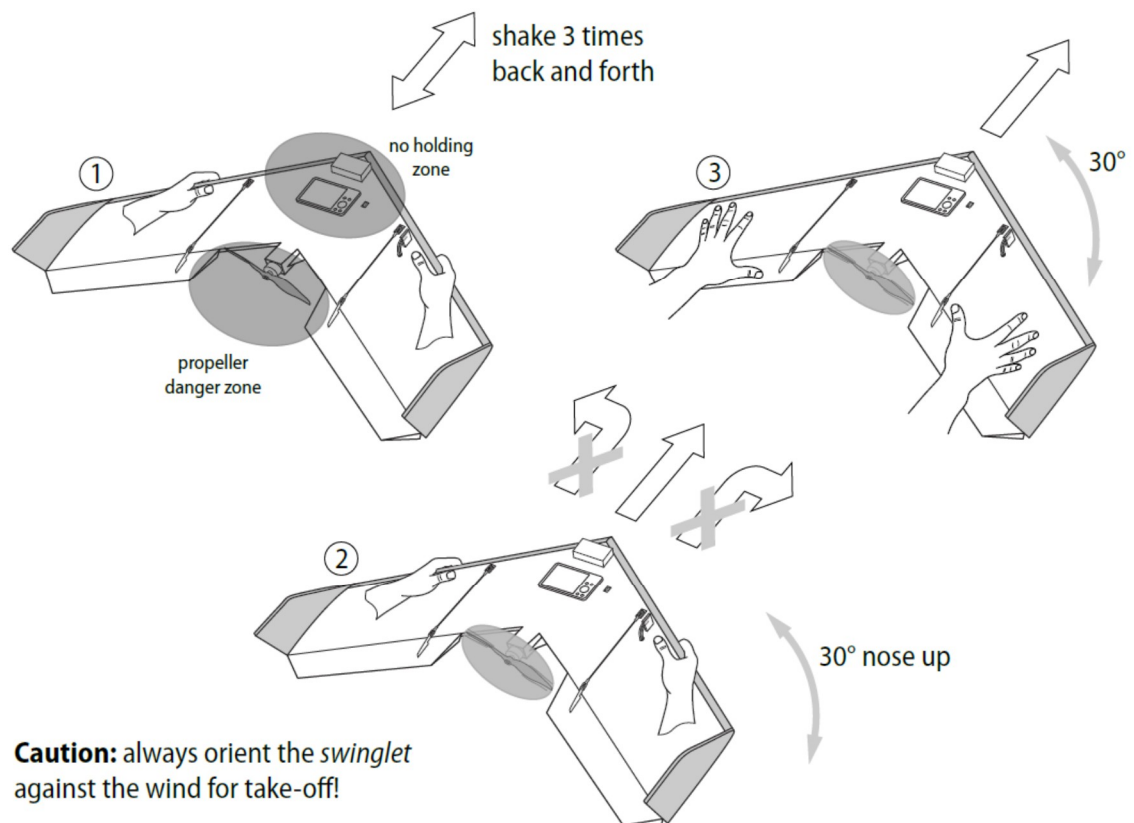
Markes	Eastng	Northng	Altitude	Error (m)	Projections	Error (ppm)
11	314761.071000	682428.420000	141.500000	0.000169	10	1.36
12	314889.346000	6824184.367000	136.640000	0.000662	10	0.191
13	315152.379000	6824369.424000	141.775000	0.000549	7	0.160
14	314804.652000	6823975.020000	137.860000	0.000609	8	0.238
15	315113.775000	6824052.174000	140.067000	0.000095	9	0.056
Total Error				0.000490		0.196

Kuva 6. Kameratietoja, kontrollipisteet ja malli-näkymässä esitystapa "tiheä pistepilvi"

### 3.6 Lentoon lähettäminen

Lennokin sähkömoottoriin kytketään virta päälle vasta sitten, kun edellä mainitut tarkastukset on tehty. Sähkömoottorin virran päälle laittamista varten lennokki asetetaan lähtöpaikalle maahan siten, ettei sen kallistus ylitä  $10$  astetta. Seuraavaksi yhdistetään akun kaapelit siten, että samanväriset kaapelit yhdistetään tiukasti. Kun virta on päällä, swingletCAM tarkistaa järjestelmänsä ja alustaa GPS-vastaanottimen. Se saattaa kestää muutamista sekunneista useaan minuuttiin, riippuen mm. satelliittinäkyvyydestä

lähetyksipaikalla. Lennokin siivekkeet liikahtavat hieman, ja näytössä vilkkuu "GO", kun edellä mainittu toiminto on suoritettu ja lennokka on valmis lähetettäväksi lentoon. Järjestelmä määrittää korkeusmittarin nollakohtaksi sen korkeustason, jossa GPS-vastaanotin saa ensimmäisen kerran fix-ratkaisun. Radiolinkin välityksellä muodostetaan yhteys lennokin ja PC:n välille. Potkuri voidaan käynnistää vasta kun yhteys on muodostettu ja lennokin status näytöllä on 'idle (ready to take-off)'. Potkuri laitetaan pyörimään liikuttamalla lennokkia kolme kertaa taakse ja eteen.



Kuva 7. Lennokin lähettäminen käsistä ilmaan (11, s.17)

Lennokka lähetetään ilmaan heittämällä se yllä olevan kuvan mukaisesti, eli nokka noin 30 astetta vaakatasosta ylöspäin ja siivet mahdollisimman vaakatasoon. On huomioitava, että lähettäminen on suoritettava aina vastatuuleen.

Lennokka lähtee nousuun täydellä teholla, kunnes se saavuttaa ennalta määritetyn 30 metrin korkeuden. Vasta alkukiihdytyksen jälkeen se lähtee suorittamaan lentosuunnitelman mukaista lentoa. SwingletCAM kalibroi nopeusanturin joka lennon alussa. Kalib-

roinnin tarkoituksena on kompensoida ilman lämpötilasta johtuvat anturoiden mittaamat virheelliset nopeustiedot. Swingletin jokainen lento tulee aloittaa siten, että sitä lennätetään kaksi kokonaista kierrosta ns. 0-pisteen ympäri, ennen kuin se lähetetään varsinaiselle lentotehtävälle. Tällä varmistetaan edellä mainitun kalibroinnin tulos mahdollisimman optimaaliseksi. (11, s. 18.)

### 3.7 Laskeutuminen

Normaalitilanteessa tapahtuva laskeutuminen tehdään samaan kohtaan, kuin josta lennokka lähetettiin lentoon. Lasku tapahtuu liitämällä moottori sammutettuna noin 20 metrin säteistä ympyrää. Ympyrän keskipisteenä on lennätyksen alussa määritetty ensimmäinen GPS-paikannuksella määritetty "kotipiste".

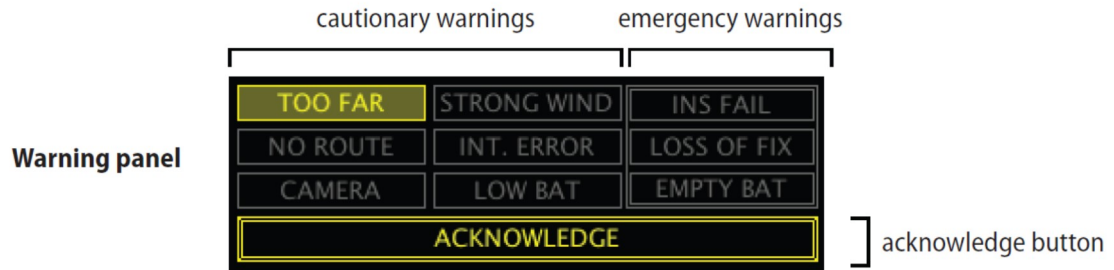
### 3.8 Lennon jälkeen tehtävät tarkastukset

Jokaisen lentotehtävän jälkeen on välittömästi hyvä suorittaa tietyt tarkastukset. Kyseisiin tarkastuksiin kuuluu mm. lennokin kuntoon liittyvät tarkastukset, ja myös otettujen valokuvien alustava tarkastus. Siten kuvien lukumäärän on oltava lentosuunnitelman mukainen ja niiden laatu kelvollinen.

### 3.9 Erikoistilanteet

Lennon aikana saattaa tapahtua poikkeustilanteita, jolloin Swinglet automaattisesti reagoi tilanteeseen tai sitten operaattorin on puututtava lennon kulkuun. Jälkimmäisen tilanteen ollessa kyseessä operaattorin on esimerkiksi väistettävä jotain toista lentoalusta ja laskeuduttava välittömästi, tai sitten lennättää lennokka takaisin laskupaikalle. E-motion-sovelluksen näytössä on varoituspaneeli, jossa varoitukset on jaettu kahteen luokkaan: *huomioitavat* varoitukset ja *hätätilanne* varoitukset.





Kuva 8. E-motion-varoituspaneeli

Hätätilanteessa varoitukset näkyvät lennon monitorointisovelluksen näytöllä *punaisella tekstillä*. Tällöin lennokka on joko menettänyt navigoinnin mahdollistavan GPS-paikannuksen, akun varaustilanne on täydellisen tyhjä tai INS-järjestelmän virhe estää lennokkia vakauttamista itseään. Tällöin lennokin on laskeuduttava välittömästi ja mahdollisimman pienellä nopeudella, jotta vahingot itse lennokille ja kolmannelle osapuolelle jäisivät mahdollisimman pieneksi. Laskeutumistapa riippuu hätätilanteeseen johtuvasta virhetilasta.

- INS-järjestelmässä olevassa toimintavirhe aiheuttaisi tilanteen, jossa se ei enää itse pysty vakauttamaan lentoasentoaan, eikä sitten voi enää tehdä pakkolaskua hallitusti liitäen. Tällöin Swinglet kääntää siivekkeet ääriasentoon ja sammuttaa moottorin. Tästä aiheutuu kontrolloimaton sakkaus tai syöksykierre. Tällä tavalla menettelemällä saadaan törmäysnopeus maahan, ja mahdollisesta tuulesta johtuva sivuttaissuuntainen reitiltä pois ajautuminen mahdollisimman pieneksi.
- GPS-paikannuksen toimintahäiriön sattuessa Swingletin ei ole enää mahdollista suorittaa navigointia, eli se siinä tapauksessa eksyisi. Tällaisessa tilanteessa se liittää moottori sammutettuna, hitaalla vauhdilla ja suurisäteistä ympyrän kehää pitkin maahan.
- Akun virran romahtaessa ensimmäisenä sammutetaan moottori. Swinglet tekee pakkolaskun hitaasti liitäen, seuraten lentosuunnitelman linjaa alas maahan.

Jos jokin edellä mainituista hätätilanteista poistuu ennen kuin swingletCAM ehtii maahan asti, se lentää 75 m:n korkeudella takaisin lähtöpisteeseen. Ja ellei operaattori

suorita mitään muuta ohjauskäskyä, se laskeutuu automaattisesti, kun kahden minuutin pituinen kiertely kotipisteen ympäri on päättynyt. (11, s. 29.)

Huomioita vaativat varoitukset esitetään varoituspaneelissa *keltaisella* tekstillä. Varoitus esitetään näytöllä, mikäli varoituksen aiheuttanut virhetilanne on sillä hetkellä ”päällä” tai sellainen tilanne on tapahtunut aikaisemmin kyseisen lennon aikana.

Varoituksen aiheuttavia virhe- tai häiriötilanteita on kuusi. Niitä ovat seuraavat:

- *Lennokki on liian kaukana.* Kyseinen raja-arvo on operaattorin itse asettama ohjausparametri. Alueen laajuutta määrittäessä on otettava huomioon mm. maaston aiheuttamat katveet näköolosuhteissa ja voimassa olevat ilmailusäännökset.
- *Reittiä ei ole määritetty.* Yhtään käännepistettä ei ole aktiivisena, eikä lennokki tiedä, että minne sen pitäisi mennä
- *Kameravirhe.* Kamera ei toimi joko akun virran ollessa loppunut tai kameran liitos lennokkiin ei ole riittävän hyvä.
- *Voimakas tuuli* (sisältää myös puuskaisuuden). Lennokki ei voi lentää turvallisesti annettua lentotehtävää.
- *Sisäinen virhe.* Jos tämä virheilmoitus toistuu jatkuvasti, niin silloin on otettava yhteyttä lennokin valmistajaan.
- Alhainen akun jännite. Tällainen virheilmoitus saattaa tapahtua myös lennokin lähettämistilanteessa, kun moottorin on pyörittävä täydellä teholla, jos akku ei ole täysin ladattu.

SwingletCAM keskeyttää annetun lentotehtävän ja palaa kotipisteelle laskeutumista varten, mikäli virheilmoitusta ei kuitata. Jotta pystytään palaamaan lentotehtävään, on *kuittaus*-nappia painettava. (11, s. 30.)

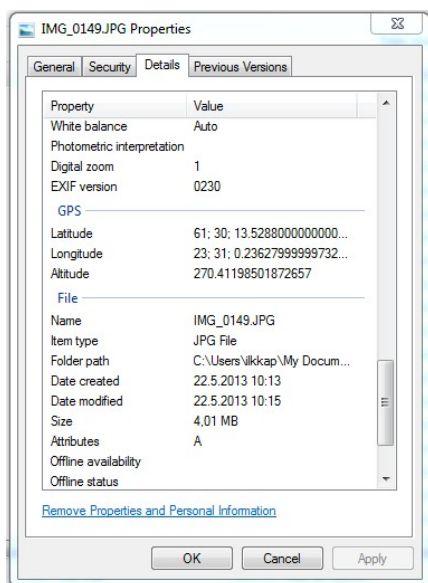
## 4 Datan jälkikäsittely

Ilmakuvausprosessissa datan jälkikäsittely vie huomattavasti pitemmän ajan kuin varsinainen kuvien ottaminen ja vaatii käsittelijältä myös enemmän interaktiivisuutta, vaikka varsinaiset laskennat jäävät sovelluksen tekemäksi. Edellä mainittuja automaattisia prosesseja voidaan ohjata myös komentojono-tyyppisinä prosesseina, jolloin listataan peräkkäisiä komentoja, jotka suoritetaan määritetyssä järjestyksessä. Laskennat voidaan jättää PC:lle yön ajaksi prosessoitaviksi.

### 4.1 Alkuvalmistelut

Datan jälkikäsittely voidaan aloittaa, kun valokuvat on siirretty PC:lle. Varmuuskopiointia ei voine koskaan korostaa liikaa, joten onnistuneen projektin aikaan saamiseksi on varmistettava, että kaikki kerätty data (valokuvat ja esim. runkopistehavainnot) on saatavilla projektin myöhemmässä vaiheessa.

Seuraavaksi valokuvien kuvatiedostoihin liitetään niiden kuvanottoaikkojen GPS:llä määritetyt koordinaatit. Tällöin tallennetut maantieteelliset WGS-koordinaatit liitetään kuvatiedostoon ominaisuustiedoksi, eli kuvatiedostoon attribuutiksi, joita myöhemmässä vaiheessa käytettävät laskentasovellukset osaavat käyttää hyödykseen kuvausblokkeja muodostettaessa. (Kuva 9.)



Kuva 9. Esimerkki kuvatiedoston sijaintiattribuutista

Koordinaattitiedon kirjoitus kuvatiedostoon tehdään senseFLY:n Postflight Suite-sovelluksella. Ensin valitaan paikannuksen sisältävä lokitiedosto, jonka sovellus on lennon aikana luonut. Seuraavaksi valitaan kuvatiedostot, joihin kuvanottoaikan sijaintitieto halutaan liittää.

Muita uloskirjoitettavia kuvanottoaikojen paikannustiedon tiedostoformaatteja ovat KML- ja GPX-tiedostoformaattit. Ne ovat erillisiä, XML-formaattiin kirjoitettavia uusia tekstitiedostoja. Niitä varten ei tarvitse erikseen osoittaa kuvatiedostoja. KML-formaatissa olevia tiedostoja voi katsella mm. Google Earth -sovelluksessa (kuva 10).



Kuva 10. Kuvaruutukaappaus Nokian lennätyksestä Google Earth -sovelluksessa.

## 4.2 Pisterunko

Runkopisteitä käytetään kameraparametrien optimoinnissa, jolloin kuvablokin sisäinen tarkkuus paranee. Niiden avulla saadaan myös parempi sijaintitarkkuus (ulkoinen orientointi) suhteessa käytettävään koordinaatistoon. Runkopisteitä ei kuitenkaan aina tarvitse käyttää. Sovelluksissa, joissa sijaintitarkkuus ei ole niin kriittinen, saattaa kuvauksen GPS-koordinaattien tarkkuus olla riittävä, ja siten aikaa vievää ja joissain tapauksissa kallistakin runkomittausta ei tarvitse tehdä. Vastaavasti jos ajatellaan vaikkapa kantakartan täydennystä, on käytettävä tarkkaa runkopisteverkkoa laskennan taustalla.

#### 4.3 Jatko-prosessointi

Jatko-prosessointi suoritetaan itse, tai se on mahdollista ostaa myös verkossa palveluna myyviltä yrityksiltä. Suomessa UAV-kuvauksiin liittyviä prosessointipalveluja tarjoaa ainakin Pieneering Oy.

UAV-kuvauksien prosessointiin keskittyneitä sovelluksia edustaa Suomessa kaksi yritystä. Näitä sovelluksia ovat Pieneering Oy:n Rapid-sovellukset ja Mosaic Mill Oy:n EnsoMOSAIC-sovellukset. Molemmat sovellukset sopivat myös miehitetyillä lennoilla hankitun dataan prosessointiin.

Ulkomailla prosessointia pilvipalveluna tarjoaa muun muassa Sensefly Ltd, joka on myös valmistanut käyttämämme SwingletCAM-lennokin. Pilvipalvelulla tässä tarkoitetaan sitä, että itse hankittuun kuvausdataan määritellään tuloksiin haluttu koordinaatisto, ja osoitetaan omien runkopisteiden sijainnit kuvilta, jos sellaisia on käytetty. Lisäksi verkkopalveluun ladataan runkopisteiden tiedot. Tällainen tiedonsiirto palvelimelle tehdään internet-yhteyden avulla. Kun prosessointi on valmis, saadaan tilatut ja valmiit tuotteet ladattua itselle verkosta.

Pilvipalveluita käytettäessä operaattorille itselleen jää ja hyvin vähän mahdollisuutta vaikuttaa prosessointiin. Opetustoiminnan, ja oppilasprojektien näkökulmasta katsoen oppilaitoksella pitää olla oma sovellus, jolla UAV-dataa voidaan itse käsitellä. Metroliassa on jatko-prosessointiin käytetty Photoscan Professional -sovellusta, jota edustaa venäläinen Agisoft LLC.

#### 4.4 Agisoftin Photoscan Professional

Prosessointi Photoscan-sovelluksessa jakaantuu neljään vaiheeseen. Niitä ovat kuvausblokin muodostaminen, tiheän pistepilven laskenta kuvilta, 3d-mallin (mesh) muodostaminen ja lopuksi ortokuvamosaiikin luonti ja/tai 3d-mallin teksturointi. Photoscan Pro käyttää hyväkseen näytönohjainkortin prosessointitehoa, mikä nopeuttaa merkittävästi kuva-aineistojen käsittelyä. (15, s. 4.)

#### 4.4.1 Prosessoinnin aloitus

Datan prosessointi alkaa kuvien tuomisella sovellukseen. Ellei kuvien ominaisuustietoihin ole aiemmin liitetty niiden kuvanottoaikkojen koordinaatteja, ne voidaan tuoda erillisestä tekstitiedostosta. Seuraavaksi muodostetaan kuvausblokki, jossa kuvat liitetään yhteen etsimällä vastinpisteitä vierekkäisiltä kuvilta. Prosessointi sovelluksessa on saatu nopeammaksi siten, että sovellus etsii vastinpisteitä ainoastaan alueilta, jotka ovat vierekkäisillä kuvilla yhtenevät. Kuvien peittämä alue maastossa tiedetään, koska tiedetään kameroiden sijainti ja asento kuvanottohetkellä. Esimerkiksi tärähdyksestä johtuvat huonolaatuiset kuvat kannattaa ottaa pois kuvablokista, jos kuvien kattavuus kyseisessä maastonkohdassa sen mahdollistaa.

Vastinpisteiden etsinnässä (eng. matching) sovellus etsii kuvilta yhteisiä pisteitä ja tutkii myös niiden ympäristön. Sen perusteella etsitään vastaavia vastinpisteitä viereisiltä kuvilta. Tavoitteena on tarkentaa kameran sijainti- ja asentotiedot kuvanottohetkellä ja myös parantaa kamerakalibroinnin ”lähtötietoja”. Edellä mainitut kameran tiedot tarvitaan jatkossa 3D-mallin muodostukseen sovelluksessa. Kuvat, joita ei saada sovitettua automaattisesti blokkiin, voidaan liittää siihen tekemällä manuaalisesti havaintoja jo blokkiin sovitettuihin kuviin nähden. Tällöin manuaalisesti tehtyjä havaintoja pidetään oikeina ja automaattinen laskenta voidaan tehdä kyseiselle blokin osalle uudestaan. (15, s. 13–14.)

#### 4.4.2 Runkopisteet

Perinteisessä fotogrammetrisessä projektissa runkopistehavaintojen avulla lasketaan kuvablokille mittakaava ja siirrytään mallikoordinaatistosta käytössä olevaan koordinaatistoon. Photoscan-sovellus käyttää runkopisteiden kuvahavaintoja kameran ulkoisten ja sisäisten parametrien optimointiin jo ”alustavalle” absoluuttisen orientoinnin sisältävälle kuvablokille.

Runkopisteiden mittaus kuville kannattaa tehdä avustetulla runkopisteenmittaus-toiminnolla. Kyseisellä mittausmenetelmällä tarkoitetaan sitä, että kun kyseinen piste on osoitettu yhdeltä valokuvalta, sovellus automaattisesti projisoi havaintosäteen korkeusmallin pinnalle ja siten osaa laskea pisteen sijainnin. Edellä mainitun perusteella Photoscan laskee ne kuvat, joilla kyseinen, edellä osoitettu piste näkyy, ja vain nämä kuvat esitetään operaattorille. Lisäksi sovellus ehdottaa tämän pisteen paikkaa kuvissa.

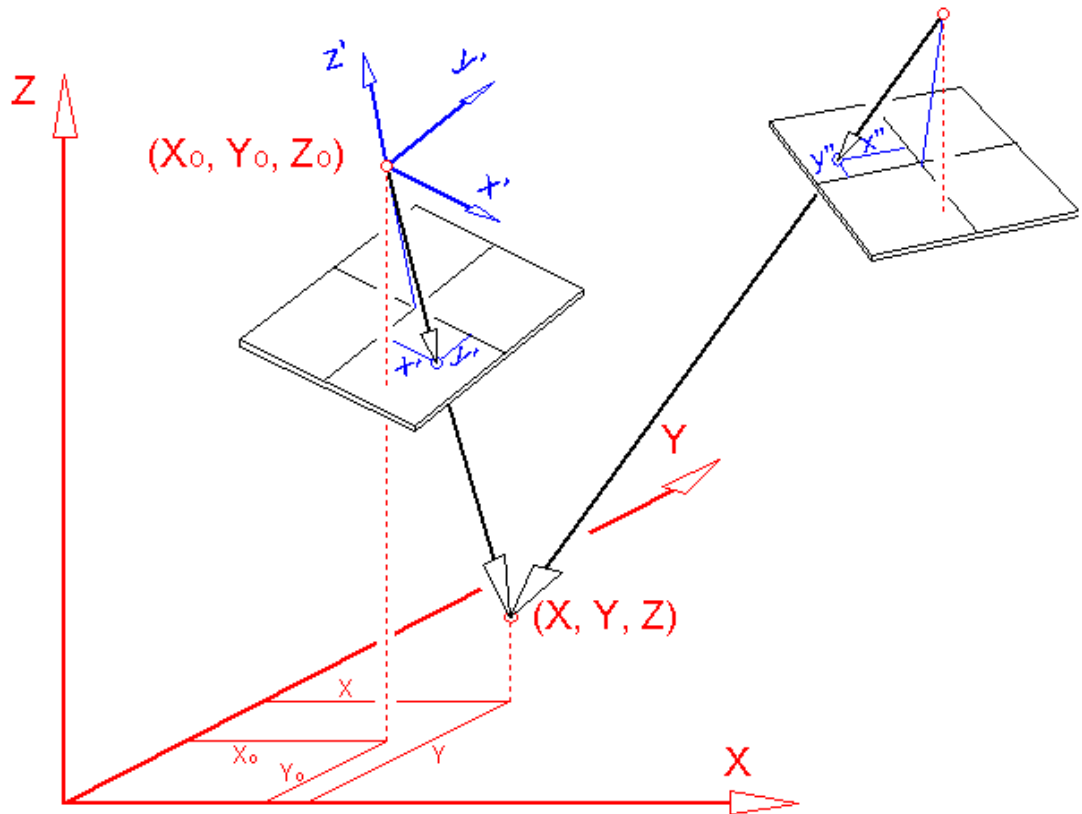
Tällä tavalla työskennellessä operaattorin työ nopeutuu, kun pisteiden etsiminen kaikista muista kuvista jää pois. Operaattorin tehtävänä on vain tarkistaa ehdotettu mittauspiste muista kuvista, tai sitten korjata sovelluksen ehdotus osoittamalla hiirellä signaalin keskipistettä. Kuvablokille pitää ensin tehdä harva mesh-verkko, jotta edellä mainittu avustettu toiminto on mahdollinen. (15, s. 40.)

#### 4.4.3 Kuvausblokin optimointi

Mallin georeferointiin käytetään 7-parametristä yhdenmuotoismuunnosta. Nämä parametrit ovat 3 siirtoa, 3 kiertoa ja mittakaava. Tällaisella muunnoksella voidaan vaikuttaa vain mallin lineaarisiin sovitusrvirheisiin. Ei-lineaarisia komponentteja ei voida poistaa tällä tavalla, ja tämä on myös pääsyy virheisiin georeferoinnissa. Mallin mahdolliset ei-lineaariset deformaatiot voidaan poistaa optimoimalla pistepilvi ja kameraparametrit suhteessa tunnettuihin runkopisteisiin. Optimoinnissa Photoscan tasoittaa pisteiden arvioidut koordinaatit ja kameraparametrit minimoimalla reprojektorvirheiden ja tasoitettujen runkopisteiden jäännösvirheiden neliösummat. Georeferointi, eli kuvamosaiikin sijainnin määrittäminen paranee huomattavasti optimoinnin ansiosta, ja se suositellaan tehtäväksi aina, jos lopullista mallia käytetään mihin tahansa mittaamiseen. (15, s. 43.)

#### 4.4.4 Pistepilvi

Seuraavassa vaiheessa muodostetaan tiheä pistepilvi. Sen laskenta perustuu kameran eli kuvanottoaikojen sijaintitietoihin (ulkoisen orientoinnin parametrit) ja kyseessä olevan pisteen kuvahavaintoihin. Kun tunnetaan kameroiden sijainti- ja asentotiedot kuvanottohetkellä, pisteen sijainnin laskenta saadaan eteenpäinleikkauksena kahdesta tai useammasta kuvahavainnosta (kuva 11). Pisteen sijainnin määrittämisessä käytetään mahdollisimman useaa kuvahavaintoa.



Kuva 11. Eteenpäinleikkaus avaruudessa(16)

Pistepilvi voidaan editoida ja luokitella ennen kuin se viedään toisiin sovelluksiin tai ennen 3D-mesh-mallin luontia. Photoscanilla voidaan myös tarvittaessa muokata luotua mesh-mallia. Tällä tarkoitetaan esimerkiksi mallin harvennusta ja reikien täyttämistä. Mikäli luodulle mallille on tehtävä vaativampia muokkauksia, malli on ensin vietävä export-toiminnolla toiseen sovellukseen. Editoinnin jälkeen se tuodaan import-toiminnolla takaisin Photoscaniin. (15, s. 4.)

#### 4.4.5 Teksturointi

Korkeusmallin pinnan esittäminen siten, että sen pintaan on kiinnitetty jokin kuva, kutsutaan teksturoinniksi. Tässä tapauksessa se olisi ortokuvamosaiikin kiinnittäminen korkeusmallin pintaan. Teksturoinnin luontia mallille ei aina ole pakollista suorittaa. Esimerkiksi ortokuvan laskennassa ei teksturointia tarvita lainkaan, koska kuvamosaiikin orto-oikaisussa käytetään vain alkuperäisiä valokuvia ja korkeusmallia.



#### 4.5 Lopputuotteet

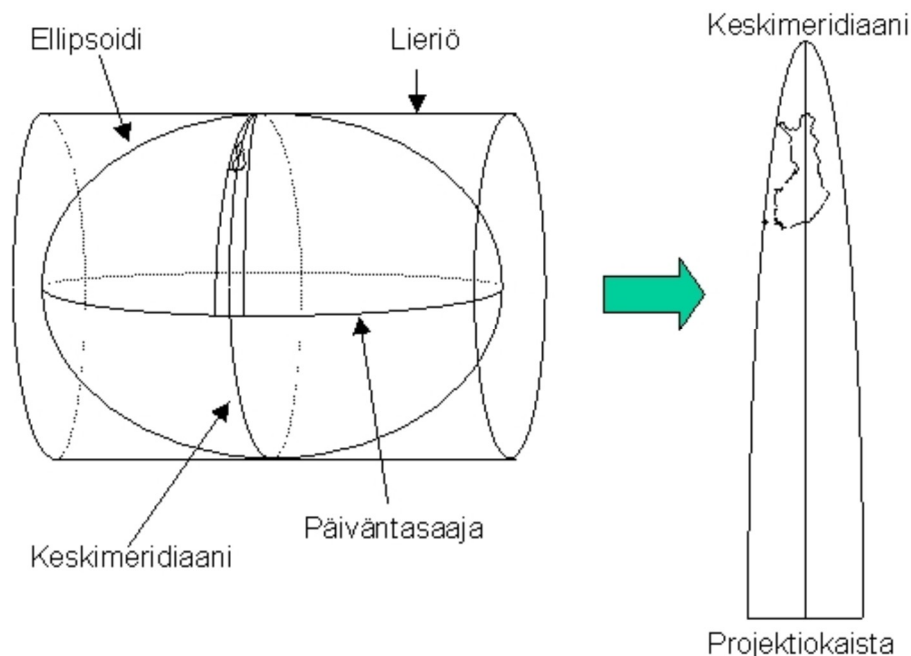
Photoscanilla on mahdollista tuottaa monia eri lopputuotteita, ja kirjoittaa ne eri formaatteihin. Erityyppisiä lopputuotteita ovat mm. harva ja tiheä pistepilvi, kameran kalibrointi- ja orientointitiedot, mesh-malli, ortokuvat ja digitaaliset korkeusmallit (DTM ja DSM). Pistepilvet ja kameran kalibrointi- sekä ulkoisen orientoinnin tiedot voidaan kirjoittaa toiseen formaattiin heti, kun kuvien sovitus kuvablokkiin on tehty. Kuitenkin esimerkiksi ortokuvien laskenta voidaan suorittaa vasta, kun korkeusmalli on laskettu.

Ulkoisen orientoinnin kameraparametrit voidaan viedä export-toiminnolla käytettäväksi muihin sovelluksiin. Yleisiä kolmannen osapuolen formaatteja ovat muun muassa Inpho Project File, BINGO ja PATB. (15, s. 18.)

## 5 Case Nokian Renkaat

Photoscanilla lasketun pistepilven korkeustarkkuuden tutkiminen toteutettiin case Nokian Renkaiden yhteydessä. Tehtävänä oli laatia koko rata-alueen kattava maastomalli ja ortokuvamosaiikki. Rata-alue on enimmäkseen aukeaa ja rata elementtinä kiinnostavan haastava mm. asfaltin pinnan tekstuuriin köyhyden takia. Fotogrammetrisesti laskettavan pistepilven korkeustarkkuuden selvittämistä varten suoritettiin lisäksi takymetrikar-toitus kahdesta profiililtaan erilaisista radan kohdista.

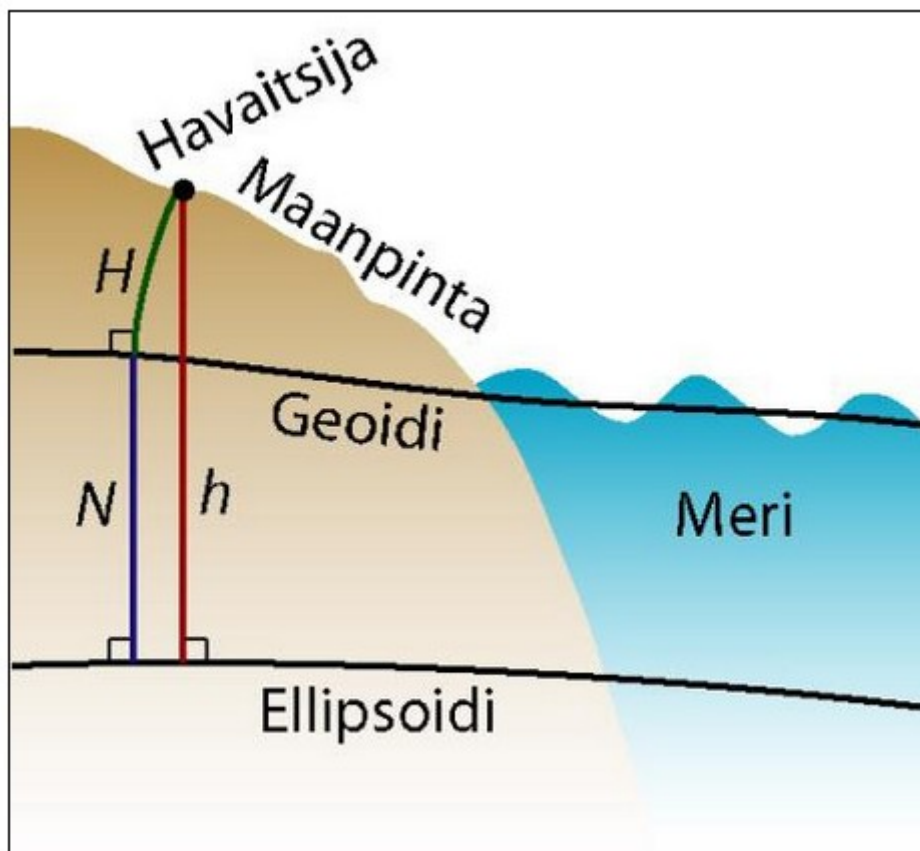
Julkisen hallinnon suosituksessa (JHS) 154 todetaan tasokoordinaatistoista seuraavaa: Pohjoismaisen Geodeettisen Komission (NKG) ja Euroopan komission sisäinen suosi-tus karttojen esitystavaksi on UTM-pohjainen ETRS-TMn-koordinaatisto, jossa n viittaa kaistan numeroon. Lisäksi siinä todetaan, että niissä tehtävissä, joissa leveäkaistainen koordinaatisto ei sovellu, esimerkiksi kaavoitus- ja rakentamistoiminnassa, voidaan käyttää Gauss-Krüger-projektiota. G-K-projektion keskimeridiaaniksi voidaan valita parhaiten soveltuva tasa-aste ( $19^\circ$ ,  $20^\circ$ , ...  $31^\circ$ ), jolloin projektiokorjaukset pysyvät pie-ninä. UTM-projektio on leikkaava lieriöprojektio, kun taas Gauss-Krüger-projektiossa lieriö sivuaa ellipsoidia keskimeridiaania pitkin.



Kuva 12. Poikittaisen lieriöprojektin periaate (17, s. 6)

Lisäksi JHS 154:ssä todetaan UTM-projektion ominaisuuksista muun muassa seuraavaa: Keskimeridiaanilla mittakaavakerroin on 0,9996; oikeamittaiset leikkausviivat (mittakaava on 1,0) sijaitsevat noin 180 km keskimeridiaanista itään ja länteen. (17, s. 7.) Nokian renkaiden testirata sijaitsee 185 km länteen keskimeridiaanista, ja siten siis lähes täsmälleen oikeamittaisella leikkausviivalla, joten ETRS-TM35FIN-koordinaatisto oli luonteva valinta mittausten järjestelmäksi. Maastomittausten lähtöpisteet määritettiin VRS-GNSS-mittausmenetelmällä, joten tarkka muunnos satelliittijärjestelmien WGS84-koordinaatistosta TM35FIN-koordinaatistoon on tunnettu.

Mittausten korkeusjärjestelmäksi valittiin N60, joka on sidottu Helsingin keskivedenpintaan. Jotta satelliittimittausten ellipsoidisista korkeuksista päästään ortometrisiin N60-korkeuksiin, täytyy tuntea geoidimalli, sillä pisteen vaaittu korkeus  $H = h - N$ , jossa  $h$  on korkeus ellipsoidista ja  $N$  geoidimallin korkeus. (18, s. 11.)



Kuva 13. Ellipsoidinen ja ortometrinen korkeus (19)

N2000-korkeusjärjestelmän korkeudet ovat EVRS:n (European Vertical Reference System) määritelmän mukaisesti normaalikorkeuksia. Korkeusjärjestelmän N2000 lähtöta-

so Suomessa on Kirkkonummen Geodeettisen laitoksen Metsähovin observatorion alueella oleva kiintopiste PP2000. N2000:n yhteydessä suositellaan käytettäväksi FIN2005-geoidimallia, kun taas N60-järjestelmässä käytettävä geoidimalli on FIN2000. (18, s. 11.) Todettakoon vielä, että tekemämme mittauksen jälkeen useat kaupungit ovat jo siirtyneet uuteen N2000-korkeusjärjestelmään. Esimerkkinä mainittakoon pääkaupunkiseudun kaupungit Helsinki, Espoo, Kauniainen ja Vantaa, jotka ottivat käyttöönsä uuden tasoprojektion ETRS-GK25 ja uuden korkeusjärjestelmän N2000 1.12.2012. (20)

Maastomittauksissa käytettiin Trimble R8-3 GNSS vastaanotinta ja Trimble S6 1 takymetriä. Takymetrin kulmanmittaustarkkuus (vaaka- ja pystykehä) on 1 astesekunti, eli 0,3 mgon ja etäisyyden mittauksen tarkkuus prismaan mitattaessa 1 mm + 1 ppm. (21, s. 3.) Etäisyyden mittauksen tarkkuus on edellä mainittu 1 mm, kun mittaustapana käytetään ”standardi”-mittaustapaa, ja se oli käytössä kaikissa orientointihavainnoissa, apupisteiden- ja signaalien mittauksissa.

Kartoitetun pisteen keskivirhe voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$m_{\Delta p} = \sqrt{m_s^2 + \frac{m_\alpha^2 \cdot s^2}{\rho^2}}, \quad (2)$$

jossa

- $m_s$  on etäisyysmittauksen keskivirhe
- $m_\alpha$  on kulmamittauksen keskivirhe
- $s$  on vaakamatka
- $\rho$  on kulmayksikön muunnos (= 200/π)

(22, s. 33)

Trimble S6 1 -takymetrillä mitattaessa 200 metrin päähän saadaan yllä olevaan kaavaan sijoittamalla pistevirheeksi 1,4 mm. Kaavassa ei ole huomioitu autolockin kohdistuksesta johtuvaa epävarmuutta, joka on alle 2 mm / 200 m. Kohdistusvirhe on lineaar-

rinen. (21, s. 4.) Lisäksi keskivirhe on laskettu suhteessa lähtöpisteeseen, jolloin lähtöpistettä on pidetty virheettömänä.

Radan pinnan kartoituksessa käytettiin etäisyyden mittauksessa tracking-toimintoa, eli jatkuvaa etäisyyden mittaustapaa, jolloin etäisyysmittaus pisteelle on nopeampaa, mutta etäisyysmittauksen keskivirhe on tällöin 5 mm. Lennokin lennätykset ja maastomittaukset Nokialla suoritettiin yhdessä työni ohjaavan opettajan, DI Jussi Laarin kanssa 30.8.2012.

#### 5.1.1 Radan korkeus- ja runkopisteiden kartoitus

Alueella ei ollut aikaisemmin määritettyä runkopisteverkkoa, joten ensimmäisessä takymetrin orientoinnissa (kuvassa piste n:o 1) tarvitsi lähtöpisteiden (pisteet 101–103) sijainnin määrittämisessä käyttää VRS-RTK-mittaustapaa. Orientoinnin lähtöpisteet mitattiin kiintopistemittauksena siten, että jokaisella pisteellä kerättiin GNSS-havaintoja kolme minuuttia, yhteensä siis 180 havaintoa/piste. Pisteellä 101 saatiin kerättyä dataa 15 satelliitista ja 17 satelliitista pisteillä 102–103. Havaintojen keskiarvona määritettiin kyseisen pisteen koordinaatit. GNSS-havaituille pisteille tehtiin takymetrillä kulma- ja etäisyshavainnot välittömästi pisteen tallennuksen jälkeen. Kartoitussauva oli tuettuna statiivilla sen ajan, kun GNSS- ja takymetrihavainnot tehtiin. Pisteiden 101 ja 102 välinen etäisyys oli 204,28 m ja välit 102–103–101 vastaavasti 293,55 m ja 297,95 m. Taulukossa 4 on esitetty vapaan asemapisteen määrittämisessä keskivirheet ja jäännösvirheet kaikille kolmelle lähtöpisteelle.

Taulukko 4. Orientoinnin jäännösvirheet kojeasemalle 1 (ote mittausraportista)

<b>Vapaa- asemapiste</b>	1	<b>P keski- virhe</b>	0.001	<b>I keskivir- he</b>	0.001	<b>Kork. keskivirhe</b>	0.004		
Asemapisteen residuaalit									
<b>Piste</b>	101	<b>dP</b>	-0.004	<b>dI</b>	0.001	<b>dKork</b>	0.006		
		<b>dVk</b>	- 0.00013	<b>dPk</b>	- 0.00287	<b>dVinoEt</b>	0.004		
<b>Piste</b>	102	<b>dP</b>	0.000	<b>dI</b>	-0.003	<b>dKork</b>	-0.002		
		<b>dVk</b>	- 0.00044	<b>dPk</b>	0.00107	<b>dVinoEt</b>	-0.003		
<b>Piste</b>	103	<b>dP</b>	0.001	<b>dI</b>	0.002	<b>dKork</b>	-0.007		
		<b>dVk</b>	0.00057	<b>dPk</b>	0.00229	<b>dVinoEt</b>	-0.001		

Kartoitettavat pisteet mitattiin kaikki takymetrimittauksena, jotta mittauksen sisäinen tarkkuus saatiin mahdollisimman hyväksi. Sisäisellä tarkkuudella tässä tarkoitetaan mitattujen pisteiden keskinäistä yhteensopivuutta. Mittaukset suoritettiin robottimittauksena autolock-toimintoa hyväksi käyttäen. Prismasauvan pituus pidettiin mahdollisimman lyhyenä (70 mm). Tällä menetelmällä pyrittiin minimoimaan kartoitussauvan vinoudesta aiheutuva koordinaattien epätarkkuus tason ja korkeuden osalta. Autolock-toiminnossa kaukoputken kohdistus prisman keskipisteeseen tapahtuu automaattisesti. Lisäksi takymetrin tähtäyssäde on lukittuneena prismaan keskikohtaan koko ajan. Kartoitetuista pisteistä laskettiin korkeusmallit, joita myöhemmin verrattiin fotogrammetrisesti lasketun pistepilven pisteiden korkeuksiin.

VRS-verkko on koko Suomen kattava, Geotrim oy:n ylläpitämä kiinteä GNSS-tukiasemaverkko. Siinä käyttäjälle lasketaan virtuaalitukiasema mittausalueen välittömään läheisyyteen, jotta saadaan minimoitua RTK-mittaustavan ppm-virhe. Kyseinen virhe aiheutuu mittausyksikön (rover) etäisyydestä kiinteisiin tukiasemiin nähden. Häkli ja Koivula ovat todenneet VRS-RTK-mittaustavan tarkkuudeksi tasossa 25 mm ja korkeudessa 35 mm. (23, s. 22). VRS-RTK-havainnot on tehty vuonna 2003, joten teknologian kehittymisen myötä VRS-mittaustarkkuus on todennäköisesti parempi, kuten J. Tolonen toteaa diplomityössään. (24, s. 78.)

Takymetrimittauksissa pyrittiin minimoimaan asemapisteen lukumäärä. Asemapisteenä 1 tehtiin havainnot signaaleihin 11–14, apupisteisiin 21–22 ja kaikki radan ympäröivän muotoisen kohdan mitatut pisteet. Ympyräkohdassa mitattiin pisteitä yhteensä 230 kpl. Kuvassa 14 on ortokuvan päällä esitetty takymetrillä mitatut pisteet.



Kuva 14. Takymetrillä mitatut pisteet

Seuraavana asemapisteenä käytettiin pistettä n:o 22. Tunnetun asemapisteen orientoinnissa liitospisteenä käytettiin apupistettä n:o 21. (pisteiden 21 ja 22 välinen etäisyys 244,25 m). Orientoinnin luotettavuus vaakaetäisyyden osalta tarkistettiin pisteen merkintätoiminnolla suuntapisteelle 21. Jäännösvirheet olivat pohjoissuunnassa  $-2$  mm ja itäsuunnassa  $-1$  mm. Asemapisteenä määritettiin vain signaalin n:o 15 koordinaatit. Lopuksi tehtiin vielä kontrollimittaus signaalipisteelle nro 14. Poikkeamat ensimmäisestä asemapisteenä määritettyihin koordinaatteihin nähden oli pohjoissuunnassa  $0$  mm, itäsuunnassa  $3$  mm ja korkeudessa  $0$  mm.

Kolmantena asemapisteenä käytettiin pistettä n:o 21. Asemointi tehtiin tunnetun asemapisteen orientointina, liitospisteen ollessa piste n:o 22. Tältä asemapisteenä havaittiin kaikki radan suoran osuuden pisteet (pisteitä mitattiin 125 kpl). Viimeisin havainto tehtiin merkinnällä signaaliin n:o 11. Jäännösvirheet olivat pohjoissuunnassa  $+1$  mm ja itäsuunnassa  $-2$  mm. Tällä kontrolloitiin orientoinnin luotettavuutta ja mitausten sisäistä tarkkuutta suhteessa ensimmäiseen kojeasemaan (asemapisteen nro 1) nähden. Li-

säksi voitiin todeta, että koje ei ollut liikkunut tai orientoinnissa määritetty suunta kiertynyt.

Mitatun pisteen korkeus ratkaistaan takymetrimittauksissa trigonometrisesti. Havaintoina on mitattu vinoetäisyys ja pystykulma (Kuva 15). Asemapisteen ja kartoitettavan pisteen korkeusero saadaan seuraavasta kaavasta:

$$dH = v * \cos(z) + i - m, \quad (3)$$

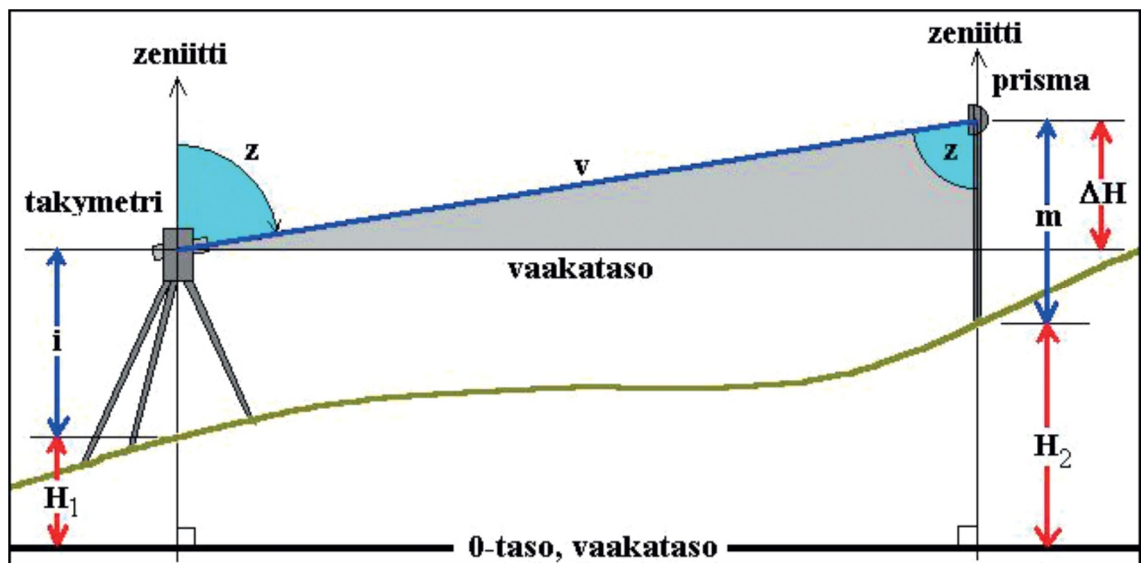
jossa

v on vinoetäisyys

z on pystykulma

i on kojeen korkeus

m on tähyksen korkeus.



Kuva 15. Trigonometrisen korkeudenmittauksen periaate (25, s. 61).

Edellä kuvattu trigonometrisen korkeudenmittauksen peruskaava on sopiva lyhyillä matkoilla, kun tähtäysetäisyys  $s < 250$  m. Pidemmässä havainnoissa on huomioitava maankaarevuus ja refraktio. (26, s. 51.)



Korkeuseron keskivirhe lyhyillä matkoilla saadaan kaavalla:

$$m_{dH} = \sqrt{\cos^2 z m_s^2 + s^2 \sin^2 z m_z^2 + m_i^2 + m_m^2}, \quad (4)$$

jossa

$m_m$  on tähyskorkeuden keskivirhe

$m_i$  on kojekorkeuden keskivirhe

$m_z$  on zeniittikulman keskivirhe

$m_s$  on etäisyydenmittauksen keskivirhe.

(22, s. 26)

Olettamalla tähys- ja kojekorkeuden keskivirheiksi 1 mm, zeniittikulman keskivirheeksi  $4,7 \cdot 10^{-6}$  rad (0,3 mgon) ja etäisyydenmittauksen keskivirheeksi 5 mm, saadaan suoran radanosan pisteelle nro 1369 (pystykehälukema 100,4327 ja vinoetäisyys 198,167) korkeuseron keskivirheeksi 1,7 mm, joka on myös kaikkien mitattujen 125 pisteen keskivirheen keskiarvo. Kaavassa on huomioitu pelkästään havainnoista johtuvat virheet. Asemapisteen sijainnin virhettä ei ole huomioitu.

Kuvausalueelle sijoitettavien signaalien määrä ja sijoittelu on myös suunniteltava. Lennokkikuvauksen pisterunko, eli signaalit, mitattiin myös takymetrimittauksena. Rata-alueelle ei siis rakennettu yhtään kiinteää pistettä. Käyttämämme signaalit tehtiin kapalevystä niiden helpon liikuttavuuden (keveys) ja muokattavuuden takia. Levyt leikattiin (70 x 70) cm:n kokoisiksi neliöiksi, joihin maalattiin 50 cm halkaisijaltaan oleva musta ympyrä. Muuten levyt ovat valkoisia ja paksuudeltaan 1 cm. Levyn musta ja valkoinen väri ovat mattapintaisia, jotta valosäteiden aiheuttama häikäisy signaaleissa olisi mahdollisimman pientä. Signaalit ankkuroitiin kuvauksen ajan paikallaan laittamalla niiden kulmien päälle painoiksi kiviä. Kuvassa 16 on esitetty signaalin erottuminen ilmakuvasta.



Kuva 16. Signaali n:o 15 ympyrän keskellä

Signaloinnilla tarkoitetaan runkopisteiden näkyvöittämistä niin, että ne erottuvat hyvin kuvista ja ovat mitattavissa. Runkopisteet voivat olla jo aikaisemmin rakennettuja ja mitattuja pisteitä, tai kuvauksen yhteydessä rakennettavia ja mitattujen pisteitä. Signaalien laatu, koko ja sijainnit on myös suunniteltava. Signaalin koko määräytyy kuvausmittakaavan mukaan. Pistesignaalin läpimitalle  $d$  pätee kokemusperäinen sääntö:  $d$  on noin  $25 \text{ cm} * m_b / 10\,000$ , jossa  $m_b$  = kuvausmittakaavaluku. Edellä mainittua ei kuitenkaan tarvitse noudattaa aivan täsmällisesti. (13, s. 349.) Kuvausmittakaavaluku on noin 25350, kun lennätyskorkeus on 109 metriä ja käytetty kamera Canon IXUS HS220. Siten edellä mainitun mukaan signaalin läpimitan tulisi olla noin 64 cm.

Kuvausmittakaavaluku lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$m = \frac{h}{c} = \frac{S_{kohteessa}}{S'_{kuvalla}} = \frac{1}{M}, \quad (5)$$

jossa

c on kameravakio

h on lentokorkeus

s' on etäisyys kuvalla

s on etäisyys kohteessa

M on mittakaavaluku.

(27, s. 4)

Case Nokian Renkaissa kameravakion ollessa 4,3 mm ja lentokorkeuden 109 m saadaan mittakaavaluvuksi yllä olevan perusteella noin 25350. Alla mainittu sensorin pikselikoko maastossa saadaan kaavalla:

$$GSD = M * pikselikoko, \quad (6)$$

(28, s. 3)

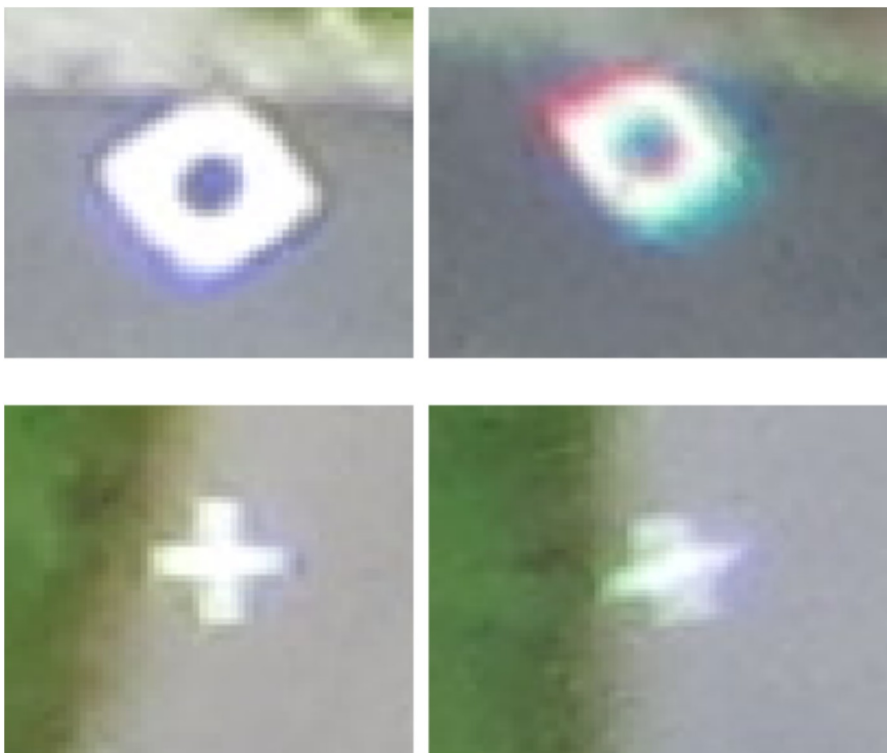
Case Nokian Renkaissa  $25350 * 1,5494 \mu = 0,039 \text{ m}$ .

Digitaalisilla kuvilla kuvan pikselikoko ilmaistaan GSD:nä (Ground Sample Distance). Tämä on kuitenkin eri asia kuin kuvan erotuskyky. Havaittavan ja tulkittavan kohteen kokoina voidaan pitää seuraavaa nyrkkisääntöä:

- Havaittavan kohteen koko:  $3 \cdot \text{GSD}$
- Tulkittavan kohteen koko:  $21 \cdot \text{GSD}$

(29, s. 8.)

Ympyränmuotoinen kuvio näyttäisi pitävän alkuperäisen muotonsa paremmin kuin perinteinen ristisignaali. Lisäksi ympyrän koko osoittautui käyttökelpoiseksi ainakin käytössämme olevan kaluston kanssa, jossa lennokka kuvauslupina on hyvin epävakaata ja siten siitä otetut valokuvat saattavat poiketa toivotusta nadiirikuvauksesta. Nadiirikuvauksella tarkoitetaan tilannetta, jossa valokuvat otetaan suoraan luotilinjaa pitkin alaspäin. Kuvassa 17 esitetyt ympyränmuotoiset signaalit on kuvattu swingletCAMilla Nokian Renkaiden testiradalla ja ristisignaalit Espoon Leppävaarassa.



Kuva 17. Ympyrä- ja ristisignaalit

### 5.1.2 Lennokkikuvaus

Pirkkalan lentoaseman läheisyyden vuoksi olimme yhteydessä Pirkkalan lennonjohtoon selvästi ennen varsinaista lennätystä. Pirkkalan lennonjohdon päällikkö antoi luvan kyseiselle kuvauslennätykselle. Testiradan alue sijaitsee EFTP:n (Europe Finland Tampere Pirkkala) lentoaseman lähialueella, VFR-harjoitusalueen NOKIA eteläkulmassa. Sijainnista johtuen meidän tuli ilmoittaa lennonjohtoon, kun aloitimme toiminnan ja vastaavasti kun olimme lopettaneet lennokokuvaukset. Kuvaus tehtiin 30.8.2012 klo 14–15:20. Kuvauslentoja teimme varmuuden vuoksi kolme. Lennot poikkesivat toisistaan lennätyskorkeuden, peittävän alueen muodon ja koon, sekä lennätys suunnan suhteen. Kolmas lennätys oli vain ”yleiskuvaus”, jota ei käytetty ortokuvan/pistepilven laskennassa ollenkaan. Säätila lennätysten aikana oli pilvisyydeltään vaihteleva. Lämpötila 15,2° C, ilmanpaine 1008 mbar ja tuulen nopeus vaihteli välillä 2–5 m/s, ei kuitenkaan puuskia. Lennokkikuvauksia ajatellen sääolosuhteet olivat kohtalaisen hyvät.

### 5.1.3 Kuvaprosessointi

Ensimmäiset kaksi lentoa lasketettiin Sensefly ltd:n pilvilaskentapalvelussa. Laskennat teetettiin siten, että ensin laskettiin koko radan alueen kattava ensimmäinen lento yksinään. Seuraavaan laskentaan otettiin mukaan toinen kuvaus, joka kattoi vain osan rata-alueesta. Toinen kuvaus tehtiin myös ensimmäistä vähän korkeammalta, ja sen lentosuunta oli poikittainen ensimmäiseen lentoon nähden. Tehdyille kuvauksille yritettiin laskea ilmakolmiointi koululla käytettävissämme olevalla Intergraphin ImageStation-stereotyöasemalla. Ilmakolmiointin laskenta ei näyttäisi toimivan odotetulla tavalla käytössämme olevalla versiolla, ei ainakaan täysin ilman operaattorin tekemiä manuaalisia liitospistehavaintoja. Tätä tukee Honkavaaran ym. toteamus: ”perinteiset fotogrammetriset ohjelmistot eivät sovellu kovin hyvin pieniformaattisten kuvien käsittelyyn”. (30, s. 71.)

### 5.1.4 Pistepilvi – suora radanosuus

Fotogrammetrisesti lasketun pistepilven tarkkuus riippuu kuvauksen lentokorkeudesta. 150 metrin korkeudesta tehdyn kuvauksen pisteiden tarkkuudeksi korkeuden osalta ilmoitetaan olevan noin 2–3 \* pikselikoko, eli noin 10–15 cm. (21) Tutkimme pistepilven tarkkuutta kahdella eri radan osalla, joissa vertailupintana käytettiin takymetrimittauksista muodostettua korkeusmallia. Korkeusmallien luontiin ja siitä edelleen pisteiden

korkeuseron laskentaan maastomallista käytettiin suomalaista 3D-systems Oy:n 3D-win-sovellusta. Radan pintamateriaali on asfalttipinta. Pisteiden korkeustarkkuuden keskihajonta oli jarrusuoran kohdalla 27 mm, kun kuvauskorkeus oli 109 metriä.

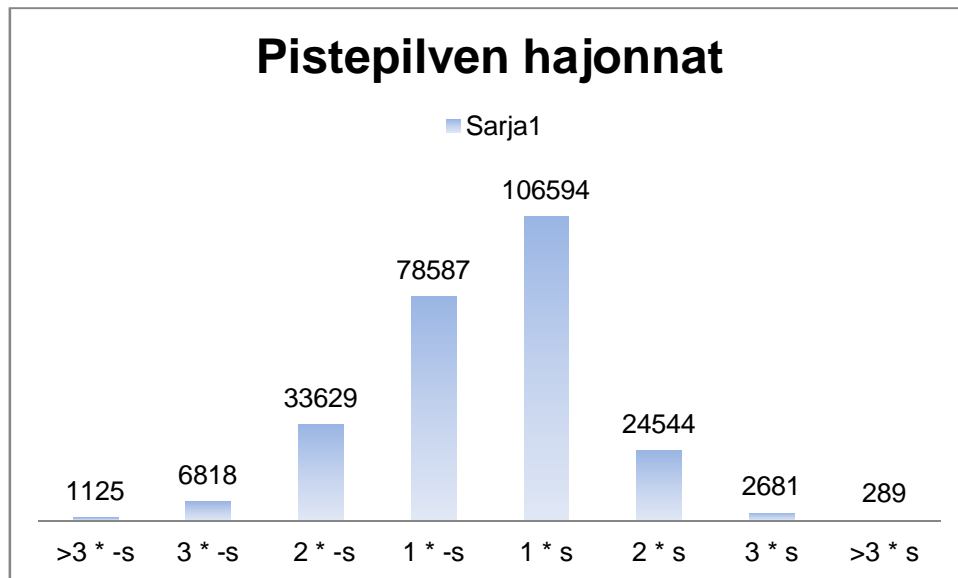
Taulukossa 5 on esitetty tuloksia fotogrammetrisesti määritetyn pistepilven ja takymetrillä mitatun maastomallin korkeuseroista radan suoralta osalta. Suoran osuuden pinta-ala on noin 1500 m<sup>2</sup> ja pistepilven pisteiden lukumäärä on 264267.

Taulukko 5. Pistepilven pisteiden korkeuserot suhteessa takymetrillä mitattuun korkeusmalliin

keskiarvo	+ 0,008
mediaani	+ 0,011
keskihajonta	0,027
min	-0,163
max	0,134

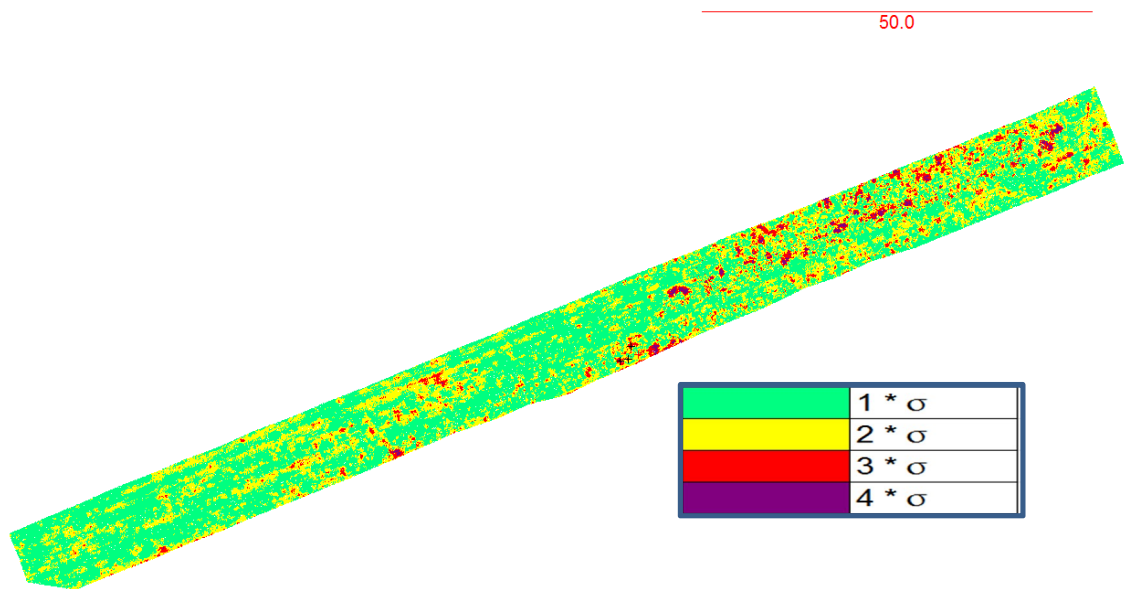
	min	max	kpl
keskiarvo±1*s	-0,019	0,035	185181
keskiarvo±2*s	-0,045	0,062	68173
keskiarvo±3*s	-0,072	0,089	9499
karkeat virheet	1125	289	1414
	<b>yhteensä</b>		<b>264267</b>
	<b>kpl</b>		

Kuviossa 1 on esitetty pistepilven hajonnan jakaantuminen radan suoralla osuudella.



Kuvio 1. Pistepilven hajonta

Kuvassa 18 on esitetty pistepilven pisteiden korkeuserojen jakaantuminen suhteessa takymetrillä mitattuun maastomalliin.



Kuva 18. Pisteiden korkeuserojen hajonnan sijoittuminen suoralla radanosuudella

### 5.1.5 Ympyränmuotoinen radanosuus

Toisessa tutkitussa radanosassa asfaltinpinnan korkeusasema laski noin parin prosentin kaltevuudella ympyrän keskipistettä kohden. Ympyrän mitatun osan pinta-ala on noin 4630 m<sup>2</sup> ja pistepilven pisteiden lukumäärä on 767714 pistettä. Taulukossa 6 on esitetty pistepilven pisteiden korkeuserotietoa suhteessa takymetrillä mitattuun maastomalliin ympyräosuudella.

Taulukko 6. Pistepilven pisteiden korkeuserot suhteessa takymetrillä mitattuun korkeusmalliin

keskiarvo	+ 0,001
mediaani	+ 0,000
keskihajonta	0,020
min	-0,181
max	0,152

	min	max	kpl
keskiarvo±1*s	-0,020	0,021	560907
keskiarvo±2*s	-0,040	0,041	165342
keskiarvo±3*s	-0,060	0,062	32353
karkeat virheet kpl	5317	3170	9112
	<b>yhteensä kpl</b>		<b>767714</b>



### 5.1.6 Ortokuva

Kuvassa 19 on esitetty Photoscan Prolla laskettu orto-oikaistu kuva. Kuvan maastoresoluutio on noin 4 cm, ja tiedostokoko noin 1,2 GB. JPEG2000-kuvapakkauksen asetuksista riippuen tiedostokoko pienenee alle 400 MB:n.



Kuva 19. Orto-oikaistu kuva testiradasta

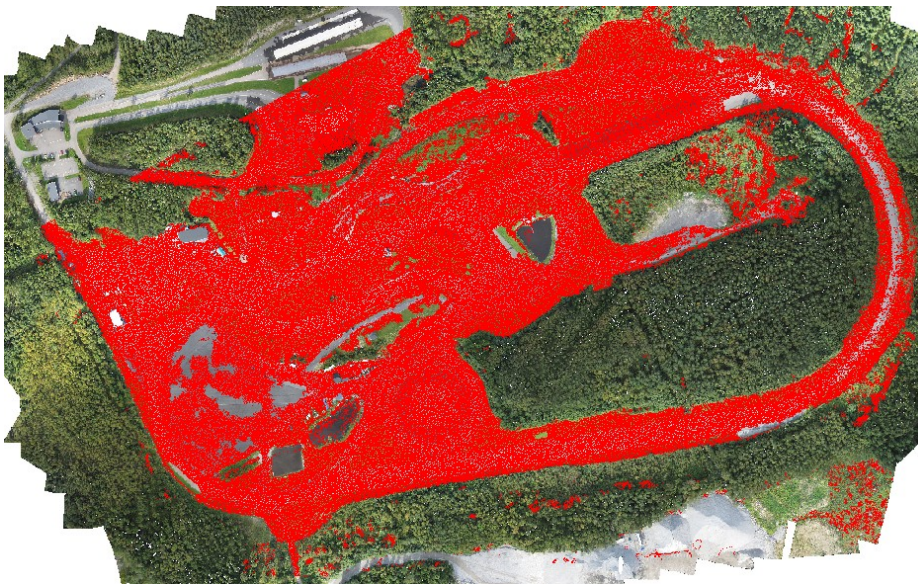
## 5.2 MML:n laserkeilausaineisto

Laserkeilausaineisto on tarkin Maanmittauslaitoksen korkeustietoaineisto. Aineiston pistetiheys on vähintään 0,5 pistettä/m<sup>2</sup> ja korkeustarkkuuden keskivirhe on enintään 15 cm. Pisteiden välinen etäisyys on noin 1,4 metriä. Laserkeilauslennot suoritetaan noin 2 000 m:n korkeudesta. (32) Laserkeilausaineistosta lasketun korkeusmallin korkeuden erot takymetrillä testiradalla kartoitettuihin pisteisiin nähden on esitetty seuraavassa taulukossa:

Taulukko 7. Takymetripisteiden erot laserkeilausaineiston korkeusmalliin.

n (kpl)	354
keskiarvo	-0,02
keskihajonta	0,05
mediaani	-0,01

Kuvassa 20 on esitetty Photoscanilla lasketun maanpintaan luokiteltujen pistepilven pisteiden korkeuksien erot suhteessa Maanmittauslaitoksen maanpintaan luokiteltuun laserkeilausaineistoon. Kuvassa on esitetty niiden pisteiden sijainnit, joiden korkeusero malliin nähden on enintään ± 15 cm. Edellä mainittuun korkeusväliin kuuluu 72 prosenttia pistepilven 436 292 pisteistä.



Kuva 20. Pistepilven pisteiden sijainnit, joiden ero laserkeilausaineiston korkeusmalliin enintään 15 cm.

Kuvassa 21 on esitetty pistepilven pisteet, joiden poikkeama laserkeilausaineiston korkeusmalliin on enemmän kuin 15 cm. Tiheäpuustoisesta metsästä ei automaattisella maanpinnan luokituksella saatu kuin satunnaisia maan pinnan pisteitä.



Kuva 21. Pisteet, joiden korkeusero korkeusmalliin on yli 15 cm.

Edellä esitetyt kuvat osoittavat, että fotogrammetrisesti lasketun UAV-datasta lasketun pistepilven korkeuden tarkkuus avoimissa maaston kohdissa vaikuttaa käyttökelpoisilta moniin eri sovelluksiin.

## 6 Pohdintoja

UAS-tekniikan käytölle maanmittaustekniikassa on jo nyt useita erilaisia sovellutuksia viljeltyjen kasvien laadun analysoinnista maa-ainekasojen tilavuuden laskentaan ja edelleen korkeusmalleista orto-oikaistuihin ilmakuvamosaiikkeihin. Käynnissä oleva lainsäädännön uudistus toivottavasti tulee tulevaisuudessakin mahdollistamaan UAS-järjestelmien käytön osana monien eri käyttäjäkuntien tiedonkeruuvälineinä.

Case Nokian Renkaiden perusteella voidaan todeta, että fotogrammisesti lasketun pistepilven korkeustarkkuus avoimessa maastossa on noin 2–3 kertaa pikselikoon verran. Lentosuunnitelman tekeminen ja varsinainen lennättäminen on kohtuullisen helppoa ja nopea omaksua.

Koska UAS-järjestelmien käyttö maanmittaustekniikan sovellutuksissa on uusi ja voimakkaasti kehittyvä tekniikka, siinä on vielä paljon tutkittavaa. Yksi kiinnostavista tutkimuskohteista voisi olla ortokuvan tarkkuus. Signaalien lukumäärän ja sijoittamisen vaikutus tarkkuuteen olisi myös tutkittava. Moniroottorilaitteiden kehittyessä ja yleistyessä myös niiden eri käyttömahdollisuudet ja tarkkuus tiedonkeruussa olisi aiheutta tutkittavaksi. Moniroottorilaitteiden etujahan on mm. parempi kuormankantokyky, mahdollisuus käyttää erilaisia sensoreita ja niiden lennättäminen on mahdollista ahtaammissa paikoissa. Myös Photoscanilla laskettujen orientointiparametrien käytettävyyttä toisissa stereotyöasemasovelluksissa voisi olla mielenkiintoinen tutkimuskohde.

Lennoikkuvaukset Nokialla osoittivat, että UAV-lennokilla kerätyn datan tarkkuus riittää jo moneen maanmittaustekniikan sovellukseen. Oletan UAV-lennokkien käytön lisääntyvän merkittävästi, kunhan tuleva ilmailulainsäädännön uudistus ei sitä estä.

## Lähteet

- 1 UAV Market Set for 10 Years of Growth. 2011. Verkkojulkaisu. Earth Imaging Journal. Earthwide Communications LLC.  
<<http://eijournal.com/uncategorized/uav-market-set-for-10-years>>  
Luettu 15.9.2014.
- 2 Fact Sheet – Unmanned Aircraft Systems (UAS), January 6, 2014. Verkkodokumentti. U.S. Department of Transportation. Federal Aviation Administration.  
<[http://www.faa.gov/news/fact\\_sheets/news\\_story.cfm?newsId=14153](http://www.faa.gov/news/fact_sheets/news_story.cfm?newsId=14153)>  
Luettu 3.4.2014.
- 3 Ailbotix. 2011. Verkkodokumentti. Ailbotix GmbH.  
< <http://www.aibotix.com/mapping.html>>. Luettu 4.2014.
- 4 NATO:n UAV-luokittelu. Verkkojulkaisu. GlobakSecurity.org  
<<http://www.globalsecurity.org/military/world/europe/aircraft-uav-class.htm>>.  
Luettu 2.9.2014.
- 5 Unmanned Aircraft System Operations in UK Airspace - Guidance. 2012. Verkkodokumentti. Civil Aviation Authority.  
<[www.caa.co.uk/docs/33/CAP722.pdf](http://www.caa.co.uk/docs/33/CAP722.pdf)>. 5. painos. 10.8.2012.  
Luettu 11.3.2014.
- 6 Säädökset. 2013. verkkodokumentti. Liikenteen Turvallisuusvirasto Trafi.  
<<http://www.trafi.fi/ilmailu/saadokset>>. Luettu 3.2014.
- 7 Hallituksen esitys eduskunnalle laiksi ilmailulain muuttamisesta. HE 5/2013.
- 8 Hassinen Alpo. 2013. UAV-lennokit. Kokemuksia UAV-laitteista. (PDF) Itä-Suomen yliopisto.
- 9 Laki ilmailulain muuttamisesta. 280/19.4.2013
- 10 Basic principles of Unmanned Aircraft. Verkkodokumentti. Civil Aviation Authority.  
<<http://www.caa.co.uk/default.aspx?catid=1995&pageid=11185>>.  
Luettu 15.3.2014
- 11 Singlet CAM User Manual. Revision 2.2 / November 21, 2011
- 12 Suositukset Suomessa tehtävälle mittaus- ja kartoitusilmakuvaukselle. 1995. Fotogrammetrian ja Kaukokartoituksen Seura ry:n julkaisu 1/1995.
- 13 Schwidersky, Kurt & Ackermann, Friedrich. 1978. Fotogrammetria. Otaniemi. Otakustantamo.

- 14 Canon Ixus 220 HS Tekniset tiedot. 2014. Verkkodokumentti. <[http://www.canon.fi/For\\_Home/Product\\_Finder/Cameras/Digital\\_Camera/IXUS/IXUS\\_220\\_HS/#p-specification](http://www.canon.fi/For_Home/Product_Finder/Cameras/Digital_Camera/IXUS/IXUS_220_HS/#p-specification)>. Luettu 7.3.2013
- 15 Agisoft PhotoScan User Manual. 2014. Verkkodokumentti. Agisoft. [www.agisoft.ru/pdf/photoscan\\_pro\\_1\\_0\\_en.pdf](http://www.agisoft.ru/pdf/photoscan_pro_1_0_en.pdf). Luettu 2.2.2014
- 16 Rönholm / Haggrén. 2005. Fotogrammetrian yleiskurssi. Luentomoniste. Verkkodokumentti. Teknillinen korkeakoulu, Espoo. <[http://foto.hut.fi/opetus/301/luennot/5/5\\_pr2005.html](http://foto.hut.fi/opetus/301/luennot/5/5_pr2005.html)>. Luettu 3.2014.
- 17 JUHTA - Julkisen hallinnon tietohallinnon neuvottelukunta. JHS 154 ETRS89-järjestelmään liittyvät karttaprojektiot, tasokoordinaatistot ja karttalehtijako.
- 18 JUHTA - Julkisen hallinnon tietohallinnon neuvottelukunta. JHS 163 Suomen korkeusjärjestelmä N2000.
- 19 Geoidi. 2014. Verkkodokumentti. Geodeettinen laitos. <http://www.fgi.fi/fgi/fi/teemat/geoidi>. Luettu 3.2014.
- 20 Karttakoordinaatisto. 2014. Verkkodokumentti. Vantaan kaupunki. <[http://www.vantaa.fi/fi/asuminen\\_ja\\_rakentaminen/maanmittauspalvelut/kartat\\_ja\\_ilmakuvat/karttakoordinaatisto](http://www.vantaa.fi/fi/asuminen_ja_rakentaminen/maanmittauspalvelut/kartat_ja_ilmakuvat/karttakoordinaatisto)>. Luettu 11.4.2014
- 21 S6 total station. 2014. Verkkodokumentti. Hydronav. <[http://49.128.56.163/hydronav/index.php?option=com\\_wrapper&view=wrapper&Itemid=58](http://49.128.56.163/hydronav/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=58) **Trimble\_S6.pdf**>
- 22 Lankinen ym. 1992. Maastomittauksen laskentakaavoja. Geodesian ja kartografi-an laboratorion julkaisu 21/1992.
- 23 Häkli ja Koivula. 2005. Reaaliaikaisen GPS-mittauksen laatu. Maanmittaus 80:1-2. s. 22)
- 24 Tolonen Jukka. 2011. Terrestriaalisen laserkeilaimen tosiaikainen orientointi virtuaali-RTK (Real Time Kinematic) – menetelmällä. Diplomityö. Aalto Yliopisto.
- 25 Laurila Pasi. 2012. Mittaus- ja kartoitustekniikan perusteet. 4. painos. Rovaniemi: Rovaniemen ammattikorkeakoulun julkaisusarja D nro 3.
- 26 Vermeer Martin. 16.1.2014. Jyväskylän kaupungin runkoverkon uudelleenmittauksen 1999 geometria. Luentomoniste. Verkkodokumentti. Teknillinen korkeakoulu, Espoo. <[users.tkk.fi/mvermeer/kayt.pdf](http://users.tkk.fi/mvermeer/kayt.pdf)>. Luettu 4.2014.

- 27 Haggrén. 2003. Päivitetty Koistinen 2004. Fotogrammetrian perusteet, luento 4. Verkkodokumentti Teknillinen korkeakoulu, Espoo.  
< <http://foto.hut.fi/opetus/300/luennot/4/4.html>>. Luettu 12.3.2014.
- 28 Honkavaara Eija. 2003. Digitaalisten kuvien laatu. Maanmittaustieteiden Seuran julkaisu 40. Maanmittaustieteiden päivät 2003.
- 29 Haggrén 2002. Päivitetty Honkavaara 2005. Maa-57.220 Fotogrammetrinen karttoitus, luento 2. Verkkodokumentti. Teknillinen korkeakoulu, Espoo.  
< [http://foto.hut.fi/opetus/220/luennot/2/L2\\_2005.pdf](http://foto.hut.fi/opetus/220/luennot/2/L2_2005.pdf)>. Luettu 12.3.2014
- 30 Honkavaara ym. 2011. Digitaalinen kuvaus ja sen mahdollisuudet. The Photogrammetric Journal of Finland, Vol. 22, No. 3.
- 31 J. Vallet ym. 2011. Photogrammetric performance of an ultra light weight Swinglet UAV. Verkkodokumentti. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. ??, ISPRS ICWG I/V UAV-g (unmanned aerial vehicle in geomatics) conference, Zurich, Switzerland.  
< [https://www.sensefly.com/fileadmin/user\\_upload/images/newsandpress/Paper-vallet\\_UAVg.pdf](https://www.sensefly.com/fileadmin/user_upload/images/newsandpress/Paper-vallet_UAVg.pdf)>. Luettu 27.9.2013.
- 32 Laserkeilausaineisto. Laatutiedot. Verkkodokumentti. Maanmittauslaitos.  
<<http://www.maanmittauslaitos.fi/digituotteet/laserkeilausaineisto>>.  
Luettu 12.2.2014.

## PhotoScan-raportti

PhotoScan-sovelluksen automaattinen raportti Nokian Renkaiden prosessoinnista

### Agisoft PhotoScan

Processing Report

19 March 2014





## Survey Data

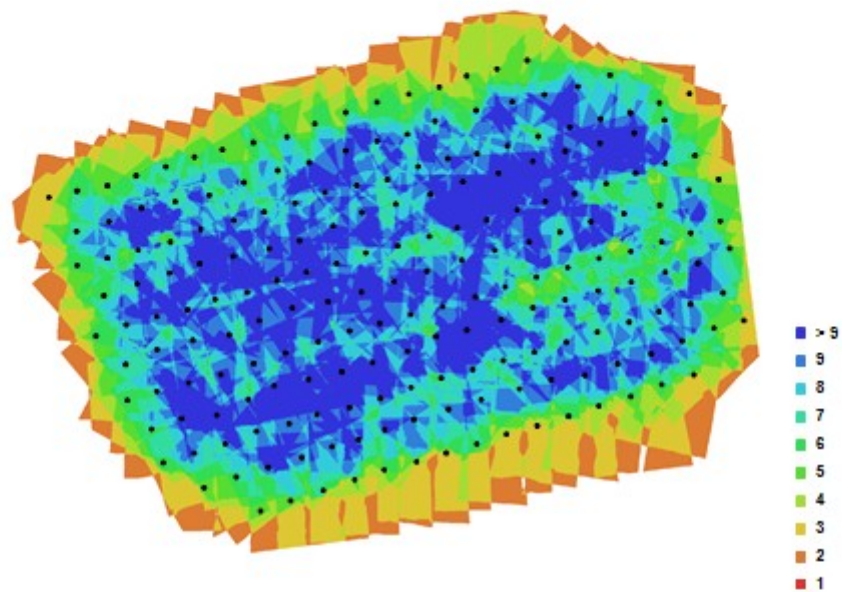


Fig.1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	219	Camera stations:	204
Flying altitude:	126.622 m	Tie-points:	376805
Ground resolution:	0.0396751 m/pix	Projections:	1108975
Coverage area:	0.533205 sq km	Error:	0.618081 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	No

Table.1. Cameras.

## Camera Locations



Fig. 2. Camera locations and error estimates.  
Z error is represented by ellipse color. X, Y errors are represented by ellipse shape.  
Estimated camera locations are marked with a black dot.

X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Total error (m)
2.130224	0.827278	1.348337	2.653348

Table 2. Average camera location error.

## Ground Control Points



Fig.3. GCP.locations.

Label	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
11	0.000014	0.000253	-0.000140	0.000289	10	0.268090
12	-0.000621	-0.000228	0.000006	0.000662	10	0.190826
13	0.000403	0.000085	0.000362	0.000549	7	0.159683
14	0.000519	-0.000142	0.000285	0.000609	8	0.226136
15	-0.000073	-0.000005	-0.000061	0.000095	9	0.055648
Total	0.000406	0.000169	0.000217	0.000490	44	0.196465

Table.3. Control points.

## Digital Elevation Model

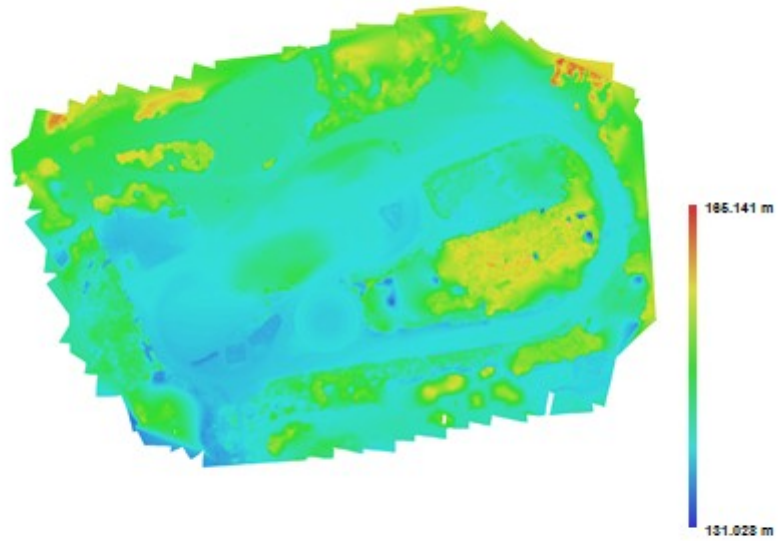


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 0.0794512 m/pix  
Point density: 29.9438 points per sq m

## SenseFly-raportti

Sensefly-pilvipalvelun automaattinen raportti Nokian Renkaiden prosessoinnista

### Postflight Automatic Report\*

September 14, 2012



[www.sensefly.com](http://www.sensefly.com)

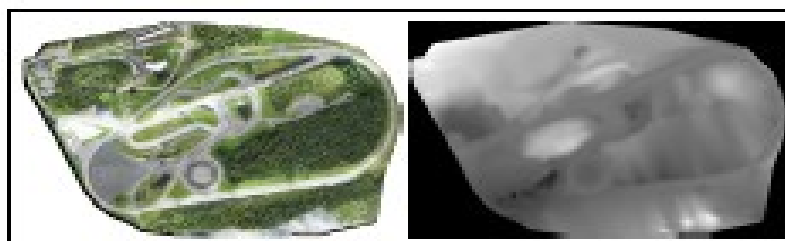


Figure 1: Ortho mosaic (left) and (right) the corresponding digital elevation model (DEM).

---

\*powered by Pix4D (Pix4UAV version v1.12280)

## 1 Overall Quality

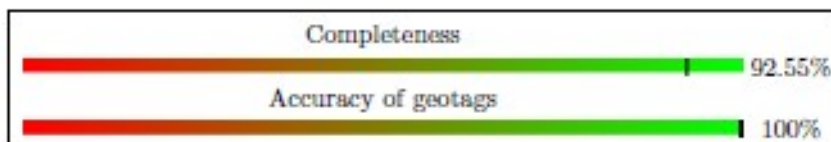


Figure 2: **Quality of the processing.** Completeness refers to the percentage of original images that are included in the final ortho image. A low value might indicate insufficient overlap between the original images. The accuracy of the geotags relates to the quality of the geotags that are associated with each original image (see Figure 7).

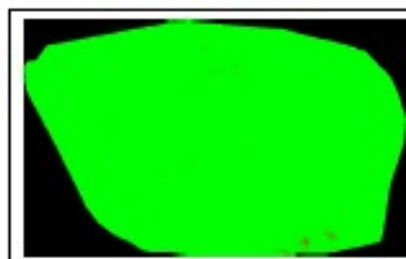


Figure 3: **Quality of the ortho mosaic.** Red indicates areas where the ortho mosaic and the digital elevation model could contain artefacts, e.g. non-linear building edges.

## 2 Original Image Dataset

The dataset contains 219 original images.

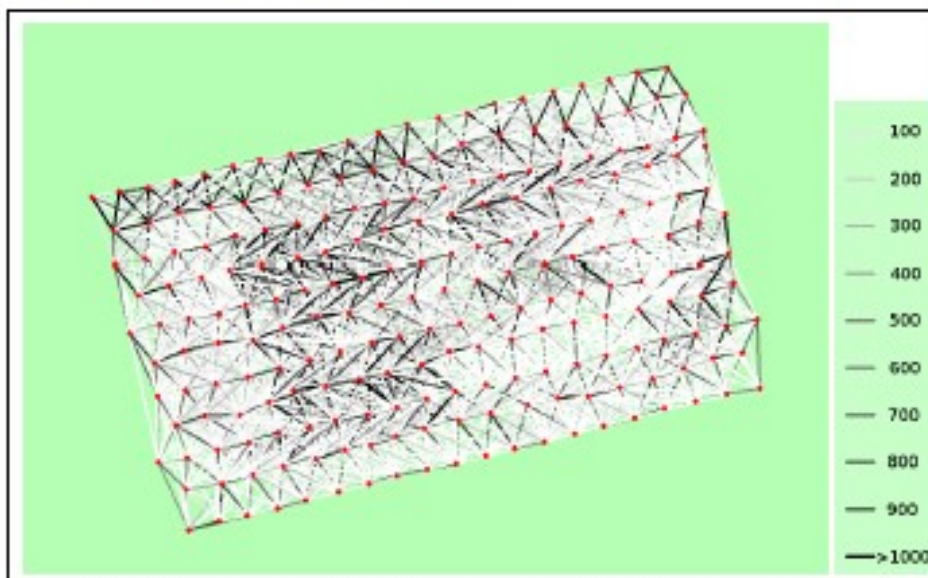


Figure 4: This connectivity graph displays the number of potential keypoint matches (color coded in gray values) between the original images. A high quality result can be obtained if each original image is connected with sufficient matches to the neighbouring images along all directions. The large red dot corresponds to the starting original image. The green line follows the original image geotags over time. Keypoint matches consist of distinct images keypoints that are visible in two images and for which a correspondence could be established.

### 3 Result

The ortho mosaic is composed from 203 out of 219 original images.  
The ortho mosaic covers an area of  $0.38 \text{ km}^2 / 37.81 \text{ ha} / 0.15 \text{ mi}^2$ .  
The mean GSD (size of a pixel on the ground) of the original images is computed at 4.017 cm.

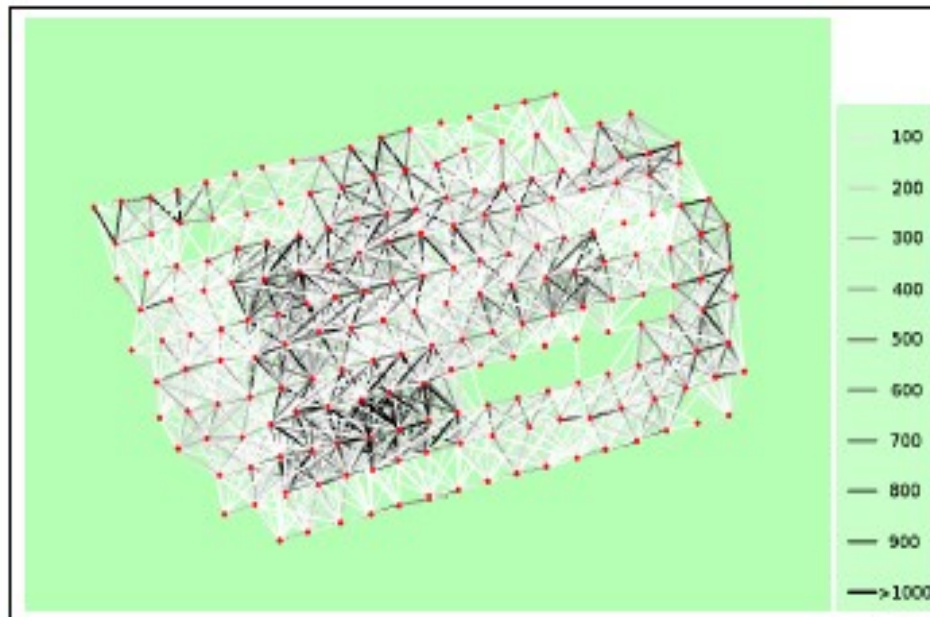


Figure 5: The final connectivity graph displays verified keypoint matches between the original images after bundle block adjustment, which is a global optimisation of the position and orientation of the original images and the digital elevation model.



number of keypoint observations per original image	
median	669
min	55
max	5154
mean	1503.33
number of 3D points observed	
in 2 images	72276
in 3 images	17924
in 4 images	7725
in 5 images	4372
in 6 images	2817
in 7 images	1932
in 8 images	1363
in 9 images	739
in 10 images	408
in 11 images	148
in 12 images	26
in 13 images	7

Table 1: Matching statistics for the bundle block adjustment.

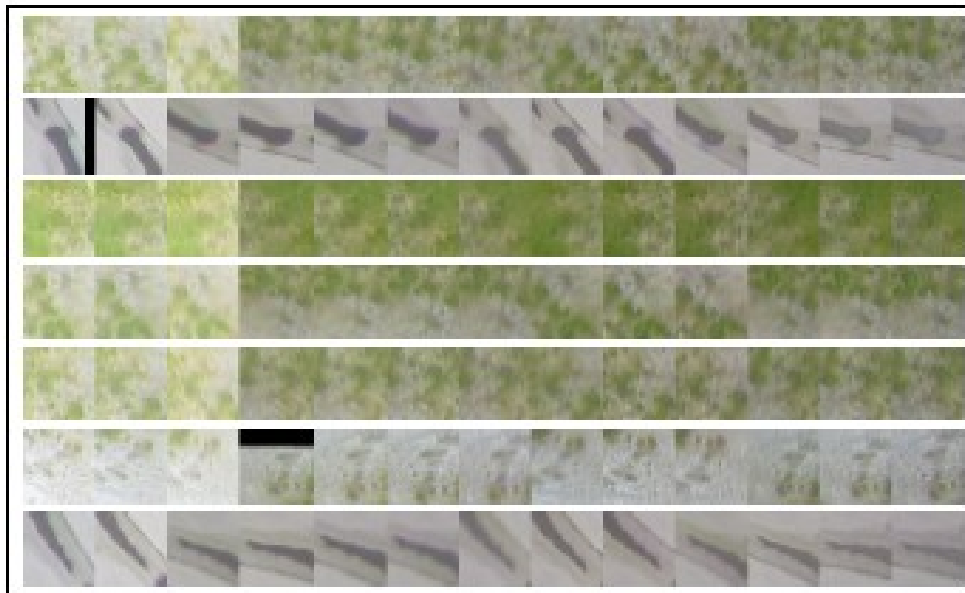


Figure 6: 7 3D point(s) that have been observed in 13 images (last row of Table 1). Each patch is cropped around the projection of these 3-D point(s) in different images.

number total keypoint observations for bundle block adjustment	305176
number total 3D points for bundle block adjustment	109737
mean reprojection error	0 [pixels]

Table 2: Characteristics of bundle block adjustment.

## 4 Georeference

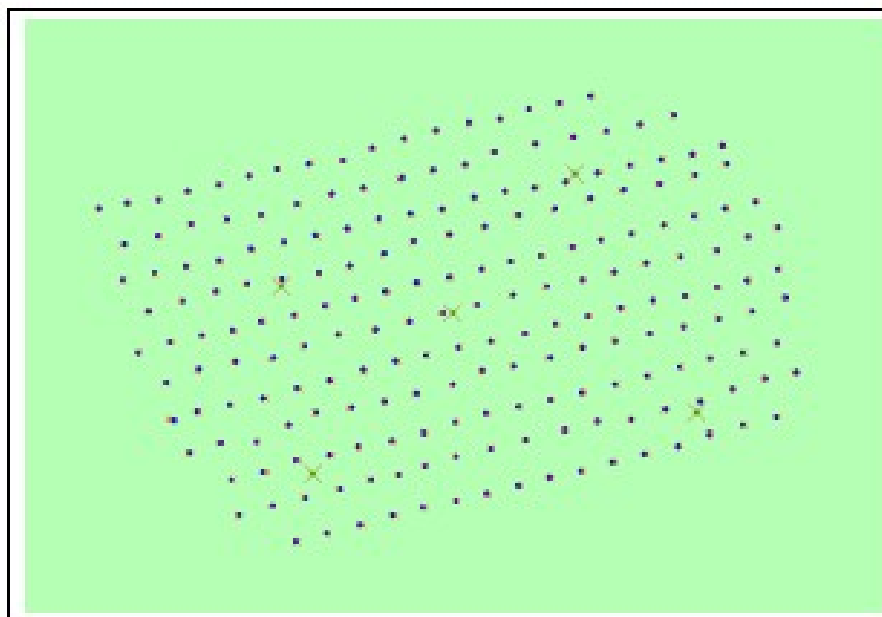


Figure 7: Offset between image GPS tags (small red crosses) and estimated positions of the original images (small blue dots) as well as the offset between the GCP's (large red crosses) and their estimated positions (large green dots) in the horizontal plane.

GCP	error X [m]	error Y [m]	error Z [m]	inliers/visible in
GCP: 15	0.000	0.002	0.007	8/ 8
GCP: 11	0.011	0.029	0.004	8/ 8
GCP: 12	0.003	0.013	0.015	9/ 9
GCP: 13	0.001	0.001	0.029	7/ 7
GCP: 14	0.002	0.004	0.022	6/ 6
mean	0.003	0.010	0.015	
$\sigma$	0.004	0.010	0.009	

Table 3: Localisation accuracy of the individual Ground Control Points (GCP) in metres, their mean error distance and the mean errors in the three coordinate directions. Inliers / nr visible counts the number of images where the GCP has been measured and in how many of them the GCP has been measured correctly (inliers). 0 out of 5 GCP's have been labeled as inaccurate (see Figure 7).

	geotag localisation variance $\sigma$ [m]
longitude direction (x)	1.981
latitude direction (y)	0.714
altitude direction (z)	1.100

Table 4: Localisation accuracy of the geotags in metres. 16 out of 187 original image geotags have been labeled as inaccurate (see Figure 7).

## 5 Internal Camera Paramaters

	Focal [pix]	Px [pix]	Px [pix]	RD 1	RD 2	RD 3	T 1	T 2
init	2839.640	2019.760	1547.000	-0.043	0.026	-0.006	0.001	0.002
opt	2822.022	2005.024	1480.364	-0.037	0.019	-0.002	-0.002	0.001

Table 5: Internal camera paramaters for camera CanonIXUS220HS 4.3 3000x4000.