



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Jukka Haikara

Uudet tekniikat Jyväskylän kaupungin RPAS-toiminnassa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (ylempi AMK)

Maanmittaustekniikka

Opinnäytetyö

26.11.2019

Tekijä Otsikko	Jukka Haikara Uudet tekniikat Jyväskylän kaupungin RPAS-toiminnassa
Sivumäärä Aika	63 sivua + 16 liitettä 26.11.2019
Tutkinto	insinööri (ylempi AMK)
Tutkinto-ohjelma	maanmittaustekniikka
Ohjaajat	kiinteistöinsinööri Juha Kantanen lehtori Ilkka Partonen
<p>Opinnäytetyössä selvitettiin Jyväskylän kaupungin RPAS-laitteeseen hankitun PPK-paikannusratkaisun ja kehitteillä olevan uudenlaisen kahden kameran viistokuvagimbaalin soveltuvuutta nykyaikaisen kaupunkimittauksen tarpeisiin. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää PPK-paikannuksen tarkkuus verrattuna tukipiste paikannukseen sekä viistokuvilta lasketun pistepilven tarkkuus, käyttökelpoisuus ja lisäarvo kaupunkimallinnuksessa.</p> <p>Aiheesta kerättiin teoretietoa alan tutkimuksista ja kirjallisuudesta. Kokeellinen osuus tehtiin vertaamalla RPAS-laitteella tuotettua tutkimusaineistoa referenssimittauksiin, jotka tehtiin skannaavalla takymetrillä. Referenssimittauksissa mitattiin signaloituja tukipisteitä ja skannattiin asfaltin pintaa sekä rakennusten seiniä. RPAS-lentoja suoritettiin neljä, joista kaksi tehtiin viistokuvagimbaalia hyödyntäen. Neljän lennon aineistot prosessoitiin käyttämällä PPK-paikannusratkaisua yhdellä signaloitulla tukipisteellä ja ilman PPK:ta viidellä tukipisteellä.</p> <p>Tutkimuksen tuloksista selvisi, että viistokuvilta laskettu pistepilvi saavutti saman korkeustarkkuuden kuin nadiirikuvilta laskettu pistepilvi. Seiniin muodostui lukumäärällisesti enemmän pisteitä, mutta niiden tarkkuus ei ollut parempi kuin nadiirikuvista lasketuissa pistepilvissä. PPK-paikannus yhdellä tukipisteellä osoittautui tarkaksi ja tehokkaaksi menetelmäksi. Tarkkuus oli yhtä hyvä tai parempi kuin pelkillä tukipisteillä suoritettu laskenta.</p> <p>Viistokuvilta laskettu pistepilvi soveltuu ominaisuuksiensa puolesta hyvin kaupunkimittauksen ja -mallinnuksen lähtöaineistoksi. Toisaalta 15° kallellaan olevat kamerat lisäsivät pisteitä vain seinäpinnoissa eivätkä tuottaneet pisteitä esimerkiksi rakennusten sisennyksiin. Mielenkiintoinen lisätutkimusaihe on pistepilvien tarkkuus ja hyödynnettävyys, jotka on laskettu suuremmilla kallistuskulmilla aina 45°:seen saakka. Lisäksi RPAS-kuvauksista saatujen viistokuvien hyödyntäminen mallinnettujen rakennusten teksturoinnissa olisi mielenkiintoista tutkia.</p>	
Avainsanat	RPAS, PPK, pistepilvi, viistokuva, kaupunkimalli

Author Title	Jukka Haikara New technologies in the City of Jyväskylä RPAS operations
Number of Pages Date	63 pages + 16 appendices 26 November 2019
Degree	Master of Engineering
Degree Programme	Land Surveying
Instructors	Juha Kantanen, Cadastral Surveyor Manager Ilkka Partonen, Senior Lecturer
<p>The aim of final year project was to study the feasibility of post-processed kinematic (PPK) positioning and oblique images in the City of Jyväskylä's city modelling processes in order to compare the accuracy of PPK positioning to using ground control points (GCPs) in positioning images. Additionally, the accuracy, feasibility and benefits of point clouds produced from oblique images were studied.</p> <p>Information was gathered from field related literature and processed point clouds were compared to reference measurements taken with a total station with a scanning feature. Several signal marked GCPs were measured. Asphalt surfaces and building walls were scanned. Four RPAS flights were done. Images were processed with one GCP and PPK positioning and with five GCPs without PPK.</p> <p>The results showed that a point cloud from 15-degree oblique images reached the same height accuracy as a point cloud processed from nadir images. Moreover, PPK positioning with one GCP was shown to be as accurate as five GCP-calculations without PPK, if not better.</p> <p>A point cloud processed from oblique images proved to offer good basic data for modern city modelling purposes. Additionally, oblique cameras at 15 degrees increased the processed points only on walls, they did not reveal significantly more building structures.</p>	
Keywords	RPAS, PPK, pointcloud, oblique image, 3D city model

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Opinnäytetyön tausta	1
1.2	Tutkimusmenetelmä	2
1.3	Tutkimuksen tavoitteet ja tutkimuskysymykset	2
2	RPAS-toiminta kaukokartoituksessa	3
2.1	Käsitteistöä ja luokittelua	3
2.2	Miehittämättömän ilmailun historiaa kaukokartoituksessa	5
2.3	Miehittämättömän ilmailun kehitys	6
2.4	Lainsäädäntö Suomessa	8
2.5	Käyttökohteet kaukokartoituksessa	10
2.6	Sensorit	10
2.7	RPAS-järjestelmän käyttöperiaate	11
3	RPAS-toiminta Jyväskylän kaupungin toiminnoissa	14
3.1	RPAS-toiminnan historia Jyväskylässä	14
3.2	RPAS-laitteisto	14
3.2.1	RPA-nelikopteri	15
3.2.2	Gimbaalit ja kamerat	15
3.2.3	PPK-paikannusmenetelmä	16
3.2.4	PPK-paikannusmenetelmän tarkkuus ja käyttökohteet	18
3.2.5	Ohjelmistot	19
3.3	RPAS-laitteella tuotettavat loppuaineistot	22
3.3.1	Asemakaavan pohjakartta	22
3.3.2	Korkeusmalli	23
3.3.3	3D-kaupunkimalli	24
3.3.4	Asemakaavan pohjakartasta 3D-kaupunkimalliksi	25
3.3.5	Muut aineistot	29
4	Viistokuvaus ja SfM-tekniikka	30
4.1	Viistokuvaus	30
4.2	SfM-tekniikka	33

5	Tutkimuslennot Mannisenmäessä	39
5.1	Referenssimittaukset	39
5.1.1	Runkoverkko	39
5.1.2	Maastomittaukset	40
5.1.3	Signalointi	42
5.2	Tutkimusalue	42
5.3	Esivalmistelut	43
5.4	RPAS-kuvaukset	44
6	Aineistojen käsittely ja vertailu	45
6.1	Aineistojen laskenta	45
6.2	Aineistojen käsittely	48
6.3	Aineistojen vertailut	49
6.3.1	Tasopintojen vertailut	49
6.3.2	Kontrollipisteiden vertailu	50
6.3.3	Seinäpintojen vertailu	51
6.4	Mallintaminen	55
6.5	Teksturointi	55
7	Yhteenveto	57
	Lähteet	59
	Liitteet	
	Liite 1. Pix4D-raportti laskennasta Nadir_α6000_PPK_100	
	Liite 2. Takymetrimittausten orientointiraportit	
	Liite 3. Tasopintojen vertailut	
	Liite 4. Seinäpintojen vertailut	

Lyhenteet

BVLOS	Beyond Visual Line of Sight. Suoran näköyhteyden ulkopuolella
GCP	Ground Control Point. Mitattu tukipiste
GCS	Ground Control Station. Maaohjausyksikkö
GIMBAALI	Kameran ripustuslaite, joka toimii mekaanisena kuvanvakauttajana
GNSS	Global Navigation Satellite System. Globaali satelliittipaikannusjärjestelmä. Yleistermi kaikkien eri toimijoiden satelliittipaikannusjärjestelmille.
GPS	Global Positioning System. USA:n puolustusministeriön kehittämä ja rahoittama maailmanlaajuinen satelliittipaikannusjärjestelmä
HxGN SmartNet	
	Leica Geosystems Oy:n tarjoama GPS-referenssiasemien verkostoon pohjautuva GNSS-korjauspalvelu
PPK	Post Processing Kinematic. Jälkilaskentaan perustuva kinemaattinen paikannus
RPAS	Remotely Piloted Aircraft System. Miehitettömän ilma-aluksen käytön kokonaisjärjestelmä, johon sisältyy kauko-ohjattu ilma-alus, sen kauko-ohjauspaikat, ohjaus- ja seurantayhteydet sekä muut osat
UA	Unmanned Aircraft. Miehitettömän ilma-alus
UAS	Unmanned Aerial System. Miehitettömän ilma-aluksen käytön kokonaisjärjestelmä, johon sisältyy kauko-ohjattu ilma-alus, sen kauko-ohjauspaikat, ohjaus- ja seurantayhteydet sekä muut osat
UAV	Unmanned Aircraft Vehicle. Miehitettömän ilma-alus
VLOS	Visual Line of Sight. Suora näköyhteys RPAS-laitteen ja lennättäjän välillä

1 Johdanto

1.1 Opinnäytetyön tausta

Jyväskylän kaupunki on keskisuuri kaupunki, jossa on noin 140 000 asukasta. Kaupunki kasvaa koko ajan keskimäärin hieman yli 1 000 asukkaan vuosivauhdilla. Jyväskylän kaupunkirakenteen toimialalla työskentelee noin 220 henkilöä. (Väestötilastot 2019.)

Kaupunkirakenne-toimialan kiinteistönmuodostus- ja maastomittausyksikössä tuotetaan erilaisia suunnittelun pohja-aineistoja maankäytön ja rakentamisen suunnittelun tarpeisiin. Tällaisia aineistoja ovat esimerkiksi kaavan pohjakartta, kaupunkimalli, maastomalli, ortokuva ja viistokuva. Aineistoja tuotetaan pääasiassa konsulteilta tilatuista aineistoista, kuten laserkeilausaineistoista ja ortokuvista. Jonkin verran tehdään perinteisiä maastomittauksia, mutta koko ajan laajemmin käytetään RPAS-laitteella kuvattuja kuvia ja niistä fotogrammetrisesti laskettuja pistepilviä.

Kaupunkimallit ovat nousseet voimakkaasti puheenaiheeksi kuntaorganisaatioiden teknisellä puolella viime vuosina. Tietomallit ovat tulleet korvaamaan vanhat menetelmät rakentamisen suunnittelussa. Kaavan pohjakartta kaupunkisuunnittelun lähtöaineistona on jo vuosikymmeniä vanha, ja sitä on myös alettu kehittämään tietomallipohjaiseksi 3D-kaupunkimalliksi. Myös Jyväskylässä asiaan on perehdytty ja ryhdytty toimenpiteisiin. Käytännössä kaupunkimalli tarkoittaa kaavan pohjakartan saattamista täysin kolmiulotteiseksi ja sen esittämistä erilaisissa 3D-sovelluksissa.

Kiinteistönmuodostus- ja maastomittausyksiköllä on ollut RPAS-laite käytössä vuodesta 2015. Laitteella on tehty jo noin 500 lentoa, joista on tuotettu ortokuvia, viistokuvia, maastomalleja ja pistepilviä. Laitteeseen hankittiin PPK (Post Processing Kinematic) -paikannusratkaisu keväällä 2019. Lisäksi käytössä olevaan RPAS-laitteeseen on saatavilla erillinen viistokuvagimbaali, jossa on kaksi järjestelmäkameraa. Kameran kuvaavat viistoon eteen ja taakse lentosuuntaan nähden. Tutkimuksen tavoitteena on tutkimuslentojen avulla selvittää parhaat ja tehokkaimmat toimintamenetelmät PPK-ratkaisulla varustetun RPAS-laitteen käyttöön sekä selvittää viistokuvagimbaalin tuomat mahdolliset hyödyt tulevaisuuden kaupunkimalleja laadittaessa.

1.2 Tutkimusmenetelmä

Tutkimuksessa hankitaan pohjatietoa alan tutkimuksista, säännöksistä ja kirjallisuudesta. Lisäksi selvitetään Jyväskylän kaupungin RPAS-toiminnan nykytila tutustumalla kartoitusprosesseihin. Kokeellinen tutkimus tehdään kuvaamalla erilaisia rakennuksia ja korkeuseroja sisältävä uusi kaupunkialue kaupungin omalla RPAS-laitteella. Tukipisteet ja referenssimittaukset tehdään takymetrimittauksena kaupungin omaa runkoverkkoa hyödyntäen. Alue kuvataan sekä tavallisella yhden kameran gimbaalilla että kahden kameran viistokuvagimbaalilla. Lentojen kuvablokeista laskettuja pistepilviä verrataan toisiinsa sekä tehtyihin takymetrimittauksiin.

1.3 Tutkimuksen tavoitteet ja tutkimuskysymykset

Tavoitteena on selvittää PPK-paikannuksen ja uudenlaisen kahden kameran viistokuvagimbaalin käytön hyödyt ja soveltuvuus kaupungin omassa RPAS-toiminnassa erityisesti kaupunkimallin ylläpitoon liittyvissä prosesseissa. Katto- ja seinäpintojen mittaaminen pistepilviltä on tärkeää, jos halutaan muodostaa tarkat 3D-rakennusmallit.

Tutkimuskysymykset ovat seuraavat:

- Mikä on viistokuvista fotogrammetrisesti tuotetun pistepilven korkeus- ja XY-tarkkuus verrattuna nadiirikuvista tuotettuun pistepilveen?
- Miten tarkasti saadaan seinät kartoitettua käytettäessä viistokuvilta laskettua pistepilveä ja kuinka paljon enemmän kohteita näkyy verrattuna nadiirikuvaukseen?
- Mikä on PPK-paikannuksen tarkkuus verrattuna tukipistepaikannukseen ja säilyykö tarkkuus suurehkoja korkeuseroja käsittävässä maastossa?
- Soveltuvatko tutkimuksessa käytettävät aineistot tulevaisuuden kaupunkimittausaineistojen lähtöaineistoiksi?

2 RPAS-toiminta kaukokartoituksessa

2.1 Käsitteistöä ja luokittelua

UAS (Unmanned Aerial System) -laitteista tunnetaan useita erilaisia nimityksiä ja lyhenteitä, kuten ”UAV” (Unmanned Aerial Vehicle), ilmailurobotti tai yksinkertaisesti vain drooni. Kansainvälinen siviili-ilmailun järjestö ICAO esitteli RPAS (Remotely Piloted Aerial System) -termin Circular 328 -joukkokirjeessä vuonna 2011. RPAS-termi on otettu käyttöön sen vuoksi, että se on paremmin liitettävissä kansainvälisen siviili-ilmailun järjestelmään. (Colomina & Molina 2014: 79.)

UAS-käsitteeseen kaukokartoitusikäytössä kuuluvat miehittämätön ilma-alus (UA), maaohjausyksikkö (GCS), yhteys edellä mainittujen välillä sekä operaatioiden suunnitteluun tarvittava ohjelmisto (Colomina & Molina 2014: 82–83).

RPAS sisältyy laajaan UAS-käsitteeseen, mutta erottuu siinä, että sen avulla voidaan varautua tulevaan pystymällä olemaan osa siviili-ilmailua ja olla kykeneviä kommunikoimaan lennonjohdon sekä muiden ilma-alusten kanssa reaaliajassa (Unmanned Aircraft Systems 2019: 1–8).

Luokittelua UAS-laitteiden välillä voidaan tehdä eri ominaisuuksien mukaan ja on nähty tarpeelliseksi luoda järjestystä alati kasvavaan erilaisten laitteiden joukkoon. Yksi mahdollinen tapa on luokitella laitteen lentävän osan eroja: koko, paino, lentoaika, aerodynamiikka jne. Toinen tapa on luokitella järjestelmän toimintaperiaatteita, kuten operointilaajuutta tai lentokorkeutta. (Colomina & Molina 2014: 81.)

Siviili- ja tiedekäyttöön tehdyt luokittelut mukailevat alun perin sotilaskäyttöön tehtyjä luokitteluja. Taulukossa 1 Watts ym. [2012: 1673] esittävät luokittelun, joka pohjautuu sotilaskäytössä oleviin luokitteluihin. Taulukossa 2 on Naton käyttämä luokittelu, jossa jaotteluperusteina on laitteen paino, operointikorkeus ja operointilaajuus. (Watts ym. 2012: 1673; Strategic Concept of Employment... 2010: 6). Colomina & Molina [2014: 82] esittävät yksinkertaisempaa luokittelua, jossa luokittelu tehtäisiin painon mukaan: micro (alle 5 kg), mini (alle 30 kg) ja tactical (alle 150 kg).

Taulukko 1. UAS-laitteiden jaottelu Watts ym. mukaan (Watts ym. 2012: 1673–1674).

MAV/NAV (Micro/Nano Air Vehicles) (Mikro- ja nanokokoiset ilma-alukset)	Nimi koon mukaan. Alhaiset lentokorkeudet (<330 m). Alhaiset lentoajat n. 5–30 min. Esim. Wasp
VTOL (Vertical Take-Off & Landing) (Pystysuora nouseminen ja laskeutuminen)	Ei tarvitse kiitorataa. Lentokorkeus vaihtelee, yleensä matalammalla. Korkea energiantarve.
LASE (Low Altitude, Short Endurance) (Matala lentokorkeus, lyhyt lennon kesto aika)	Koko n. 2–5 kg. Tarvitsee kiitoradan, laukaisualustan tai lähetetään kädestä. Lentoajat noin 1–2 h. Esim. Raven
LASE Close (Lähellä)	Tarvitsee kiitoradan ja ovat isompia ja painavampia kuin LASE. Lentokorkeus n. 1500 m. Lentoaika useita tunteja.
LALE (Low altitude, Long Endurance) (Alhainen lentokorkeus, pitkä lennon kesto aika)	Isoimpia UAS-laitteita. Kantokyky satoja kiloja. Lentokorkeus muutama tuhat metriä. Esim. Predator A
MALE (Medium altitude, Long Endurance) (Keskiverto lentokorkeus, pitkä lennon kesto aika)	Isompia kuin LALE. Lentokorkeus noin 9 000 m. Operointisäde satoja kilometrejä. Esim. Predator P
HALE (High altitude, Long Endurance) (Korkea lentokorkeus, pitkä lennon kesto aika)	Isoimpia ja monimutkaisimpia UAS-laitteita. Lentokorkeus + 20 000 m. Operointisäde tuhansia kilometrejä. Esim. Global Hawk

Taulukko 2. Naton käyttämä UAV-luokittelu (Strategic Concept of Employment... 2010: 6).

Class	Category	Normal employment	Normal Operating Altitude	Normal Mission Radius	Primary Supported Commander	Example platform
CLASS I (less than 150 kg)	SMALL >20 kg	Tactical Unit (employs launch system)	Up to 5K ft AGL	50 km (LOS)	BN/Regt, BG	Luna, Hermes 90
	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
	MICRO <2 kg	Tactical PI, Sect, Individual (single operator)	Up to 200 ft AGL	5 km (LOS)	PI, Sect	Black Widow
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)	Strike/Combat	Strategic/National	Up to 65,000 ft	Unlimited (BLOS)	Theatre COM	
	HALE	Strategic/National	Up to 65,000 ft	Unlimited (BLOS)	Theatre COM	Global Hawk
	MALE	Operational/Theatre	Up to 45,000 ft MSL	Unlimited (BLOS)	JTF COM	Predator B, Predator A, Heron, Heron TP, Hermes 900

Myös toimintaperiaatteen mukaan voidaan tehdä luokittelua. Eisenbeiss [2009: 34] esittää väitöskirjassaan fotogrammetrisiin käyttötarkoituksiin sopivien UAV-laitteiden luokittelun, jossa erilaiset laitteet on jaoteltu sen mukaan, ovatko ne moottoroituja vai eivät ja ovatko ne ilmaa kevyempiä vai eivät (taulukko 3).

Taulukko 3. Eisenbeissin [2009: 34] esittämä fotogrammetrisiin tarkoituksiin soveltuvien UAV-laitteiden luokittelu.

	Lighter than air	Heavier than air		
		<i>Flexible wing</i>	<i>Fixed wing</i>	<i>Rotary wing</i>
Unpowered	Balloon	Hang glider	Gliders	Rotor-kite
		Paraglider		
		Kites		
Powered	Airship	Paraglider	Propeller	Single rotors
			Jet engines	Coaxial
				Quadrotors
				Multi-rotors

2.2 Miehittämättömän ilmailun historiaa kaukokartoituksessa

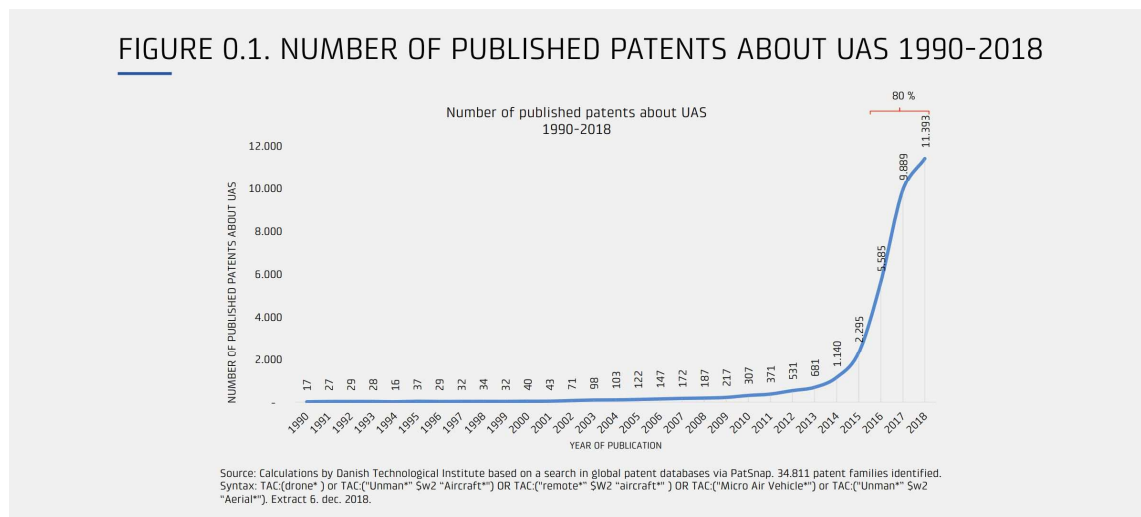
Mahdollisesti varhaisimmat kokeilut miehittämättömän ilmailun kaukokartoituksen saralla tapahtuivat 1800-luvun puolivälissä. Silloin otettiin ilmakuvia Pariisista kameralla, joka oli kiinnitettyä kuumailmapalloon. Vuosisadan lopulla käytettiin esimerkiksi leijoja, kun kameroiden kehittyminen mahdollisti muiden alustojen kokeilemisen. 1900-luvun alussa kaukokartoitusta tehtiin miehitystyistä lentokoneista, kun W. Wright kuvasi liikkuvaa kuvaa itse rakentamastaan lentokoneesta. Sitten ensimmäisen maailmansodan tarpeet lisäsivät nopeasti tarvetta ilmakehän toiminnalle. (Colomina & Molina 2014: 81.)

Ensimmäiset UAS-laitteet kehitettiin vuonna 1916, kun A.M. Low kehitti ”Aerial Target” -laitteensa samaan aikaan Elmer Sperryn ja Peter Hewittin ”Hewitt Sperry automatic airplane” -laitteen kanssa (Colomina & Molina 2014: 80). Vuonna 1979 Przybilla H.J. ja Wester-Ebbinghaus W. suorittivat ensimmäisinä tutkimuksia UAV-laitteella fotogrammetrisessä tarkoituksessa. Tuolloin käytetty kiinteäsiipinen lennokki ei tuonut käyttökelpoisia tuloksia muun muassa koneen roottorin aiheuttaman värinän sekä

liian suuren lentonopeuden takia. Edellä mainituista syistä Przybilla ja Wester-Ebbinghaus ehdottivat siirtymistä helikopterimallisiin UAS-laitteisiin ja aloittivat testit vuonna 1980 saaden aikaan parempia tuloksia. (Eisenbeiss 2004: 2.)

2.3 Miehitämättömän ilmailun kehitys

UAS-laitteet ovat tulleet yhä kasvavassa määrin suosittumiksi viime vuosina, ja niiden teknologian kanssa operoivat löytävät koko ajan käytännöllisempiä ja innovatiivisempia käyttötapoja. Tämä näkyy merkittävässä kasvussa alan tutkimuksessa ja innovoinnissa. UAS-teknologiassa on tapahtunut merkittävää kehittymistä viimeisen vuosikymmenen aikana, mutta erityisesti sitä on tapahtunut viimeisen kahden vuoden aikana. Kun aikaisemmin UAS-sovellutukset olivat rajoittuneet lähinnä sotilaalliseen käyttöön, akateemiseen tutkimukseen ja lennokkiharrastajiin, nyt niitä käytetään laajasti kaupallisissa sovellutuksissa, ja ne ovat löytäneet tiensä myös kuluttajien koteihin. Esimerkiksi Tanskassa kauko-ohjajille myönnettyt sertifikaatit kaksinkertaistuivat noin 14 000:sta noin 28 000:een vuosina 2017–2018. Kuvassa 1 nähdään UAS-teknikkaan liittyvien patenttien määrän merkittävä kasvu vuosina 1990–2018. (Global Trends of Unmanned Aerial Systems 2019: 4–5.)



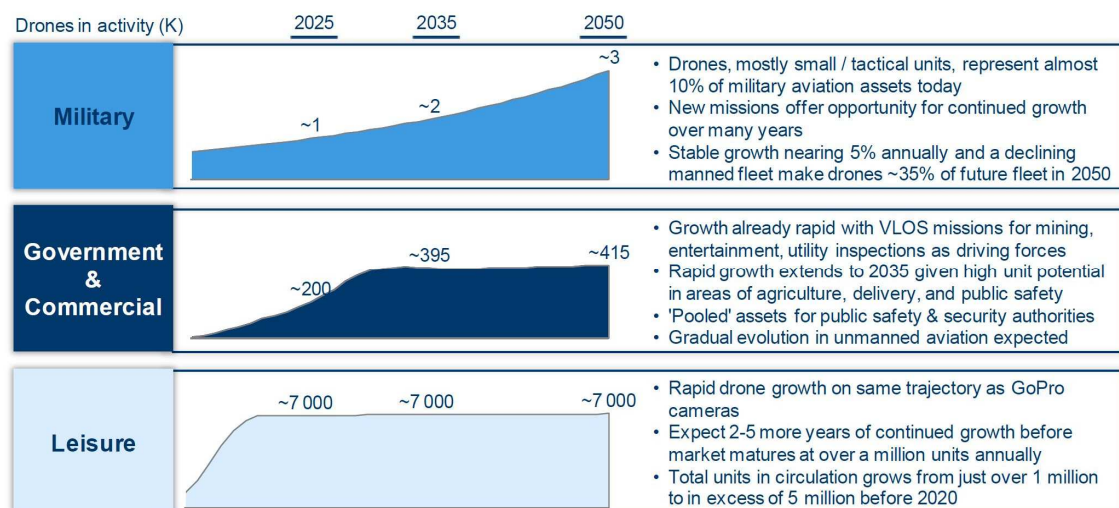
Kuva 1. UAS-teknikkaan liittyvien patenttien määrä 1990–2018 (Global Trends of Unmanned Aerial Systems 2019: 4)

Erilaisia UAS-laitemalleja valmistetaan (vuonna 2018) maakohtaisesti eniten USA:ssa (628 kpl). Toisena on Kiina noin puolet pienemmällä laitemäärällä (309 kpl). Sen jälkeen seuraavat lähinnä Euroopan maat, jotka valmistavat noin sata laitetta tai vähemmän.

Kuitenkin maanosittain Eurooppa on suurin erilaisen UAS-mallien tuottaja (744 kpl) USA:n (673 kpl) ja Kiinan (638 kpl) ollessa lähes samoissa lukemissa. (Global Trends of Unmanned Aerial Systems 2019: 8–9.)

Euroopassa UAV-laitteiden markkinat kehittyvät vielä useita vuosia, kunhan ymmärretään mitä eri sektoreiden ratkaisuja tarvitaan nykypäivänä ja tulevaisuudessa. Potentiaalinen kysyntä on kuitenkin riippuvainen tekniikan kehittämisestä, sääntelystä ja sosiaalisesta hyväksynnästä. Kuvassa 2 esitetään UAV-laitteiden lukumäärän kasvu Euroopassa vuoteen 2050 saakka. Muiden kuin sotilaallisen tai vapaa-ajan käytön UAV-laitteiden lukumäärän odotetaan kasvavan voimakkaasti vuoteen 2035 saakka. (European Drones Outlook Study 2016: 14–17.)

Näköyhteydellä toimivien (VLOS) UAV-laitteiden lukumäärässä odotetaan nopeaa kasvua erityisesti energiasektorin infran tutkimisessa, turvallisuussektorilla, kaivos- ja rakennussektorilla, vakuutussektorilla ja mediasektorilla. SESAR-julkaisussa näiden laitteiden määräksi Euroopassa ennustetaan 100 000 kpl vuonna 2035. Tietyillä sektoreilla kasvun edellytyksenä on lupa toimia myös tiheästi asutuilla alueilla. Näköyhteyden ulkopuolella (BVLOS) toimivien laitteiden kehityksen odotetaan olevan vankkaa ja konkretisoituvan muutaman vuoden sisään. BVLOS-laitteiden määrän ennustetaan olevan VLOS-laitteita melkein kaksi kertaa suurempi (180 000 kpl) vuonna 2035. (European Drones Outlook Study 2016: 20–22.)



Kuva 2. Eri sektoreiden UAV-laitteiden lukumäärän ennuste Euroopassa vuoteen 2050 saakka. (luvut tuhansia) (European Drones Outlook Study 2016: 17).

Traficom kerää tietoa suomalaisista RPAS-toimijoista toimijailmoitusten avulla. Toukokuussa 2019 on ollut 2604 ilmoittautunutta RPAS-toimijaa, joilla on yhteensä 3317 ilma-alusta. 96,4 % laitteista on alle 10 kg painoisia. (RPAS tilastoja 2019.)

2.4 Lainsäädäntö Suomessa

Suomessa siviili-ilmailun turvallisuudesta vastaa 1.1.2019 perustettu Traficom. Traficom syntyi, kun entinen Liikenteen turvallisuusvirasto Trafi, Viestintävirasto ja osa Liikennevirastoa yhdistyivät.

Ilmailulaki 846/2014 on keskeisin kansallinen säädös Suomessa, joka kuvaa miten ilmailua valvotaan, mitä lupia ja hyväksyntöjä Suomessa edellytetään, mitkä ovat lupien ja hyväksyntöjen myöntämiseksi asetetut keskeiset vaatimukset sekä sen, mitä hallinnollisia seuraamuksia niiden rikkomisesta voi seurata. (Suomen ilmailun turvallisuusohjelma 2018: 12.)

Kansainvälisesti ilmailussa noudatettavia linjauksia, periaatteita, standardeja ja suosituksia laatii Kansainvälinen siviili-ilmailujärjestö ICAO. Suomi on sitoutunut ICAO:n yleissopimukseen, jonka liitteiksi lisätään ICAO:ssa jatkuvasti hyväksytyt uudet standardit ja menettelyt. Ne saatetaan voimaan EU:n lainsäädännöllä, Suomen ilmailulailla tai kansallisilla määräyksillä. (Suomen ilmailun turvallisuusohjelma 2018: 6–7.)

Suomessa noudatetaan EU:n ilmailulainsäädäntöä, jonka keskeisin lentoturvallisuutta koskeva EU-säädös on EASA:n (EU:n lentoturvallisuusvirasto) -asetus 2018/1139, joka tuli voimaan 11.9.2018. Asetus antaa EASA:lle valtuudet myös lentoonlähtömassaltaan alle 150 kg painaviin miehittämättömiin ilmailualuksiin. EASA:n jäsenmaita koskevaa kaksi komission asetusta (2019/945 ja 2019/947) julkaistiin 11.6.2019. Asetuksia aletaan pääsääntöisesti soveltamaan 1.7.2020 alkaen. Traficom laatii kansalliset säännökset komission asetusten pohjalta alan toimijoita kuullen. Olennaisesti muuttuvia säännöksiä ovat lentokorkeuden alentaminen 150 metristä 120 metriin, toimijoiden rekisteröityminen sekä toimijoiden kategorisointi sen mukaan, kuinka vaativasta toiminnasta on kyse. (Suomen ilmailun turvallisuusohjelma 2018: 11; Koko EU:n kattavat drone-asetukset on julkistettu 2019.)

2.5 Käyttökohteet kaukokartoituksessa

Pitkään jatkunut RPAS-laitteiden sotilaskäyttö on osoittanut niiden käyttökelpoisuuden ja rohkaissut kokeilemaan laitteita myös monessa eri siviilipuolen sovellutuksessa. Viranomaiskäyttö muulla kuin sotilaallisella puolella on laajentunut koskemaan poliisia, palo- ja pelastustoimea sekä rajaviranomaisia. Maa- ja metsätaloudessa on pitkään hyödynnetty kaukokartoitusta. RPAS-laitteet ovat tuoneet edullisemmin operoitavan vaihtoehdon, joka tuottaa tarkkaa aineistoa laajentuneella sensorivalikoimalla. Maatalouden tuottajat pystyvät tekemään luotettavia päätöksiä, jotka säästävät aikaa ja rahaa. Vahinkojen ja mahdollisten ongelmien havainnointi ja niihin reagointi on nopeaa. Metsätaloudessa voidaan arvioida metsäpalojen puiden tilavuuksia ja puulajeja, joiden perusteella voidaan tehdä metsänhoitosuunnittelua. Metsäpalojen seuranta voidaan myös suorittaa ilmasta käsin kuvaamalla. Perinteisessä maanmittauksessa käyttö on laajaa, ja erilaiset sensorit ovat käytössä. RPAS-laitteilla saaduista valokuvista ja pistepilvistä tehdään erilaisia kartoituksia, tuotetaan ortokuvia, karttoja, maastomalleja ja kaupunkimalleja. Energiasektori käyttää laitteita oman infrastruktuurinsa monitorointiin ja kartoittamiseen. Kulttuuriperinnön tallentamisessa RPAS-laitteista on tullut jo yleistä. Arkeologisten kohteiden ja muinaisten rakennusten 3D-mallinnus on haluttu toimintatapa. Ilmasta voidaan tehdä myös työmaavalvontaa talonrakennus- ja tietyömailla. Lennokilla tehtävässä liikenteen seurannassa voidaan arvioida esimerkiksi matka-aikoja. (Colomina & Molina 2014: 91–93; Study analysing the current... 2007: 6; Remondino ym. 2011: 26.)

2.6 Sensorit

RPAS-laitteisiin on saatavilla erilaisia sensoreita, joilla on eri käyttötarkoituksia. Monet sensoreiden ominaisuudet, kuten tilavuus, paino ja käyttövirta, asettavat kantolaitteelle erilaisia vaatimuksia. Myös sensorin tekniset ominaisuudet asettavat RPAS-laitteille reunaehjoja. Sensoreiden valtavan määrän ja monipuolisuuden takia oikean kantolaitteen ja sensorin yhdistelmän löytäminen on vaikeaa ja monimutkaista. (Colomina & Molina 2014: 86–89.) Colomina & Molina [2014: 86–89] listaavat RPAS-laitteisiin suunniteltuja sensoreita:

- Pienen- ja keskikoon näkyvän aallonpituuden kamerat
- Multispektrikamerat
- Hyperspektrikamerat
- Lämpökamerat
- Laserskannerit
- SAR-tutkat

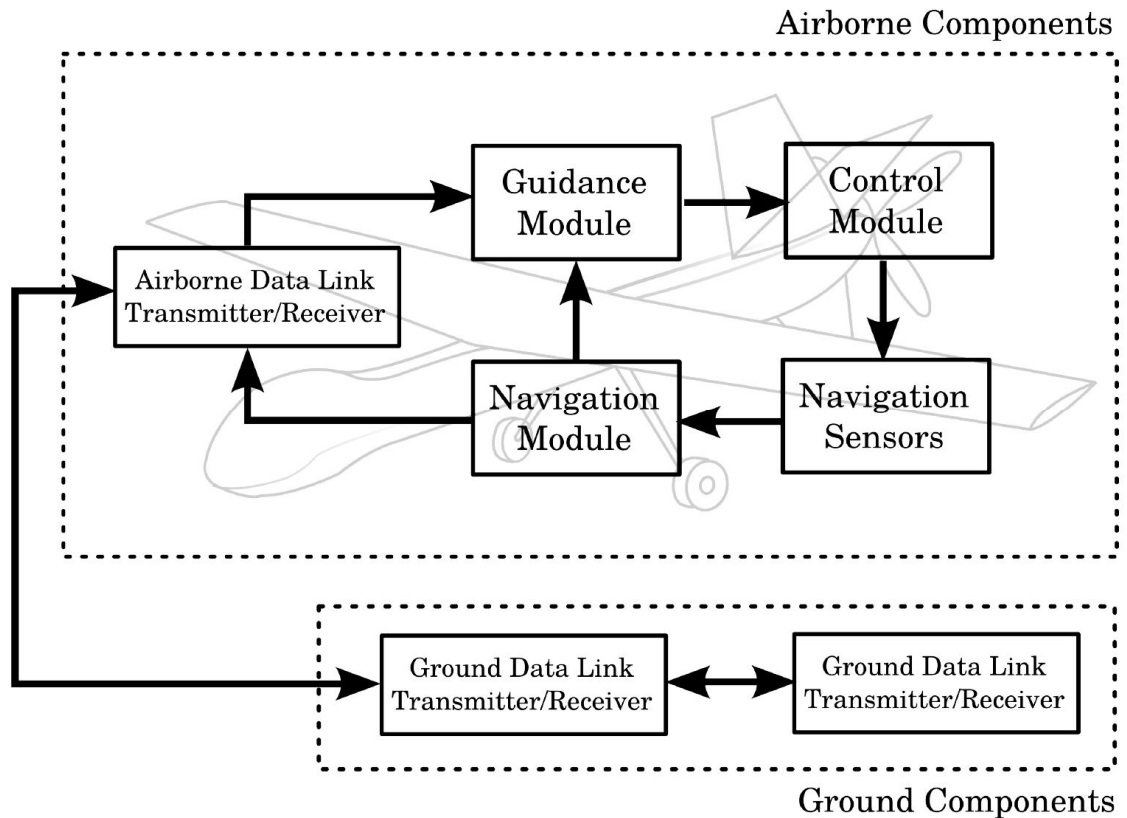
2.7 RPAS-järjestelmän käyttöperiaate

RPAS-laitteistoon kuuluvat kauko-ohjattu ilma-alus (RPA), sen kauko-ohjauspaikat (GCS), ohjaus- ja seurantayhteydet sekä muut osat. Kauko-ohjauspaikka on tavallisesti kuljetettavissa oleva laite, johon asennetulla sovelluksella tarkkaillaan ja ohjataan ilma-alusta. (Colomina & Molina 2014: 82.)

Colominan & Molinan [2014: 82] yleistämä RPAS-laitteisto kaukokartoitustarkoituksessa koostuu lentoonlähöpainoltaan alle 30 kg painavasta kiinteä- tai pyöriväsiipisestä ilma-aluksesta, jonka toiminta-alue on alle 10 km ja lentokorkeus maksimissaan 300 m. Laitteessa on pieni- tai keskikokoinen kamera ja laitetta ohjataan manuaalisesti tai autopilotilla. Autopilotin toiminta perustuu satelliittipaikannukseen (GNSS-vastaanotin) ja inertialaitteiston IMU (Inertial Measurement Unit) toimintaan, joko niin että toimintaa ohjataan pelkällä satelliittipaikannuksella tai näiden yhdistelmällä. (Colomina & Molina 2014: 82.)

Kaukokartoitussovelluksissa RPAS-laitteiden kriittinen osa sensorin ohella on autopilotti eli navigaatio- ja suunnanmäärityskomponentit. Autopilotti on eräänlainen silmukka, jonka eri osat ovat jatkuvassa vuorovaikutuksessa toisiinsa nähden. Silmukka ja sen osat on esitetty kuvassa 4. RPAS-laite tarvitsee sensoreita (Navigation Sensors), joiden antamista tiedoista navigaatiomoduli (Navigation Module) muodostaa arvion laitteen suuntavektorista. Vektori muodostuu yleensä kolmesta sijaintikoordinaatista, kolmesta eri suuntaisesta nopeusvektorista ja 3–9 parametrasta, jotka kertovat laitteen asennosta. Ohjausyksikkö (Guidance Modul) muodostaa tarvittavat ohjauskomennot hallintayksikölle (Control Module) suuntavektorista ja vastaanottimen kautta laitteen ohjaajalta tulleiden käskyjen yhdistelmänä. Ohjausyksiköllä voi olla myös tieto ennakkoon suunnitellusta lentoradasta, mikä on yleensä tilanne kaukokartoitustehtävissä. RPAS-laitteen hallintayksikkö lopulta ohjaa ilma-aluksen

lentoon vaikuttavia osia, kuten kiinteäsiipisen ilma-aluksen tapauksessa siivekkeitä, korkeusperäsintä ja moottoritehoa sekä nelikoptereissa roottoreiden tehoa. Sensorit havaitsevat muuttuneen tilanteen, ja kierto alkaa taas alusta. (Elkaim ym. 2014: 2–4; Colomina & Molina 2014: 84.)



Kuva 4. UAS-laitteen ohjausjärjestelmän periaate (Elkaim ym. 2014: 2).

Kartoituslennon lopputulokseen vaikuttavat useat eri muuttujat. Taulukossa 4 Seifert ym. [2019: 3] esittävät eri parametrien vaikutuksen lopputulokseen. Laatu- ja tehokkuusparametrit ovat tavoitemuuttujia. Sisemmässä ruudussa ovat loput parametrit, joihin lennon suunnittelija voi suoraan vaikuttaa sekä näiden johdannaiset.

Taulukko 4. RPAS-lennon eri parametrit (Seifert ym. 2019: 3).

Laatuparametrit	Yksityiskohdat	Tarkkuus	
Sensoriparametrit	Sensorin resoluutio	Polttoväli/kuvauskulma	Valotusaika/kuvanottoväli
Lentoparametrit	Lentokorkeus	Kuvien päällekkäisyys	Lentonopeus
Kuvaparametrit	Maastopixelikoko	Kuvien määrä	
Tehokkuusparametrit	Lentoaika	Kuvien prosessointiaika	

3 RPAS-toiminta Jyväskylän kaupungin toiminnoissa

3.1 RPAS-toiminnan historia Jyväskylässä

RPAS-toiminta käynnistyi Jyväskylän kaupungin kiinteistönmuodostus- ja maastomittausyksikössä vuonna 2013 laite-esittelijöiden demojen muodossa. Silloin selvitettiin laitteiden ominaisuuksia ja eroja sekä muodostettiin käsitystä kaupungin kartoitustarpeisiin soveltuvasta laitteesta. Oma laite hankittiin vuonna 2015, ja valinta kohdistui VideoDrone Oy:n tarjoamaan nelikopteriin. Laite oli silloin nimeltään VideoDrone X4S v1. Käytännön kuvaustoiminta aloitettiin huhtikuussa 2015. Toiminta oli alusta alkaen tiivistä. Ensimmäisenä vuonna lennettiin jo noin 100 kuvauslentoa. Eniten lentoja on viime vuosina lennetty vuonna 2017, jolloin tehtiin yhteensä noin 160 kuvauslentoa.

3.2 RPAS-laitteisto

Hankittaessa RPAS-laitetta kokonaisuuteen kuului nelikopteri, kamerateline, kamera, radio-ohjain, akut, laturi, datalinkki, lennonsuunnitteluohjelmisto, työkalusetti ja alumiininen kuljetussalkku. Kamera oli Sony $\alpha 6000$ 20mm:n kiinteällä objektiivilla, ja se oli kiinnitettynä kiinteään ortokuvaustelineeseen. Lisäksi hankittiin kannettava tietokone, jolla tehdään lentojen suunnittelu, lennonaikainen seuranta sekä aineistojen purku. Tietokoneelle asetettiin kriteeriksi maastokelpoisuus ja näytön kirkkauden soveltuvuus ulkokäyttöön. Sopivaksi katsottiin Panasonic Toughbook CF-54, jossa näytön kirkkaus on kirkkaimmillaan $1\,000\text{ cd/m}^2$.

VideoDrone Oy on kotimainen ammattikäyttöön tarkoitettujen multikoptereiden valmistaja, joiden laitteilla voidaan tehdä teknistä ilmakehää. VideoDrone Oy:n laitteissa maastokelpoisuuden ja ilma-alueen välinen yhteys toteutetaan datalinkilla. Ilma-alueen manuaalinen ohjaus suoritetaan radiokauko-ohjaimen välityksellä, ja lisäksi on mahdollista varustaa ohjain monitorilla, johon kuva tulee nelikopterin kamerasta videolinkin avulla. (Mikkola 2019.)

3.2.1 RPA-nelikopteri

Nelikopteri, joka hankittiin, oli ensimmäinen VideoDrone Oy:n valmistama hiilikuiturunkoinen nelikopterimalli (versio 1). Laitetta on päivitetty vuosien saatossa muun muassa akkujen, moottorien, propellien, kameran, gimbaalin ja ohjelmiston osalta. Laitteeseen hankittiin vuonna 2019 PPK-paikannusjärjestelmä. Laite vastaa nykyään lähes täysin kuvassa 5 esitettyä GeoDrone X4L v4 -mallia (Mikkola 2019). Tällä hetkellä laitteessa käytetään lennon aikana yhtä 16 Ah LiPo (litiumpolymeeri) -akkua, joka mahdollistaa noin 30 min:n turvallisen lentoajan normaalissa kartoitustoiminnassa.



Kuva 5. GeoDrone X4L (GeoDrone X4L 2019).

3.2.2 Gimbaalit ja kamerat

Aluksi Jyväskylän kaupungin RPAS-laitteessa oli ortokuvagimbaali, jossa kamera on kiinnitettynä osoittamaan suoraan alaspäin. Vuonna 2016 nelikopteria päivitettiin servomoottoreilla varustetulla gimbaalilla, jolla kameran asentoa voidaan ohjata lennon aikana. Gimbaali ja lisäksi hankitut monitori sekä videolinkki mahdollistivat videokuvauksen sekä viestikuvausten tekemisen. Alkuperäinen kamera Sony α6000 päivitettiin Sony RX1R II:een vuonna 2017. Sony RX1R II:n etuina Sony α6000:een verrattuna ovat muun muassa täyden koon CMOS-kenno, Carl Zeiss Sonnar 35 mm / F2 optiikka ja isompi pikselimäärä 42,4 Mpx (Hyötykuormat 2019).

Keväällä 2019 saimme testattavaksi VideoDrone Oy:ltä kehitysversion kahden kameran viistokuvagimbaalista. Gimbaalissa on kaksi Sony α6000 -kameraa toisistaan nähden 30 asteen kulmaan asetettuina (kuva 6). Kamerat osoittavat lentolinjaan nähden eteen- ja taaksepäin. Tavoitteena on saada enemmän kohteita näkymään kuville ja vähentää lentolinjoja ja siten työskentelyaikaa maastossa. Vakautus on toteutettu kaksiosaisena siten, että moottorien aiheuttama värinä ja nelikopterin heilahdukset ovat erikseen huomioituna. Heilahdukset vaimentuvat passiivisella vakautuksella, jossa maan vetovoima pitää gimbaalin suoraan alaspäin. Nelikopterin heilahtaessa gimbaali pääsee kääntymään vaimennettujen akseleiden varassa. Nopeassa heilahduksessa gimbaali heilahtaa jonkin verran mukana, mutta esimerkiksi nelikopterin lentäessä tuulen takia kallellaan, osoittaa gimbaali suoraan alaspäin. Gimbaali painaa kahden Sony α6000 -kameran kanssa yhteensä noin 1,2 kg. (Mikkola 2019.)



Kuva 6. Tutkimuksessa käytetty kahden Sony α6000 -kameran viistokuvagimbaali.

3.2.3 PPK-paikannusmenetelmä

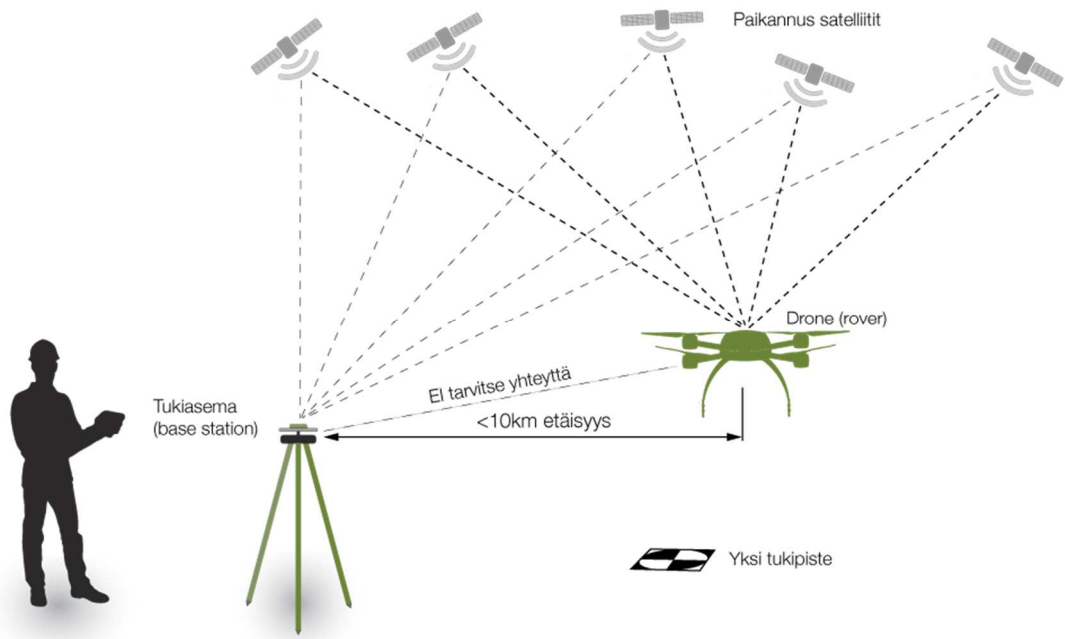
PPK-paikannuksessa RPAS-laitteessa oleva vastaanotin ottaa vastaan ja tallentaa GNSS-signaaleja. Vastaanotin näkyy kuvassa 7 valkoisena ulokkeena GeoDrone-nelikopterin kopassa. Lennon jälkeen hankitaan lennonaikaiset GNSS-havainnot RINEX-formaatissa jälkilaskentaa varten. Senttimetrin tarkat kuvanottoapaikat voidaan laskea jälkeen päin lentoradalta, koska tiedetään, minä ajankohtana kuva on otettu. Jyväskylän kaupungilla lennonaikaiset GNSS-tiedot tilataan Leica Geosystems Oy:n HxGN SmartNet -latauspalvelusta. HxGN SmartNet -palvelu on kansainvälinen kiinteisiin tukiasemiin perustuva GNSS-korjauspalvelu. Yksi tukiasemista sijaitsee Jyväskylässä Rakentajatalon katolla, ja sen tallentamaa dataa käytetään kaupungin PPK-jälkilaskennoissa. Latauspalvelussa voidaan latausta tehtäessä määrittää

esimerkiksi RINEX-datan tallennusväli, tallennusaika ja tallentava tukiasema. (HxGN SmartNet 2019.) Tarkka lentorata lasketaan Jyväskylän kaupungin tapauksessa VideoDrone RTK Post -ohjelmalla.



Kuva 7. GeoDrone X4L -laitteen PPK-vastaanottimella varustettu koppa (GeoDrone X4L 2019).

VideoDronen PPK-ratkaisussa laite tallentaa koko lentoradan ajan sijaintia 5 Hz:n taajuudella eli 0,2 sekunnin välein. Mittauksien välinen sijainti lasketaan interpoloimalla. Vastaanotin ottaa vastaan signaalia GPS- ja GLONASS-satelliiteista (kuva 8). RPAS-laitteen lentotoiminnassa PPK:lla varustetun laitteen erona tavanomaiseen on muutaman minuutin paikallaan odottelu ennen ja jälkeen lennon. Näillä toimenpiteillä varmistetaan paikannuksen onnistuminen. (Mikkola 2019.) Muita paikannusvaihtoehtoja RPAS-toiminnassa ovat suora paikannus esimerkiksi RPA-laitteen tai kameran GPS-vastaanottimella, RTK-paikannus sekä tukipisteiden käyttö. (Do RTK/PPK drones give you better results than GCPs? 2017.)



Kuva 8. PPK-paikannusmenetelmän toimintaperiaate (GeoDrone X4L 2019).

3.2.4 PPK-paikannusmenetelmän tarkkuus ja käyttökohteet

Zhang ym. [2019: 14] vertailivat tutkimuksessaan PPK-menetelmällä ja tukipisteillä laskettujen aineistojen tarkkuutta. Tutkimuksessa lennettiin koelennot kahdella eri kameralla noin 45 metrin korkeudelta. Tuloksena havaittiin, että PPK-menetelmällä lasketut aineistot saavuttivat saman tarkkuuden, kuin tukipisteillä lasketut aineistot. Lisäksi he havaitsivat, että kameras ominaisuuksilla, kuten polttovälillä, resoluutiolla ja kennon laadulla, oli suuri vaikutus lopulliseen tarkkuuteen. (Zhang ym. 2019: 14.)

Tukipisteiden käyttö RPAS-kuvauksissa tuottaa luotettavaa paikannusta. Tarkkuus on kuitenkin riippuvainen tukipisteiden lukumäärästä ja niiden sijoittelusta. Oikeanlainen tukipisteiden käyttö lisää työaikaa ja kustannuksia. PPK-paikannus mahdollistaa tehokkaamman työskentelyn, kun aikaa ei mene vaadittavien tukipisteiden rakentamiseen. Suosituksena on vähintään yhden tukipisteen käyttäminen, jotta GPS:n mahdolliset häiriöt voidaan sulkea pois. (Zhang ym. 2019: 11.)

Ohjelmistoyritys Pix4D omassa kaupunkialueella tehdyssä tutkimuksessaan vertaili RTK-paikannuksen, PPK-paikannuksen ja tukipistepaikannuksen tarkkuutta. Hyvin sijoitetut tukipisteet toivat paremman korkeustarkkuuden prosessoidussa pistepilvessä noin 100 metrin korkeudesta tehdyillä koelennoilla (korkeuden keskivirhe 0.048 m) kuin

PPK-paikannus (0.067 m). (Do RTK/PPK drones give you better results than GCPs? 2017.)

Erityisen hyödyllistä on käyttää PPK-menetelmää alueilla, joissa on tiheää kasvillisuutta, maataloutta tai alueita, joissa on vähän laskentaan vaadittavia yksityiskohtia. On myös alueita, joihin ei pääse mittaamaan tukipisteitä alueen herkkyyden tai vaarallisuuden takia. (Do RTK/PPK drones give you better results than GCPs? 2017.)

PPK-menetelmällä tehty pistepilven prosessointi ei saavuta yhtä hyvää korkeustarkkuutta kuin hyvin sijoitelluilla tukipisteillä tehty laskenta. Korkeusvirheeseen johtavat hyvin pienetkin muutokset kameran optiikassa, kuten jatkuva tarkennus ja polttovälin muuttuminen lämpötilan muutoksen seurauksena. Suosituksena on käyttää yhtä tukipistettä keskellä aluetta varmistamaan aineiston korkeustarkkuus. On kuitenkin käyttötarkoituksia, joissa absoluuttinen korkeustarkkuus ei ole välttämättä niin olennainen seikka. Tällaisia kuvauksia voivat olla esimerkiksi massalaskennat ja metsäkuvaukset. PPK-menetelmän merkittävin etu verrattuna tukipisteillä toteutettuun projektiin on hyvin tasalaatuinen mittatarkkuus koko projektin alalla. (Mikkola 2019.)

3.2.5 Ohjelmistot

RPAS-laitteella tuotetun lopputuotteen valmistumisessa käytetään Jyväskylän kaupungilla useita eri ohjelmia.

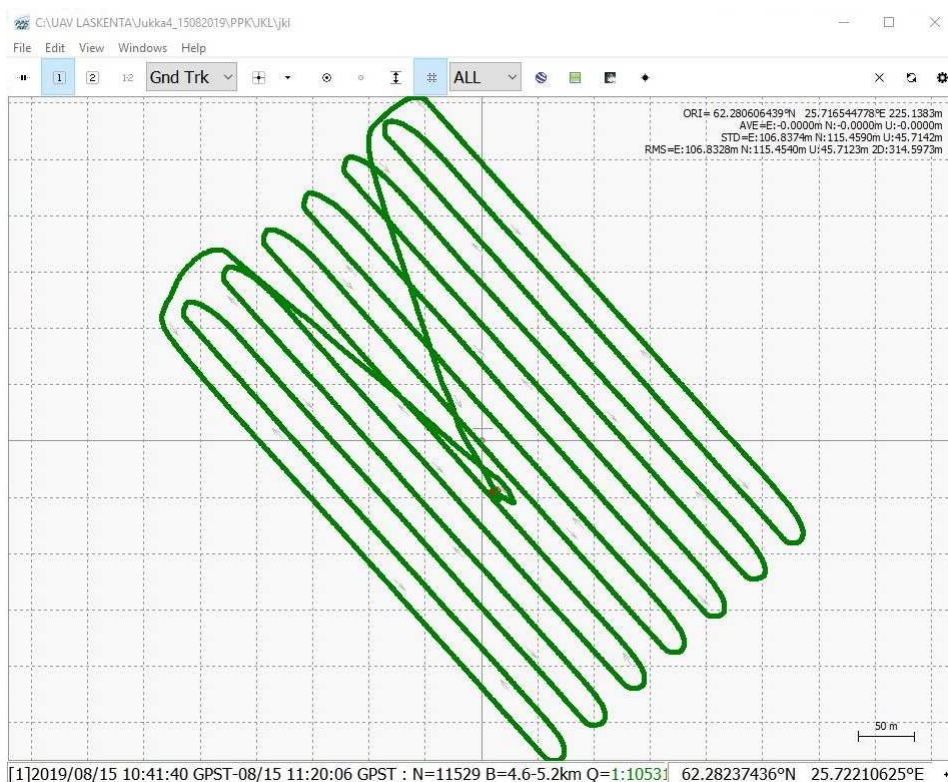
VideoDrone Ground Station

Lennon suunnittelu ja lennonaikainen seuranta tehdään VideoDrone Ground Station -ohjelmalla. Käytettävä karttapohja voi olla ohjelman oma karttapohja tai ohjelmaan käyttäjän itse lataama. Ohjelmassa suunnittelu aloitetaan määrittämällä kotipiste kuvattavan alueen lähelle, mistä lentoa on tarkoitus lähteä suorittamaan sekä ensimmäinen reittipiste. Tämän jälkeen määritetään kuvattava alue. Yleensä kartoitettava alue on suoraraiteen muotoinen, mutta alue voi olla lähes minkä muotoinen tahansa. Myös yksittäisiä lentolinjoja voidaan määrittää ja esimerkiksi masto voidaan kuvata ympyrän muotoisella lentolinjalla. Kun alue on määritetty, annetaan lentoon liittyviä tietoja kuten peittoasteet, lentonopeus, kuvaottoväli ja lentokorkeuden määrittävä maastopikselin koko (GSD). Näiden tietojen jälkeen ohjelma näyttää lentolinjat kartalla. Lopuksi määritetään paluupiste, johon RPAS-laite palaa lennon jälkeen leijumaan.

Suosituksena on lisätä tapauskohtaisesti ensimmäisen reittipisteen jälkeen toinen reittipiste ennen tehtävää siten, että lennokille ei tule turhaan liian jyrkkiä kulmia lentorataan. Sama voidaan tehdä myös ennen paluupistettä. Lisätyt reittipisteet ovat havaittavissa kuvassa 9. Kun suunnitelma on valmis, se tallennetaan ja annetaan käskynä RPA-laitteelle lentoon lähetettäessä. Korkeusmallina ohjelma käyttää Maanmittauslaitoksen 10 m:n korkeusmallia, jonka mukaan lentolinjat sovitetaan maaston mukaisiksi. Uusimmassa versiossa ohjelmaan on mahdollista lisätä oma tarkempi korkeusmalli. Reittipisteiden kasvaneen lukumäärän takia lentolinjat noudattavat maaston muotoja entistä huomattavasti tarkemmin.

VideoDrone RTK Post ja VideoDrone RTK Plot

RTK Post -ohjelmalla tehdään kuvanotosijaintien laskenta, mikäli lennolla on käytetty PPK-paikannusta. Ohjelmaan syötetään RPAS-laitteesta saatu lentoratatieto ja latauspalvelusta ladattu lennonaikainen RINEX-tiedosto. Laskennan jälkeen lopputuloksia voidaan tarkastella RTK Plot -ohjelmalla (kuva 9).



Kuva 9. Ruutukaappaus RTK Plot -ohjelmasta. Onnistuneesti suoritettu PPK-jälkilaskenta.

Pix4D

Aineistot puretaan ja ladataan Pix4D-ohjelmaan. Pix4D on SfM (Structure from Motion) -tekniikkaa hyödyntävä laskentaohjelma. Tekniikkaa selvitetään luvussa 4.2. Ohjelmassa perustetaan projekti, syötetään kuva-aineistot sekä kuvien sijaintitiedot. Jos käytetyn kameran kalibrointitiedot on laskettu aiemmin, voidaan ne syöttää ohjelmaan tässä vaiheessa. Muuten valitaan käytetty kamera valikosta, jonka kalibroinnin oletusarvoja ohjelma optimoi myöhemmin. Seuraavaksi määritellään mahdollisten tukipisteiden ja laskennan lopputuotteiden koordinaattijärjestelmä. Tukipisteet tuodaan projektiin ennen prosessointia ja osoitetaan kuvilta pisteiden sijainnit. Varsinainen prosessointi on kolmivaiheinen: 1. alkuprosessointi, 2. pistepilvi ja mesh-malli, 3. pintamalli, ortokuva ja raportti. Alkuprosessoinnissa ohjelma etsii kuvilta yhteisiä pisteitä, suorittaa tukipisteitä hyödyntäen sädekimpputasoituksen, ratkaisee kamerakalibroinnit sekä kuvanottosijainnit ja -suunnat. Alkuprosessoinnin raportista voidaan varmistua, että kaikki kuvat ovat kiinnittyneet toisiinsa, kuvablokissa ei ole reikiä tai vääristymiä ja että haluttu koordinaattijärjestelmä on sama kuin tukipisteillä. Jos raportissa ei ole havaittavissa liiallisia virheitä, voidaan suorittaa vaiheet 2 ja 3.

MicroStation Connect ja Terra-sovellukset

Valmiit pistepilvet ja ortokuvat viedään MicroStation Connect -ohjelmaan, jonka päällä toimivat suomalaisen Terrasolid Oy:n TerraScan-, TerraModeler- ja TerraPhoto-sovellukset. MicroStation Connect on yhdysvaltalaisen Bentley Systemsin kehittämä CAD-ohjelmisto. Terra-sovelluksilla tehdään pistepilven luokittelua ja luodaan maastomallit. Tuotettuja aineistoja ja ortokuvaa hyödyntämällä voidaan tehdä esimerkiksi kaavan pohjakartan kartoittamista tai rakennusten mallintamista.

Trimble Locus

Lopuksi valmis aineisto tallennetaan Trimble Locus -paikkatietokantaan. Trimble Locus on suomalaisen Tekla Oyj:n kehittämä paikkatieto-ohjelmisto kuntien tekniselle sektorille. Trimble Finland Oyj osti Tekla Oyj:n vuonna 2011. Kaavan pohjakartan kartoittamista voidaan tehdä myös Locuksessa, koska ohjelmistoon voidaan viedä RPAS-laitteella tuotetut ortokuvat ja maastomallit.

3.3 RPAS-laitteella tuotettavat loppuaineistot

Jyväskylän kaupungin kiinteistönmuodostus- ja maastomittausyksikössä RPAS-laite otettiin tehokkaaseen hyötykäyttöön heti alusta alkaen. Tavoitteena oli saada nopea ja joustava lopputuotteiden lähtöaineistojen tuotantoväline. Koko kaupungin ilmakuvaukseen tehdään kolmen vuoden välein ja edellinen laserkeilaus on teetetty vuonna 2016. Kolmen vuoden aikana ehtii syntyä useita eri kokoisia kartoitettavia alueita, joista lähtöaineistoa ei ole saatavilla. Tähän tarkoitukseen hankittu RPAS-laite on täyttänyt tavoitteensa erittäin hyvin. Tärkeimpänä käyttötarkoituksena RPAS-laitteella tehdyistä kuvauksista tuotetaan uutta ja ylläpidetään asemakaavan pohjakarttaa. Sen lisäksi tehdään ortokuvia, maastomalleja, visuaalisia malleja ja viistokuvia.

3.3.1 Asemakaavan pohjakartta

Kaupunkisuunnittelun pohja-aineistoista olennaisin on kaavan pohjakartta. Sen laatimista, sisältöä, esittämistä ja tarkastamista määrittelee Julkisen hallinnon tietohallinnon neuvottelukunnan (JUHTA) suositus ”JHS 185 Asemakaavan pohjakartan laatiminen”. Kaavan pohjakartasta ja kaavoitusmittauksista säädetään maankäyttö- ja rakennuslaissa (132/1999) ja maankäyttö ja rakennusasetuksessa (895/1999). Kantakartasta löytyvät kaikki olennaiset kaupunkisuunnittelun vaatimat kohteet, kuten kiinteistöjaotus, rakennukset, korkeustiedot, liikenneväylät ja maastokuviot. (JHS 185 2014.) JHS 185:ssä laadittavat pohjakartat on jaoteltu erilaisten kartoitusalueiden mukaisiin mittausluokkiin, jotka määrittävät kartan tarkkuuden ja mittakaavan (taulukko 5).

Taulukko 5. JHS 185:n kaavan pohjakartan kartoitusalueiden mukainen jaottelu (JHS 185 2014: 4–5)

	Kartoitusalue	Mittakaava
Mittausluokka 1, 1e	Taajama-alue, arvokas maa-alue, sitovan tonttijaon asemakaava-alue, 1e suurta tarkkuutta edellyttävä suunnittelu	1:500 / 1:1000
Mittausluokka 2	Taajama-alue, ei sitovan tonttijaon asemakaava-alue	1:1000 / 1:2000
Mittausluokka 3	Ranta-asekaava, haja-asutusalueet, maa-alueita selvästi arvokkaampaa	1:2000 (1:4000 ja 1:5000 mahdollinen)

Jyväskylän kaupungilla lähes kaikki kaavan pohjakartan kartoitukset tehdään mittausluokassa 1e ja esitetään mittakaavassa 1:500. Pääosin kartan tuottaminen tehdään laserkeilausaineistoja ja ortokuvia hyödyntämällä. Haja-asutusalueilla sekä ranta-asemakaavoja varten tehdyt kartoitukset sijoittuvat mittausluokkaan 1 tai 2 johtuen epätarkemmista lähtöaineistoista. Niissä yleensä käytetään Maanmittauslaitokselta vapaasti ladattavia ortokuva- ja laserkeilausaineistoja sekä täydennetään tarpeen mukaan maastomittauksilla.

3.3.2 Korkeusmalli

Maaston pinnan muotoja kuvataan nykyään korkeusmallien DEM (Digital Elevation Model) avulla. Esitystapa on lähes syrjäyttänyt korkeuskäyrien käytön maan pinnan muotojen kuvaajana. Korkeuskäyriä käytetään lähinnä visuaalisissa tarkoituksissa, koska esimerkiksi Suomessa on saatavissa Maanmittauslaitoksen lähes koko maan kattava laserkeilausaineisto. Maanmittauslaitoksen tavoitteena on ollut saada koko Suomi kertaalleen keilattua ja se tapahtuu vuoden 2019 aikana. Saatavilla olevan aineiston tiheys on 0,5 pistettä/m² ja korkeustarkkuuden suurimmaksi keskivirheeksi luvataan 15 cm. Uudet kansalliset laserkeilaus- ja ilmakuvausohjelmat käynnistyvät keväällä 2020. Laserkeilausten osalta se tarkoittaa sitä, että tuotettavien aineistojen pistetiheys kymmenkertaistuu. Suomi jaetaan alueisiin, jotka laserkeilataan kuuden vuoden välein. Muita termejä ovat maastomalli DTM (Digital Terrain Model) ja pintamalli DSM (Digital Surface Model). Maastomallin erottaa korkeusmallista mallissa oleva tietosisältö ja pintamalli kuvaa myös kaikkea maan pinnalla olevaa kuten puita ja rakennuksia. (Korkeusmallit; Laserkeilausaineistoja ja ilmakuvia päivitetään jatkossa tiheämmin 2019.)

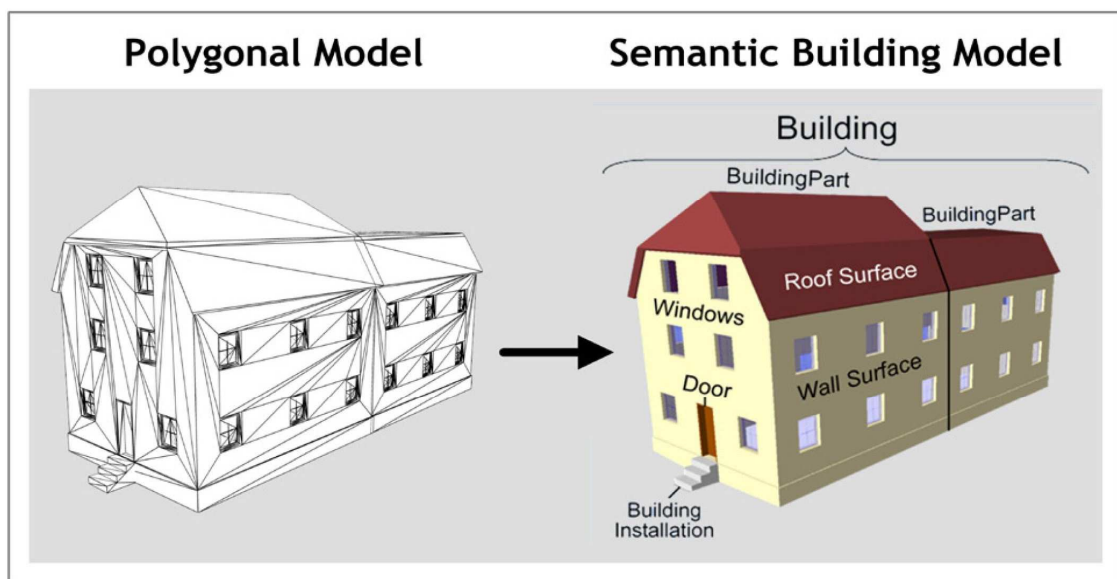
Jyväskylän kaupunki on tilannut yksityisiltä konsulttiyrityksiltä lentokoneella tai helikopterilla mitattuja laserkeilausaineistoja alueiltaan vuodesta 2009 asti. Isompia keilauksia on tehty nyt kuusi, joista viimeisin vuonna 2016. Keskustan alue on keilattu kahteen kertaan vuosina 2011 ja 2016. Käytännössä kaikilta asemakaavoitetuilta alueilta on saatavilla laserkeilausaineisto, jonka korkeustarkkuuden suurin keskivirhe on 5 cm ja pistetiheys 10–30 pistettä/m². Nämä aineistot muodostavat perustan korkeusmallien tuotannolle. Lisäksi kaupungilla on käytettävissään ajoneuvokeilausaineistoja sekä koko ruutukaavoitetun keskusta-alueen laserkeilausaineisto, joka on tehty staattisella Riegl VZ 400i -laserkeilaimella.

Jyväskylän kaupungilla on tuotettu RPAS-laitteistolla useita pienempialaisia korkeusmalleja alueilta, joissa maan pinta on muuttunut siitä, kun alue on viimeksi laserkeilattu. Tällaisia alueita ovat maankaatopaikat ja rakennettavat alueet, joiden maan pintaa on muokattu. Hyvä esimerkki on teollisuustontti, jonka pintamaat on poistettu ja jonka alta paljastuneen kallion louhintamäärät täytyy saada selville.

3.3.3 3D-kaupunkimalli

3D-kaupunkimallien käyttö on lisääntynyt kasvavassa määrin talouden ja julkisen hallinnon sektoreilla. On ymmärretty, että aineistoa voi käyttää paljon laajemminkin kuin visualisointi- tai navigointitarkoituksissa. Aikaisemmat sovellutukset voitiin tehdä käyttämällä semanttisesti köyhiä malleja, mutta viimeaikainen kehitys on tuonut entistä hienostuneemmat ja geometrisesti monimutkaisemmat kaupunkimallit tarpeellisiksi. Semanttisesti ja yksityiskohtaisesti rakennetuilla malleilla voidaan ratkaista entistä monimutkaisempia ongelmia esimerkiksi kaupunkisuunnittelussa, onnettomuuksien hallinnassa, navigoinnissa, turvallisuussuunnittelussa ja tilojen hallinnassa. Myös Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2002/49/EY ympäristömelun arvioinnista ja hallinnasta muodostaa 3D-kaupunkimalleille tärkeän roolin. Kaupunkimalleja tuotetaan hyödyntämällä olemassa olevaa 2D-aineistoa sekä hankkimalla korkeustietoa fotogrammetrisin menetelmin tai laserkeilauksella. (Kolbe ym. 2009: 1; Benner ym. 2005: 1; Alam ym. 2011; Gröger ym. 2012: 14.)

CityGML on OGC:n (Open Geospatial Consortium) luoma standardi 3D-kaupunkimallien mallintamiseen, tallentamiseen ja tiedonsiirtoon. Se on avoin ja perustuu XML (Extensible Markup Language) -formaattiin. Kaikki olennaiset kaupunkikohteet ja niiden geometriset, topologiset, semanttiset ja ulkonäölliset ominaisuudet ovat määriteltyinä skeemassa. Semantiikka tarkoittaa sitä, että kaikilla kohteilla ja kohteiden osilla on merkitys, ominaisuustiedot ja niiden välinen yhteys tunnetaan. Kuvassa 10 havaitaan nk. kuorimallin ja semanttisen mallin ero rakennusmallin tapauksessa. (Kolbe ym. 2009: 10; Benner ym. 2005: 1; Gröger ym. 2012: 14.)



Kuva 10. Kolmioidusta kuorimallista semanttiseksi malliksi (Nagel ym. 2009: 3)

3.3.4 Asemakaavan pohjakartasta 3D-kaupunkimalliksi

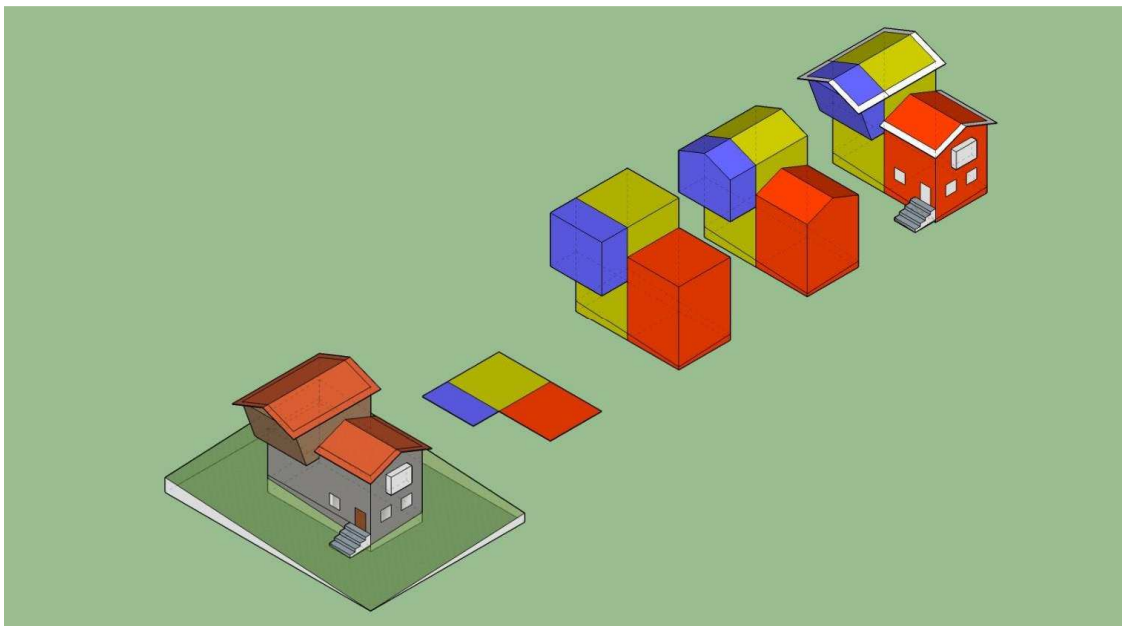
INSPIRE-direktiivi on Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2007/2/EC. Sen tavoitteena on yhtenäistää paikkatietojen käyttö ja luoda yhteinen paikkatietoinfrastrukturi. Direktiivi velvoittaa myös kaupunkeja järjestämään kaikki paikkatietoaineistot direktiivin mukaisesti INSPIRE-yhteensopiviksi paikkatietopalvelussa viimeistään vuoden 2021 loppuun mennessä. Direktiivin tavoitteena on saada eri paikkatietoaineistot yhteensopiviksi ja yhteiskäyttöisiksi. Tämä vähentää päällekkäistä työtä ja siten kustannuksia. Kansallinen laki paikkatietoinfrastruktuurista 12.6.2019/421 ja INSPIRE-direktiivi 2007/2/EY määrittelevät tarkemmin, mitkä viranomaiset ovat veloitettuja ja mitkä aineistot kuuluvat säännösten piiriin. (INSPIRE-direktiivi.)

INSPIRE-direktiivin myötä Maanmittauslaitos on käynnistänyt viime vuosina kaavan pohjakarttaan merkittävästi vaikuttavia hankkeita. Paikkatietoalusta-hanke käynnistyi vuonna 2017 ja päättyi vuoden 2019 lopussa. Hankkeen vastuullinen taho on maa- ja metsätalousministeriö ja muita valmisteluun osallistuvia tahoja ovat valtionvarainministeriö, ympäristöministeriö, Suomen ympäristökeskus ja Maanmittauslaitos. Lisäksi mukana on yhteistyökumppaneista yksityiseltä ja julkiselta sektorilta. Paikkatietoalusta-hanke on yksi hallituksen digikärkihankkeista 2015–2019. Hankkeen tavoitteena on luoda julkishallinnolle koko maan kattava paikkatietoalusta,

joka tarjoaa yhtenäiset palvelut sekä tiedon tuottajille että käyttäjille. (Tietoa paikkatietoalustasta.)

Osana Paikkatietoalustaa Maanmittauslaitos on käynnistänyt Kansallinen maastotietokanta (KMTK) -osahankkeen. Hanke toteutetaan yhdessä kuntien, valtiohallinnon sekä yksityisen sektorin kanssa. Kansallinen maastotietokannan perusta on yhteinen tietokanta, johon tunnistetut tiedontuottajat tallentavat aineistojaan ja jossa on yhtenäinen laaduntarkastus. Tietokannassa jokainen aineisto saa pysyvän ID:n, jolla hallitaan kohteiden historia- ja elinkaaritietoa. KMTK tulee sisältämään Maanmittauslaitoksen aineistoja, kuntien ja kaupunkien aineistoja sekä muita julkishallinnon aineistoja. Tietosisällöstä mainitaan peruspaikkatiedot, kuten rakennus-, liikenneverkko-, hydrografia-, maanpeitto- ja korkeussuhdetiedot. Lisäksi sinne tallennetaan paikannimet, kiintopisteet, ilmakuvat, korkeusmallit ja laserkeilausaineistot. Aineistot muodostavat maanlaajuisen kokonaisuuden, ja ne mahdollistavat 3D-kaupunkimallin muodostamisen. (Tietoa KMTK:sta.)

Kansalliseen maastotietokantaan tallennetut aineistot tehdään KMTK-hankkeen yhteydessä laadittavien käsitemallien mukaisesti. Käsitemalleissa määritellään kohdeluokat, niiden valintakriteerit, ominaisuustiedot, muodostaminen, yhteydet muihin kohteisiin ja elinkaarisäännöt. Eri käsitemalleja ovat esimerkiksi rakennukset ja rakenteet, maasto sekä hydrografia. Rakennukset ja rakenteet -käsitemalli toimii luonnoksena vuoden 2019 syksyllä valmistuvalle JUHTA:n suositukselle JHS 210 Paikkatiedon käsitemalli ja geometriat: Rakennukset ja rakenteet. KMTK:n käsitemalli päivitetään JHS 210 mukaiseksi, kun suositus julkaistaan. Kuvassa 11 esitetään rakennuksen eri osien mallintaminen 2,5D ja mallinnustavoilla LOD 1–3. LOD 3 -mallinnustavassa rakennuksesta mallinnetaan räystäät, parvekkeet, portaat, ovet ja ikkunat. (Rakennukset ja rakenteet käsitemalli 2019; Tietoa paikkatietoalustasta.)



Kuva 11. Rakennuksen eri osien mallintaminen 2,5D- ja LOD 1–3 -mallinnustavoilla. (3D-muodostamisohjeet. Rakennukset ja rakenteet 2018 (kommentoitava versio))

Ympäristöministeriön toimeksiannosta on toteutettu vuosien 2018–2019 aikana Kuntapilotti-niminen hanke. Hankkeen on toteuttanut neljän yksityisen konsulttiyrityksen konsortio. Siinä oli tavoitteena tukea alueidenkäytön tietojenhallinnan digitalisoitumista ja toimia tausta-aineistona maankäyttö- ja rakennuslain uudistukselle. Aikataulu hallituksen esitykseksi uudesta maankäyttö- ja rakennuslaista on asetettu vuoden 2021 loppuun mennessä. Kuntapilotti-hankkeessa laadittiin ehdotukset tietomallipohjaisen asemakaavoituksen tiedonhallinnalle ja prosesseille viiden pilottikunnan kanssa. Pilottikunnat olivat Inkoo, Kempele, Kuopio, Lahti ja Tampere. Yhtenä osana ehdotuksia käsiteltiin kaavan pohjakarttaa, sen lähdetietoja ja prosesseja. (Kuntapilotti 2019: 5–8.)

”Visiona on siirtyä dokumenttipohjaisesta kartta- ja arviointitietojen kokoelmasta jatkuvasti päivittyvään rakennetun ympäristön tietojen ja prosessien tilannekuvaan, joka hyödyntää ketterästi eri tiedontuottajien rajapintoja. Kaavoituksessa tarvittava lähtötieto tulisi olla osa valtakunnallista rakennetun ympäristön perustietovarastoa, josta voidaan tapauskohtaisesti laatia eri lähtötietomalleja kaavoituksen ohella myös esimerkiksi infrasuunnittelun ja muiden käyttötapausten tarpeisiin. Asemakaavaprosessi samoin kuin muut uutta tietosisältöä tuottavat prosessit toimivat samalla tällaisen tietoluokituksen tiedontuotantoprosesseina.” (Kuntapilotti 2019: 47.)

Nykyään asemakaavaa laadittaessa tehdään tarkastettu ja hyväksytty asemakaavan pohjakartta erillisellä prosessilla. Raportissa esitetään, että yksinkertaisimmillaan pohjakartta voisi olla koostua tietyistä välttämättömistä ajantasaisista ja auditoiduista tietoaineistoista. Näitä olisivat taulukossa 6 esitetyt ortokuva, maanpinta, kiinteistörajat

sekä rakennukset. Raportissa ehdotetaan siis nykyisen JHS 185:n mukaisen asemakaavan pohjakartan tietosisällön merkittävää pelkistämistä. Sekä pohjakarttaa täydentävien että itse pohjakartan tietoaineistojen päivittäminen voisi tapahtua toisistaan riippumatta. Tärkeää olisi, että taustalla olisi yhteinen valtakunnallinen ohjeistus. (Kuntapilotti 2019.)

Taulukko 6. Ehdotus kaavan pohjakartan tietosisällöksi (Kuntapilotti 2019: 54).

Tietoaineisto	Kriteerit
Ortokuva	<ul style="list-style-type: none"> • Riittävä resoluutio, taajama-alueella tiheämpi • Geometrinen tarkkuus, spatiaalinen erotuskyky, radiometrinen laatu, kuvien häiriöt
Maanpinta	<ul style="list-style-type: none"> • Korkeussijainnin tarkkuus ja hilatiedon sijaintitarkkuus • Esitystapa riippuu käyttöliittymästä: korkeusmalli, korkeuskäyrät, rasterivarjostus... • Korkeusdata oltava suunnitteluohjelmistojen käytettävissä myös raakatana
Kiinteistörajat	<ul style="list-style-type: none"> • Suljettuina alueina, kiinteistötieto linkitettyinä. Kiinteistörajat voivat olla muun vektoriaineiston tapaan kolmiulotteisia (2,5D tai 3D)
Rakennukset	<ul style="list-style-type: none"> • Pohja-alojen ajantasaisuus ja sijaintitarkkuus • LOD2 -tarkkuustason korkeus- ja räystäsgeometria

Eri aineistoista koostettua pohjakarttaa tai lähtötietomallia pitäisi voida tarkastella kolmiulotteisesti. Tietomallia voitaisiin rikastaa esimerkiksi tuomalla siihen pistepilvi tai fotogrammetrisesti tuotettu teksturoitu kolmioverkkomalli. (Kuntapilotti 2019: 54–55.)

Jyväskylän kaupungin käytössä olevaan Trimble Locus -paikkatietojärjestelmään on kehitetty uusia 3D-ominaisuuksia viime vuosina. Tarkoituksena on, että esimerkiksi asemakaavan pohjakartan voi esittää 3D-muodossa haluamastaan sijainnista. Locus Cloud -päivityksen myötä paikkatietoaineistoja voi ylläpitää sekä 2D- että 3D-näkymässä. Yksinkertaisen 3D-kaupunkimallin muodostaminen edellyttää minimissään rakennusten seinälinjoja, tietoa rakennusten korkeuksista ja korkeusmallia. Rakennuksia voidaan parantaa tuomalla paikkatietojärjestelmään mallinnetut kattomuodot tai seinätekstuurit. (Trimble Locus 18.2 käyttöohje 2019.) Tähän saakka rakennusten kattomuodot on mallinnettu laserkeilausaineistoista Terrasolid-ohjelmilla.

Rakennukset, joista laserkeilausaineistoa ei ole saatavilla, on mallinnettu RPAS-kuvauksista lasketuista pistepilvistä.

3.3.5 Muut aineistot

Kaupunkisuunnittelun ja markkinoinnin tarpeisiin on RPAS-laitteella kuvattu huomattava määrä viistokuvia. Isommista kaupunkikehityskohteista, kuten Hippokselta, Kankaalta ja Keskussairaalanmäeltä on tehty ristiin lennettyjä kuvauksia, joista on laskettu pistepilviä ja mesh-malleja. Talven 2018–2019 aikana aiheutuneita puustovaurioalueita on kuvattu PPK-tekniikalla.

4 Viistokuvaus ja SfM-tekniikka

4.1 Viistokuvaus

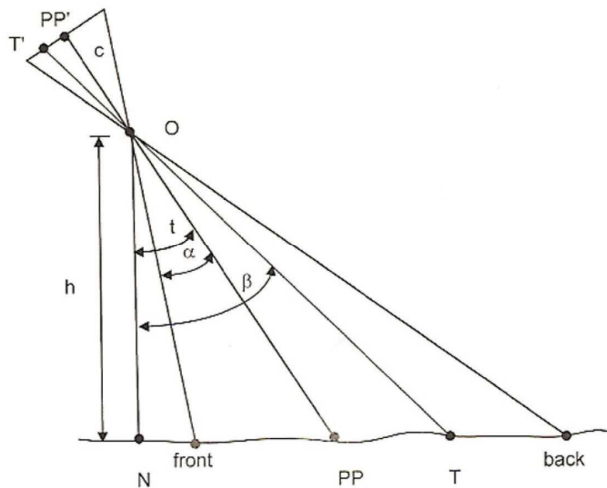
Viistokuvakameroiden kehitys on tehnyt viistokuvauksesta arkipäivää monissa kartoitussovellutuksissa. Viistokuvien etu pystykuviin verrattuna on se, että niistä pystytään havaitsemaan rakennusten seinät, tunnistamaan helpommin kohteita ja keräämään paikkatietoa. Pistepilvien laskenta viistoilmakuvilta tuottaa tiheämmät pistepilvet, joista erottuvat luotettavammin myös pystysuorat kohteet. Yksittäiseltä viistokuvalta voidaan tehdä mittauksia etäisyyksien ja pinta-alojen lisäksi myös korkeussuunnassa. (Remondino & Gerke 2015: 75; Gerge ym. 2016: 185; Höhle 2008: 7–8.)

Yleisin viistokameratyyppi on viiden kameran kokonaisuus, jossa on yksi pystykuvia ottava kamera ja neljä viistoon, noin 40–50 asteen kulmassa, kuvaavaa kameraa. Kamerat on suunnattu siten, että kuvat muodostavat kuvion, jota nimitetään Maltan risti-konfiguraatioksi (Maltese-cross configuration) (kuva 12). (Remondino & Gerke 2015: 76.) Viistokuvien kallistus voi olla 5–55 goonin välillä, joka aiheuttaa kuvien vaihtelevan mittakaavan. Yhden viistokuvan kuvaaman alueen koko ja muoto on erilainen jopa tasaisia alueita kuvattaessa. Korkeat viistokuvat (High oblique) sisältävät horisontin ja matalat viistokuvat (Low oblique) eivät. (Höhle 2008: 8.)



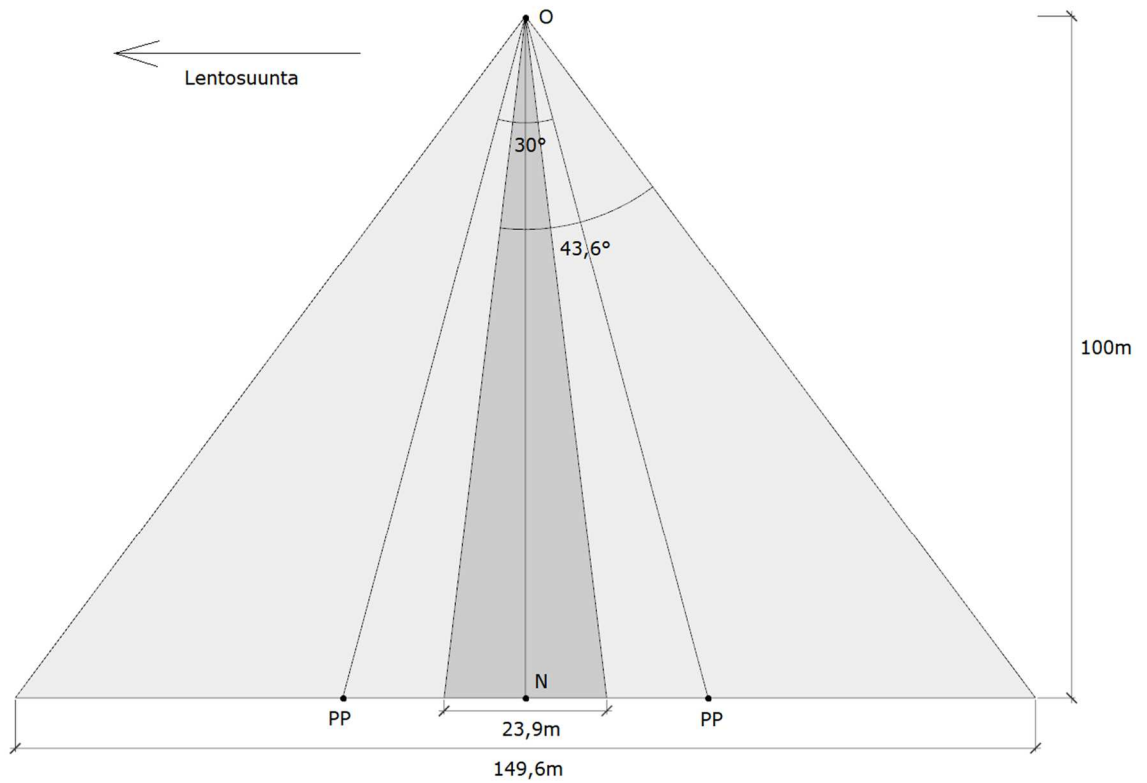
Kuva 12. Leica RCD30-tilt-kamera ja sen kamerakonfiguraatio (Maltese-cross configuration) (Haala ym. 2015: 3).

Kohteiden mittaaminen yhdeltä viistokuvalta edellyttää sisäisen ja ulkoisen orientoinnin tarkkaa selvittämistä. Sisäinen orientointi tarkoittaa kameran projektiokeskuksen suhteen määrittämistä siihen koordinaatistoon, jossa kuvahavainnot tehdään. Selvitettävät muuttujat ovat kameran pääpiste ja kameravakio. Pääpiste on kameran projektiokeskuksesta eli origosta kuvalle piirretyn normaalin kantapiste. Kameravakio on projektiokeskuksen etäisyys kuvatasosta. Pienikin virhe pääpisteen sijainnissa vaikuttaa suuresti mittaustuloksiin. Ulkoisella orientoinnilla selvitetään kameran ja sen koordinaatiston suhde kohdekoordinaatistoon. Muuttujia ovat kamerakoordinaatiston suhde kohdekoordinaatistoon eli käytännössä kameran sijainnin koordinaatit sekä kamera- ja kohdekoordinaatiston väliset kiertokulmat. Kiertokulmat kertovat kameran asennon kuvanottohetkellä. (Höhle 2008: 8, Haggrén & Koistinen 2004: 2–3.) Kuvassa 13 on esitetty viistokuvauksen parametreja.



Kuva 13. Viistokuvan parametrit. T=kohdepiste, N=nadiiripiste, PP=kameran normaalin ja maaston kohtauspiste, PP'=pääpiste, t=kameran kallistuskulma, β =linssistä kohteeseen ja nadiiriin välinen kulma, α =puolen näkökentän kulma (Höhle 2008: 8).

Kuvassa 14 on esitetty tutkimuksessa käytetyn viistokuvagimbaalin kameroiden yhden kuvaushetken kattama laskennallinen kuvausalue ja kuvien päällekkäinen osuus. Sony $\alpha 6000$ -kameran avauskulmat 20 mm:n kiinteää objektiivia käytettäessä ovat vaakasuunnassa $61,9^\circ$ ja pystysuunnassa $43,6^\circ$. (Mikkola 2019) Yhden kuvan kattama alue on 100 m:n korkeudesta 15° kulmassa kuvattuna on 120 m x 86,7 m. Kuvan etu- ja takareunan ollessa eri mittaiset, on kuvan leveys maan pinnalla laskettu kuvan keskikohdasta. Kyseisellä viistokuvagimbaalilla kahden samalla hetkellä otetun kuvan päällekkäisyys on 27,5 % pääpystysuoralla mitattuna.



Kuva 14. Tutkimuksessa käytetyn viistokuvagimbaalin kameroiden kattama kuvausalue ja kuvien päällekkäisyyden osuus.

Nesbit ja Hugenholtz [2018: 3] havaitsivat tutkimuksessaan, että vakiintuneita suosituksia tietyille viistokuvauskulmille ei ole vielä olemassa. Taulukossa 7 on lueteltu tutkimuksia, joissa suositellaan kuvauskulmia, joita viistokuvauksessa kannattaisi käyttää SfM-tekniikalla aineistoja laskettaessa. (Nesbit & Hugenholtz 2018: 3.) SfM-tekniikasta enemmän kappaleessa 4.2.

Taulukko 7. Tutkimuksissa suositeltuja viistokuvauskulmia SfM-tekniikalla aineistoja laskettaessa (Nesbit & Hugenholtz 2018: 3).

Imaging Strategy	Author	Suggested Angle	Additional Notes
Airborne UAV ¹	Bemis et al. [6]	10–20°	
	James and Robson [21]	20–30°	
	Markelin et al. [61]	25–30°	
	Harwin et al. [52]	45–65°	
	Carbonneau and Dietrich [54]	20–45°	>10% of image sets
	Carvajal-Ramirez et al. [15]	35°	Orthogonal to surface
	James et al. [62]	20°	
	Rossi et al. [25]	60°	Orthogonal to surface
	Agüera-Vega et al. [18]	45°	

4.2 SfM-tekniikka

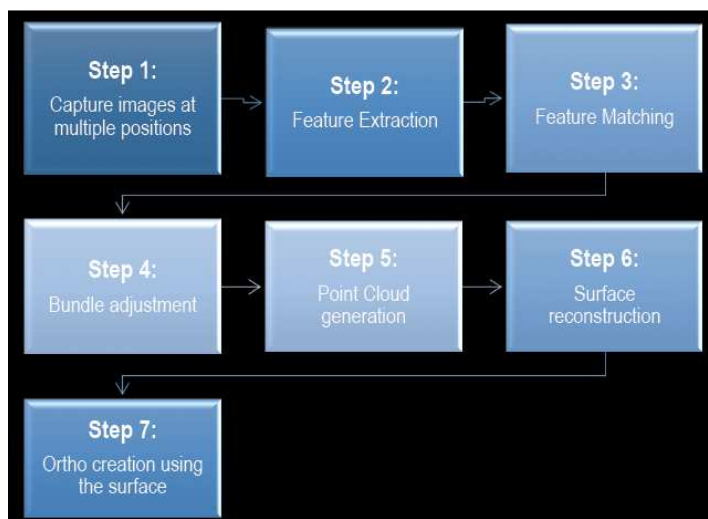
Kaupunkimallien automaattinen tuottaminen kaupunkisuunnittelun tarpeisiin on ollut jatkuvaa viimeiset kaksi vuosikymmentä. Pitkään näytti siltä, että laserkeilaus on vastaus lähtöaineiston keräämiseen kaupunkimallien tuottamiseksi. Fotogrammetrisen laskennan algoritmit ovat kehittyneet niin, että nadiiri- ja viistoilmakuvilta lasketut pistepilvet ylittävät tiheydeltään vastaavat laserkeilatut pistepilvet. Jos ilmapalokuvat ovat riittävällä päällekkäisyydellä, niin nykyiset laskentaohjelmat pystyvät laskemaan 3D-pistepilviä, joiden tiheys vastaa kuvien maastopixelikokoa. (Fritsch ym. 2013: 57; Haala 2013: 271.)

Perinteinen fotogrammetrisen ilmakolmiointi, jossa sädekimput tasoitetaan blokkina, on kehitetty alun perin nadiirikuvien prosessointiin eikä se sovellu viistokuvien orientointiin. Tutkimuksissa on osoitettu, että viistokuvilla kyseisellä tekniikalla ei saavuteta tarpeeksi hyviä tuloksia. Viistokuvat ovat olleet pitkään käytössä sellaisissa sovellutuksissa, joissa ei vaadita suurta tarkkuutta. Tämän aiheuttaa viistokuvilla eri kohdilla olevien kohteiden suuri mittakaavaero. Viime vuosina joukko SfM-tekniikkaan perustuvia ohjelmia on tullut avoimille markkinoille kaikkien saataville. Näitä ohjelmia on kehitetty tiettyynajaan saakka piittaamatta perinteisistä fotogrammetrisistä tekniikoista. Ohjelmien suurin ongelma voi olla tietokoneiden riittämätön laskentateho. (Ostrowski & Bakula 2016: 91.)

Helppo, joustava ja nopea kuvien kerääminen kohteista muilla kuin mittakameratason kameroilla, samanaikainen tietokoneiden laskentatehon kasvu sekä kehitys tietokoneenäössä ovat johtaneet SfM-tekniikan kehittymiseen. Tekniikka mahdollistaa edullisen ja tarkkaresoluutioisen fotogrammetrian, ja sen helppokäyttöisyys tekee

tekniikan kiinnostavaksi myös niille, jotka eivät suoraan toimi kaukokartoituksen alalla. Ei-kaupalliset avoimen lähdekoodin ohjelmistot ovat olleet merkittävä osa SfM-tekniikan kehitystä, esimerkkinä MicMac-projekti. Avoimen lähdekoodin ohjelmistojen pohjalta on kehitetty kaupallisia ohjelmistoja, kuten sveitsiläinen Pix4D, venäläinen Agisoft Photoscan ja italialainen Menci APS. (Eltner ym. 2016: 360–363.)

Pix4d:n laskenta perustuu SfM-tekniikkaan, joka on fotogrammetrian periaatteita hyödyntävä konenäköön perustuva tekniikka. Siinä voidaan luoda erittäin tiheitä 3D-pistepilviä joukosta osittain toistensa kanssa päällekkäisiä kuvia. Kuvassa 15 on esitetty pelkistetyt kameralla kuvatun kuva-aineiston laskenta SfM-tekniikalla pistepilveksi ja ortokuvaksi. Vaiheita ovat kuvien ottaminen monesta eri asennosta, yhteisten kohteiden tunnistaminen kuvilta, kohteiden yhteensovittaminen, sädekimpputasoitus, pistepilven tuottaminen, pintamallin muodostaminen ja ortokuvan laatiminen. (Dharmapuri & Tully 2018.)



Kuva 15. SfM-tekniikan työnkulku (Dharmapuri & Tully 2018).

Kuvilta fotogrammetrisesti lasketut pistepilvet ovat samantyyppisiä aineistoja laserkeilaamalla saatujen pistepilvien kanssa. Merkittäviä eroja kuitenkin löytyy. Alueilta, joissa kuvattava pinta on samanlaista, ei välttämättä saada laskettua pisteitä fotogrammetrisesti. Laserkeilain sen sijaan tuottaa mittaustietoa myös niiltä pinnoilta. Lisäksi laserkeilaimen kyky tallentaa useampia kaikuja yhdeltä mittaussäteeltä mahdollistaa usein maan pinnan mittaamisen myös kasvillisuuden läpi. Laserkeilain mittaa kohteen ja tallentaa sen välittömästi, kun taas kuvilta mittaaminen on riippuvainen kuvien laadusta ja kuvilla olevista virheistä. Laserkeilausaineistojen formaatit

mahdollistavat useiden parametrien pistekohtaisen tallentamisen. (Dharmapuri & Tully 2018.)

Gerge ym. [2016: 187–190] selvittivät lentolinjojen päällekkäisyyden vaikutusta viistokuvauksesta tuotetun pistepilven tarkkuuteen. Tutkimuksessa käytettiin päällekkäisyyksiä 80/80 % ja 60/60 %. Aineistot laskettiin samalla ohjelmistolla ja paikannus suoritettiin tukipisteitä käyttäen. Pelkästään korkeustarkkuutta vertailtaessa päällekkäisyyden pienentäminen 80/80 %:sta 60/60 %:iin kasvatti loppuaineiston korkeuden keskivirhettä 60 %, ja yksittäisen kohteen tarkkuutta mitattaessa lasketussa pistepilvessä satunnaiset virheet tulivat 2–3 kertaa suuremmiksi. Sama päällekkäisyyden vähentäminen pudottaa myös kuvamäärän neljä kertaa pienemmäksi. Tutkimuksessa selvisi myös se, että vasemmalle ja oikealle, eteen ja taakse sekä alaspäin katsovien kameroiden kuvilta laskentaohjelmalla käytetty Pix4D löytää hyvin yhteisiä pisteitä ja muodostaa kuvaparit, kun taas viistokuvan nadiirikuvan yhdistelmästä huomattavasti vähemmän (taulukko 8). Tutkimuksessa käytettiin IGI Pentacam -kameran aineistoa, jossa viistokuvien kallistus on 45°. (Gerge ym. 2016: 187–190.)

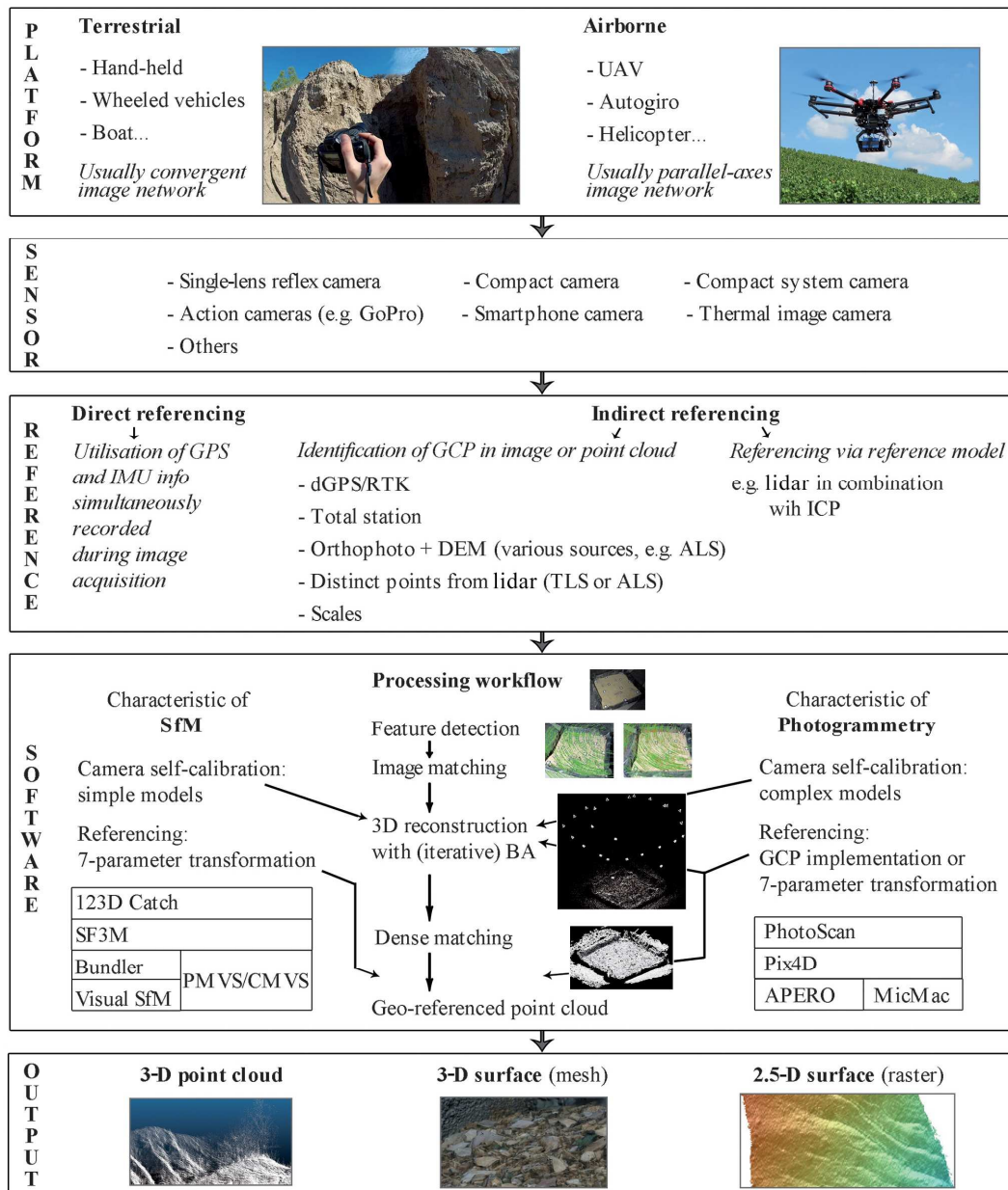
Taulukko 8. Pix4D:llä laskettujen eri suuntiin katsovien kameroiden yhdistettyjen kuvaparien lukumäärät (Gerge ym. 2016: 187).

	<i>Right</i>	<i>Back</i>	<i>Front</i>	<i>Left</i>	<i>Nadir</i>
<i>Right</i>	740	-	-	800	21
<i>Back</i>	-	566	767	-	39
<i>Front</i>	-	-	588	-	34
<i>Left</i>	-	-	-	711	7
<i>Nadir</i>	-	-	-	-	865

Pix4D:n manuaalissa suositellaan tavanomaiseen kuvaustehtävään 75 %:n pituuspeittoa ja 60 %:n sivupeittoa. Peittoa suositellaan nostamaan, jos kuvausalue koostuu metsästä, tiheästä kasvillisuudesta tai jos alueella on vähästruktuurisia pintoja, kuten peltoja. (Pix4D 2014: 11–15.) Jyväskylän kaupungin RPAS-toiminnassa on käytetty mahdollisuuksien mukaan hyvin suuria peittoa. Yleiset käytetyt peittoprosentit ovat olleet pituuspeitto 90 % ja sivupeitto 80–85 %. Peittoprosentin valintaan vaikuttavat kuvattavan alueen koko ja lentokorkeus.

Suurten viistokuvablokkien laskenta onnistuu hyvin SfM-tekniikkaan perustuvilla ohjelmilla (Ostrowski & Bakula 2016: 95; Nesbit & Hugenholtz: 17). Kuvien määrän noustessa tuhansiin voi olla järkevää jakaa kuvablokki osablokkeihin, jolloin saavutetaan nopeampi laskenta ja parempi tuottavuus. Merkittävä laskenta-aikaa lisäävä tekijä on ilmakolmioinnissa havaittavien vastinpisteiden määrä, joita esimerkiksi Pix4D-ohjelmassa voi vähentää eikä se heikennä lopputulosten tarkkuutta. Myöskään kalliin IMU (Inertial Measurement Unit) -yksikön käyttö SfM-tekniikassa ei ole tarpeellista. (Ostrowski & Bakula 2016: 95.)

Kuvassa 16 Eltner ym. [2016: 361] esittävät kattavasti SfM-tekniikan kokonaisprosessin kuvien ottamisesta lopputuotteisiin. SfM-tekniikassa kuva-aineistot voidaan ottaa monella erilaisella tavalla, kuten esimerkiksi kuvaamalla käsivaralla, ajoneuvosta, veneestä, RPAS-laitteesta tai helikopterista. Kuvia ottava kamera voi olla myös melkein millainen tahansa. Aineiston georeferoinnin vaihtoehtoina ovat GNSS/IMU-vaihtoehdot, tukipisteet tai referenssiaineistot. Prosessointi on jo kuvattu kuvassa 15, mutta kuvassa 16 ilmenevät lisäksi eri laskentaohjelmien erot. On ohjelmia, kuten Pix4D, joissa tukipisteet voidaan ottaa mukaan laskentaan jo sädekimpputasoitusvaiheessa. Lopputuotteina ovat pistepilvet, mesh-mallit ja rasterikuvat. (Eltner ym. 2016: 361.)



Kuva 16. SfM-prosessin kuvaus kuvien ottamisesta lopputuotteisiin (Eltner ym. 2016: 361)

Kuluttajatasen kameroilla kuvattujen nadiirikuvien laskeminen SfM-tekniikalla aiheuttaa systemaattista virhettä, jossa koko laskettu pistepilvi kaareutuu korkeussuunnassa reunoilta keskelle päin. Samaa ongelmaa ei esiinny perinteisessä ilmakuvauksessa, jossa käytetään tarkkoja kalibroituja mittakameroita yhdistettynä tiheään tukipisteverkkoon. Systemaattista virhettä voidaan vähentää eri keinoin. Kameran kalibrointi on tärkeä saada selville. Jos kamera on kalibroitu ennakkoon ja tiedot ovat käytettävissä laskennassa, on systemaattinen virhe häviävän pieni. Pelkkien nadiirikuvien sädekimpputasoituksessa tehtävässä itsekalloinnissa SfM-ohjelmat eivät

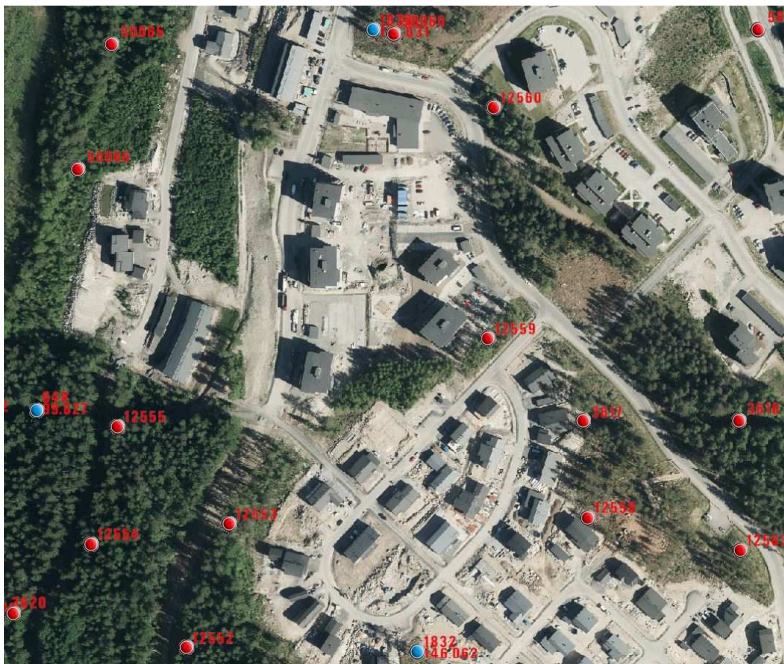
pysty täysin ratkaisemaan kameran kalibrointia vaan aineistoon jää systemaattista virhettä. Tämä voidaan korjata esimerkiksi yhdistämällä nadiirikuva-aineistoon viistokuvia. SfM-tekniikkaa käytettäessä systemaattista virhettä voidaan vähentää, jos käyttökelpoiset tukipisteet voidaan syöttää ohjelmaan ja ottaa huomioon jo sädekimpputasoitusta laskettaessa. Lentäminen ristikkäisillä lentolinjoilla ja pelkästään viistokuvien ottaminen on myös tehokas keino vähentää systemaattista virhettä. (James & Robson 2014: 1419–1420.) Nesbit ja Hugenholtz [2018] tutkivat nadiirikuvien, viistokuvien ja näiden yhdistelmien laskennan tarkkuutta SfM-ohjelmalla. Tarkkuutta mitattiin vertaamalla ohjelmalla laskettuja pistepilviä staattisella laserkeilaimella laserkeilattuun maastomalliin. He havaitsivat, että viistokuvia lisäämällä nadiirikuvien laskentaan tarkkuudet paranivat riippumatta viistokuvien kallistuksesta tai lentolinjoista. Nadiirikuvauksissa peitto prosenttien tai kuvien määrän kasvattaminen ei poista systemaattista kaareutumisvirhettä vaikkakin parantaa pistepilven tarkkuutta. Kiinnostavaa tämän tutkimuksen kannalta oli se, että pelkkiä viistokuvablokkeja laskiessa systemaattinen virhe pienenee sitä mukaa, kun kameran kallistusta lisätään. Esimerkiksi peitoilla 90/70 % kuvattujen aineistojen keskihajonnat ja keskivirheet olivat seuraavat: 5° kallistus: $\sigma=0,209$ m $\mu=-0,193$ m, 15° kallistus: $\sigma=0,073$ m $\mu=-0,072$ m, 25° kallistus: $\sigma=0,054$ m $\mu=-0,017$ m ja 35° $\sigma=0,038$ m $\mu=-0,006$ m. (Nesbit & Hugenholtz 2018.)

5 Tutkimuslennot Mannisenmäessä

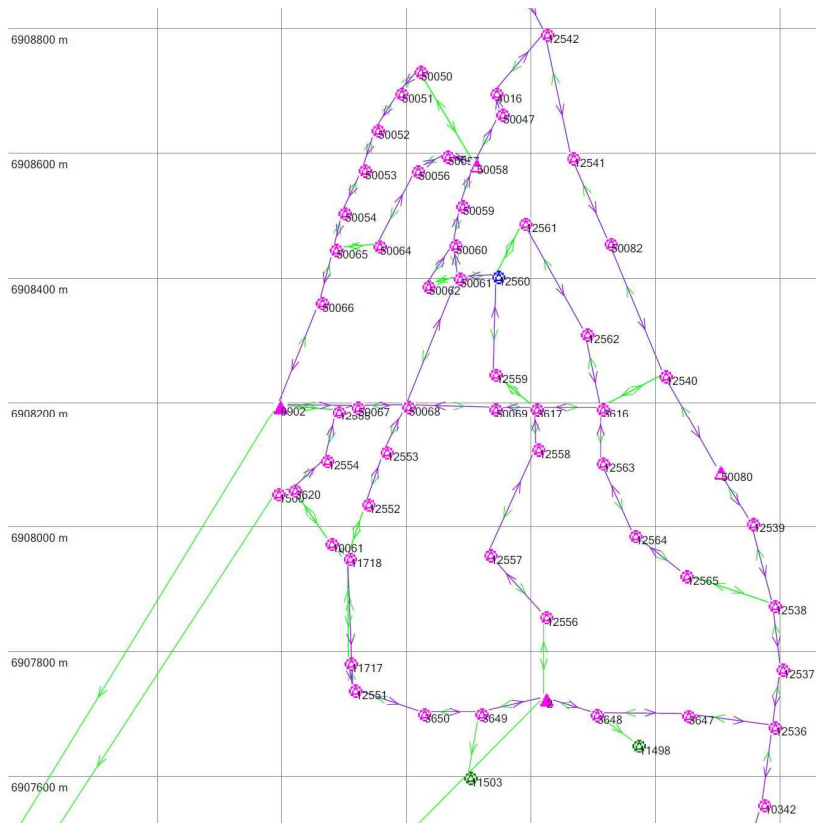
5.1 Referenssimittaukset

5.1.1 Runkoverkko

Jyväskylän kaupungin kiinteistömuodostus ja maastomittausyksikkö tekee runkomittauksia jatkuvasti parantaen vanhojen pisteiden tarkkuutta ja mitaten uutta runkoa tuleville rakennettaville alueille. Runkomittauksia tehdään sekä staattisella GPS-mittauksella että jonomittauksena takymetrillä. Kuvassa 17 on nähtävissä rakennetun monikulmiopisteverkon tiheys tutkimusalueella. Tutkimuksessa mitattujen referenssimittauksien lähtöpisteet kuuluvat kaikki samaan vuonna 2015 mitattuun ja tasoitettuun "Saarijärventien runkomittaus" -verkkoon. Runkomittausraportissa ei ole havaittavissa poikkeamia. Verkon tunnetuilla pisteillä oli vaaitut korkeudet. Jyväskylän kaupungilla on käytössä ETRS-GK26-koordinaattijärjestelmä ilman 26-kaistatunnusta ja N2000-korkeusjärjestelmä. Kuvassa 18 on ote runkomittausraportista, jossa näkyy runkoverkon muodostuminen Mannisenmäen tutkimusalueen kohdalta.



Kuva 17. Monikulmio- ja korkeuspisteet tutkimusalueella.



Kuva 18. Ote ”Saarijärventie runkomittaus” -mittausraportista sekä tutkimusalueen monikulmio- ja korkeuspisteet ortokuvalla.

5.1.2 Maastomittaukset

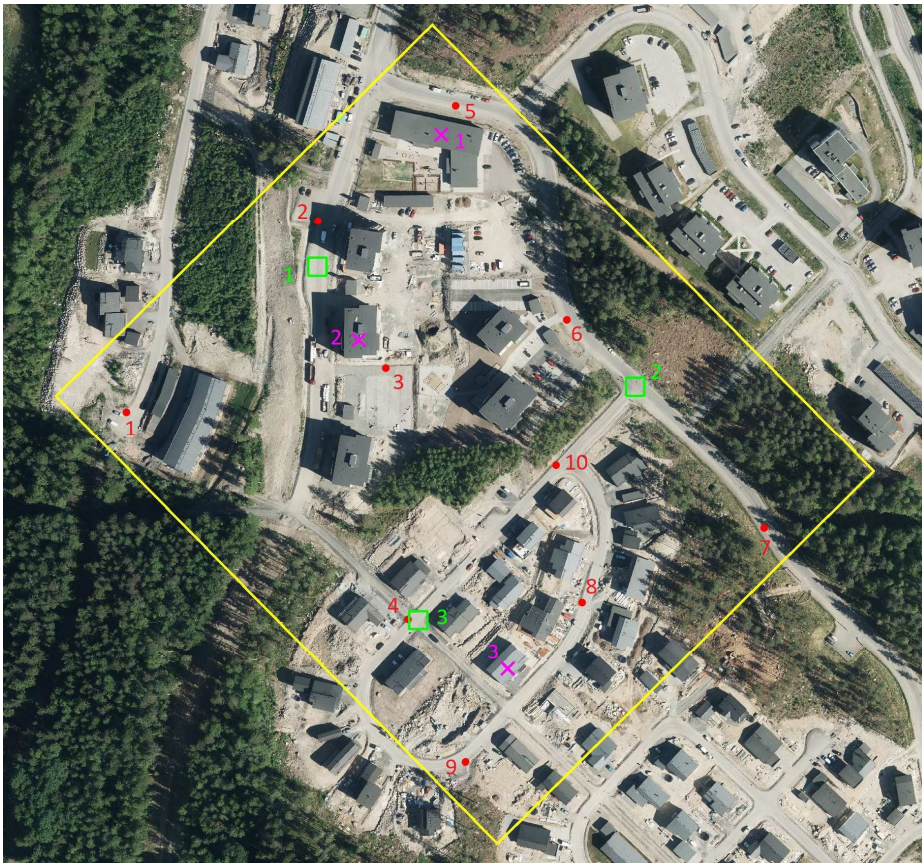
Referenssimittaukset tehtiin 25.–26.6.2019 Leica Nova MS50 MultiStation -takymetrillä. Laite julkaistiin vuonna 2013, ja normaalien robottitakymetrin toimintojen lisäksi sillä voi mitata pistepilviä. Skannaustaajuuden ollessa 1 000 Hz mittausetäisyys on 300 m ja mittaustarkkuus 1 mm 50 m:n päästä. Hitaimmalla skannaustaajuudella mittausetäisyys on 1 km. Kulmatarkkuus laitteessa on 0,3 mgon, joten se soveltuu myös suurempaa tarkkuutta vaativiin mittauksiin. (Leica Nova MS50 Datasheet 2013.)

Takymetrimittausten orientoinnit tehtiin monikulmiopisteisiin vapaata asemapistettä käyttäen. Samoilta kojeasemilta mitattiin signaloidut tukipisteet ja tehtiin tiealueiden sekä rakennusten skannaukset. Tukipisteitä mitattiin 11 kpl, asfaltin pinta-alueita skannattiin 3 kpl ja rakennuksia skannattiin 3 kpl. Skannattuihin rakennuksiin sisältyi kerrostalo, rivitalo ja omakotitalo (kuva 19). Takymetrimittausten orientointiraportit ovat liitteessä 2.



Kuva 19. Leica MS50 -takymetrillä skannattu omakotitalo. Pistepilvi on värjätty keilaushetkellä otetulla panoraamakuvalla.

Alueelle rakennettiin tukipisteitä 10 kpl. Neljä pisteistä sijoitettiin kartoitettavan alueen nurkkiin, yksi keskelle ja loput tasaisesti niiden väliin (kuva 20). Pisteet rakennettiin käyttämällä asfalttinauloja siten, että naulan yläpinta on asfaltin pinnan tasossa.



Kuva 20. Tutkimusalue Mannisenmäessä. Keltainen viiva aluerajaus. Signaloidut tukipisteet 1–10 punaisella pisteellä. Skannatut asfaltin pinnat 1–3 vihreällä ruudulla ja skannatut rakennukset 1–3 violetilla ruksilla.

5.1.3 Signalointi

Rakennetut pisteet signaloitiin maalaamalla spraymaalilla pisteen ympäristö mustalla ja asfalttinaulan keskelle 5 cm:n kokoinen valkoinen ympyrä (kuva 21).



Kuva 21. Signaloitu tukipiste tutkimusalueella.

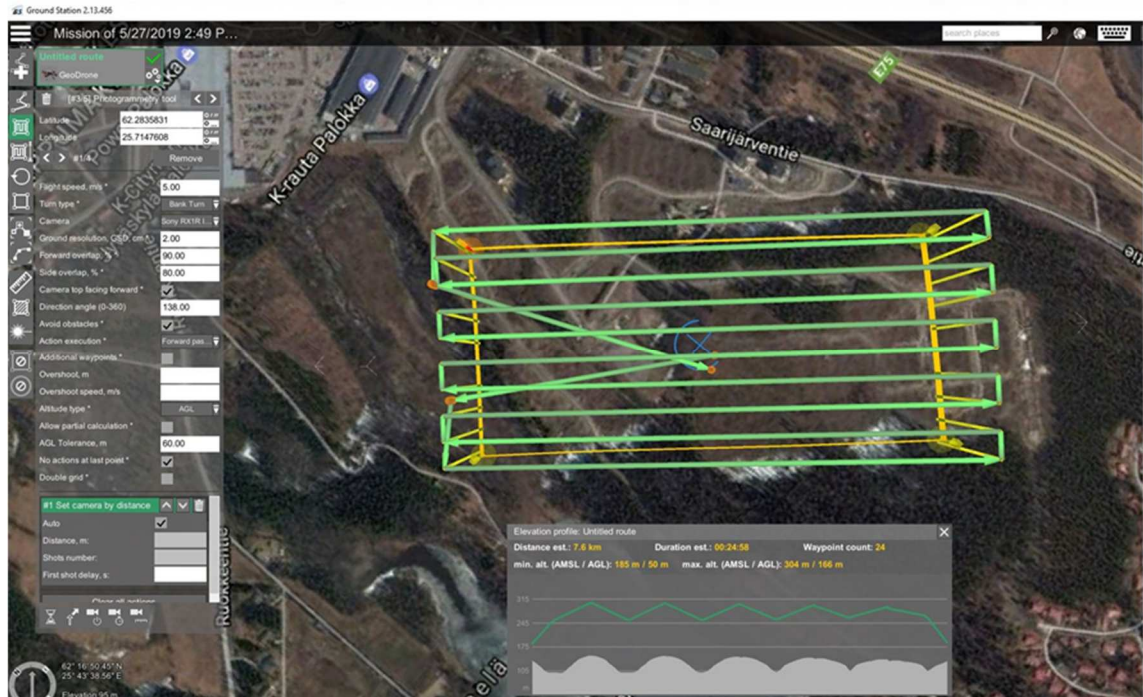
5.2 Tutkimusalue

Mannisenmäen uusi asuinalue sijaitsee noin neljä kilometriä Jyväskylän keskustan pohjoispuolella. Alue valikoitui tutkimusalueeksi monesta syystä. Mannisenmäki on tyypillinen RPAS-laitteella kartoitettava alue, koska juuri rakentuneesta kaupunkiympäristöstä ei yleensä ole saatavilla ajantasaista ortokuva- tai laserkeilausaineistoa kaavan pohjakartan tai kaupunkimallin lähtöaineistoksi. Alueen asemakaava on tullut lainvoimaiseksi vuonna 2013, ja se sisältää erityyppisiä rakennuksia kuten pientaloja, rivitaloja sekä kerrostaloja. Mannisenmäki on maaperältään hiekkamoreenia ja kohoaa mäkeä ympäröivien Tuomijärven ja Palokkajärven pinnoista noin 60 m. Tutkimusalueen sisällä korkeuseroa on noin 40 m. Alueella rakentaminen alkoi vuonna 2014 ja jatkuu edelleen vuonna 2019. Kaavan pohjakartta on osittain ajan tasalla, mutta kaupunkimalliin tarvittavia kattomuotoja ei ole mitattu.

5.3 Esivalmistelut

Aluerajaus suunniteltiin siten, että alueen sisään jäisi sekä erilaisia rakennuksia että maaston korkeuseroja. Tutkimusalueen koko oli 10 ha, eli se on Jyväskylän kaupungilla keskimääräistä RPAS-laitteella kuvattavaa kartoitusaluetta jonkin verran pienempi alue. Lentoja suunniteltiin tehtäväksi samalla kameralla sekä viistokuvauksena että nadiirikuvauksena. Lisäksi haluttiin selvittää sitä, pystytäänkö saavuttamaan sama pistepilven tarkkuus nostamalla lentokorkeutta ja vaihtamalla ominaisuuksiltaan parempaan kameraan.

Lentosuunnitelmat tehtiin VideoDrone Ground Station -ohjelmalla neljälle eri RPAS-kuvauslennolle. Viistokuvagimbaalille suunniteltiin noin 100 m:n korkeudelta kaksi eri lentoa, joiden lentolinjat risteävät 90°:n kulmassa toisiinsa nähden. Aineistot voidaan laskea yhdeltä viistokuvallennolta tai ristikkäiset kuvaukset yhdistettynä, jolloin voidaan simuloida neljän kameran viistokuvagimbaalia. Samalle noin 100 m:n korkeudelle tehtiin suunnitelma yhden kameran nadiirikuvaukselle samalla Sony α6000 -kameralla kuin viistokuvagimbaalissakin on käytössä. Neljäs lentosuunnitelma (kuva 22) laadittiin noin 150 m:n korkeudelta Sony RX1R II -kameralle. Tältä korkeudelta Sony RX1R II:n kuvan maastopikselin koko (GSD) on sama noin 2 cm kuin 100 m:n korkeudelta Sony α6000:ta käytettäessä. Pituuspeitto oli 90 % ja sivupeitto 80 % kaikissa suunnitelluissa kuvauksissa. Lentonopeus oli 5 m/s.



Kuva 22. Ruutukaappaus VideoDrone Ground Station -ohjelmasta. Lentosuunnitelma laadittu noin 150 m:n korkeudesta tehtävälle kuvaukselle. Kamera Sony RX1R II ja GSD noin 2 cm.

5.4 RPAS-kuvaukset

Kuvaukset suoritettiin Jyväskylän kaupungin omalla VideoDrone-nelikopterilla viistokuvauksien ja 150 m:n korkeudesta tehdyn nadiirikuvauksen osalta 11.6.2019. Toinen nadiirikuvaus 100 m:n korkeudelta suoritettiin 15.8.2019. Sää oli kaikissa kuvaustilanteissa kuiva ja puolipilvinen/pilvinen. Tuulen nopeus Ilmatieteen laitoksen mukaan 4 m/s ja puuskissa 7 m/s. Kuvaukset sujuivat ongelmitta.

6 Aineistojen käsittely ja vertailu

6.1 Aineistojen laskenta

Laskettujen aineistojen nimet ovat seuraavat:

- **Viisto_X1_GCP_100** = Lentokorkeus 100 m. Viistokuvagimbaali. Lentolinjat yhteen suuntaan. Viisi tukipistettä. Sony α6000. 2 082 kuvaa.
- **Viisto_X1_PPK_100** = Lentokorkeus 100 m. Viistokuvagimbaali. Lentolinjat yhteen suuntaan. Yksi tukipiste. PPK-ratkaisu. Sony α6000. 2 082 kuvaa.
- **Viisto_X2_GCP_100** = Lentokorkeus 100 m. Viistokuvagimbaali. Lentolinjat kahteen suuntaan ristikkäin. Viisi tukipistettä. Sony α6000. 4 194 kuvaa.
- **Viisto_X2_PPK_100** = Lentokorkeus 100 m. Viistokuvagimbaali. Lentolinjat kahteen suuntaan ristikkäin. Yksi tukipiste. PPK-ratkaisu. Sony α6000. 4 194 kuvaa.
- **Nadir_α6000_GCP_100** = Lentokorkeus 100 m. Ortokuvagimbaali. Lentolinjat yhteen suuntaan. Viisi tukipistettä. Sony α6000. 1 008 kuvaa.
- **Nadir_α6000_PPK_100** = Lentokorkeus 100 m. Ortokuvagimbaali. Lentolinjat yhteen suuntaan. Yksi tukipiste. PPK-ratkaisu. Sony α6000. 1 008 kuvaa.
- **Nadir_RX1RII_GCP_150** = Lentokorkeus 150 m. Ortokuvagimbaali. Lentolinjat yhteen suuntaan. Viisi tukipistettä. Sony RX1R II. 621 kuvaa.
- **Nadir_RX1RII_PPK_150** = Lentokorkeus 150 m. Ortokuvagimbaali. Lentolinjat yhteen suuntaan. Yksi tukipiste. PPK-ratkaisu. Sony RX1R II. 621 kuvaa.

Koska kahden kameran järjestelmässä ei saada molempia kameroita ottamaan kuvaa täsmälleen yhtä aikaa, pitää laskennassa asettaa PPK-ratkaistut kuvaottopaikat vain esimerkiksi eteenpäin katsovalle kameralle. Ero johtuu muun muassa siitä, että kamerat automaattitarkentavat hieman eri ajassa, koska ne ovat suunnattuina samana

ajankohtana eri kohteisiin. Etukäteen asetettua kiinteää tarkennusta käytettäessä kuvanottoaikojen sijaintiero on pienempi. Taaksepäin katsovalle kameralle täytyy antaa liikkumavaraa sijainnin suhteen. Laskentaohjelma ratkaisee kiinnittämättömän kameralle kuvaottosijainnit laskentaprosessissaan kuvilta näkyvien yhteisten kohteiden avulla. (Mikkola 2019.)

Aineistojen sijainnin määrittäminen tehtiin kahdella eri laskentatavalla. Ensimmäisellä tavalla aineistot kiinnitettiin viiteen tukipisteeseen, jotka sijaitsivat alueen nurkissa ja keskellä (tukipisteet: 1, 3, 5, 7 ja 9). Toisella tavalla laskettaessa käytettiin PPK-ratkaisua ja yhtä tukipistettä alueen keskellä (tukipiste 3).

PPK-paikannuksella laskettavien lentojen kuvanottosijainnit laskettiin VideoDrone RTK Post -ohjelmalla. Kuvanottosijaintien laskennassa ei havaittu ongelmia.

Viistokuvagimbaalin kameralle nimettiin ennen laskennan aloittamista etukameraksi ja takakameraksi. Yhden viistokuvakameran kameroille luotiin omat projektit ja prosessoinnin ensimmäinen vaihe suoritettiin erillisinä toisistaan. Kaksi projektia yhdistettiin sen jälkeen Pix4D:n Merge Projects -toiminnolla. PPK-paikannuksella viistokuvia laskettaessa annettiin aluksi takakameralle liikkumavaraa XY-suunnassa 5x5 m ja korkeussuunnassa 5 m. Laskentaohjelma Pix4D laski jostakin syystä molemmille kameroille omat ratkaisunsa, ja lopputuloksena oli kaksi erillistä pistepilveä noin 30 cm:n korkeuserolla toisiinsa nähden. Kun liikkumavara pienennettiin takakameran osalta 5 cm:iin, niin laskenta meni oikein ja tuloksena oli yksi yhtenäinen pistepilvi. Vaikka kameralle otetaan kuvia hieman eri aikalta, niin korkeussuunnassa eroa kuvien sijaintiin ei juurikaan pääse syntymään. Etukameran sijainnin liikkumavara oli XY-suunnassa 3x3 cm ja korkeussuunnassa 5 cm.

Nadiirikuvausten aineistot laskettiin luvussa 3.2.5 kuvatun normaalin Pix4D:n työnkulun mukaisesti. Laskennan Nadir_α6000_PPK_100 esimerkkiraportti on liitteessä 1.

Pistepilven laskenta-asetukset olivat kaikissa laskennoissa seuraavat: Image Scale (Kuvan mittakaava): ½ (Half Image size, Default), Point Density (Pistetiheys): Optimal, Minimum Number of Matches (Kuvien minimimäärä, joilta kohde havaittava): 6. Kuvan mittakaava tarkoittaa sitä, että ohjelma käyttää puolet pienempiä kuvia laskennassa, jolloin laskenta on nopeampaa. Pistetiheys-valinnan vaihtoehto optimaalinen tarkoittaa sitä, että ohjelma laskee 3D-pisteen joka neljänneltä pikseliltä suhteessa kuvan

mittakaavan valintaan. Kuvan mittakaavan ollessa $\frac{1}{2}$, lasketaan 3D-piste joka kahdeksannelta pikseliltä. Kuvien minimimäärän valinnassa vaihtoehto 6 on maksimiarvo ja soveltuu hyvin projekteihin, joissa on viistokuvia tai isot kuvien päällekkäisyydet. (Pix4D 2014.) Kuva 23 on havainnekuva Viisto_X2_100-laskennan pistepilvestä.



Kuva 23. Viisto_X2_100 laskettu pistepilvi.

Taulukossa 9 on esitetty Pix4D:llä käytetty prosessointiaika. Aikaan on laskettu ainoastaan ohjelman oma prosessointiaika, ei käyttäjän käyttämää aikaa. Laskentatietokoneena käytettiin nk. tehotyöasemaa, jossa oli Intel Xeon W-2155 3.30 GHz -prosessori, NVIDIA Quadro P4000 -näytönohjain, 64 Gt keskusmuistia ja SSD-koval levy. Tukipistepaikannusta käytettäessä käyttäjän aikaa menee jonkin verran enemmän verrattuna PPK-paikannukseen, koska signaalit osoitetaan kuiltä manuaalisesti. Esimerkiksi laskennassa Viisto_X2_GCP_100 yksi signaali oli havaittavissa keskimäärin noin 250 kuiltä.

Taulukko 9. Laskettujen aineistojen prosessointiajat Pix4D:llä.

Prosessointiajat		
Lento	Kuvamäärä	Prosessointiaika
Viisto_X1_PPK_100	2 082	6 h 36 min
Viisto_X1_GCP_100	2 082	6 h 33 min
Viisto_X2_PPK_100	4 194	12 h 0 min
Viisto_X2_GCP_100	4 194	12 h 10 min
Nadir_α6000_PPK_100	1 008	4 h 17 min
Nadir_α6000_GCP_100	1 008	4 h 0 min
Nadir_RX1RII_PPK_150	621	4 h 11 min
Nadir_RX1RII_GCP_150	621	3 h 5 min

Taulukossa 10 on esitetty laskettujen aineistojen pistetiheydet tutkimusalueen keskellä sekä kokonaispistemäärän suhde kuvamäärään. Pistetiheydet ovat melko tarkasti suhteessa kuvamääriin, kun käytetään samaa kameraa. Sony RX1RII -kameralla 150 m:n korkeudelta kuvattu aineisto saavutti lähes saman pistetiheyden kuin alemmaa Sony α6000:lla kuvattu aineisto. Maastopikselikoko näissä eri korkeudelta kuvatuissa aineistoissa oli molemmissa noin 2 cm. (Sony α6000, 100 m = 2,07 cm ja Sony RX1RII, 150 m = 2,15 cm) Pistemäärä suhteessa kuvamäärään on kuitenkin selkeästi suurempi Sony RX1RII:lla kuvattaessa. Tämä johtuu pitkälti siitä, että korkeammalta kuvattuna kuvat kattavat laajemman alueen. Paremmalla kameralla voidaan lentää korkeammalta ja kattaa siten suurempia alueita yhdellä lennolla. Aineistojen tarkkuusvertailut on esitetty luvussa 6.3.1.

Taulukko 10. Laskettujen aineistojen pistetiheydet ja suhde kuvamääriin.

Pistetiheys		
Lento	pts/m ²	pts/kuva
Viisto_X1_100	634	57 900
Viisto_X2_100	1 228	54 950
Nadir_α6000_100	340	61 300
Nadir_RX1RII_150	295	97 700

6.2 Aineistojen käsittely

Fotogrammetrisia pistepilviä ei luokiteltu tai käsitelty mitenkään, vaan vertailut tehtiin kaikilla mahdollisilla pisteillä. Aineistojen korkeustarkkuutta arvioitiin vertaamalla takymetrilla skannattuja maan pinnan tasoja laskettuun pistepilveen. XY-tarkkuutta ja

myös korkeustarkkuutta arvioitiin käyttämällä osaa tukipisteistä kontrollipisteinä. Rakennusten mallintamista arvioitiin vertaamalla skannattuja rakennusten seiniä laskettuihin pistepilviin.

6.3 Aineistojen vertailut

Lasketuista pistepilvistä leikattiin paloja vertailupintojen ja -rakennusten kohdilta, koska pistepilvet olivat niin suuria ja siten sellaisenaan raskaita käyttää. Aineistot vietiin CloudCompare-ohjelmaan, jossa voidaan tehdä kahden eri pistepilven tai mesh-pinnan ja pistepilven vertailua toisiinsa muutamaa eri laskentatapaa käyttäen. CloudCompare on ilmainen ja vapaasti ladattavissa oleva avoimen lähdekoodin ohjelma pistepilvien käsittelyyn.

6.3.1 Tasopintojen vertailut

Takymetrilla skannatut asfaltin pinnat ja samalta kohdilta leikatut osat laskettua pistepilveä vietiin Cloud Compare -ohjelmaan. Skannatut aineistot muodostettiin pinnoiksi Mesh-toiminnolla. Vertailu tehtiin Cloud to Mesh -toiminnolla, jossa ohjelma laskee kohtisuoria etäisyyksiä Mesh-pinnasta valitun pistepilven pisteisiin. Tuloksista saatiin laskettua normaalijakauman keskiarvot ja keskihajonnat. Tulokset on esitetty taulukossa 11 ja liitteessä 3.

Taulukko 11. Skannattujen tasopintojen ja laskettujen pisteiden vertailut. μ = normaalijakauman keskiarvo, σ = keskihajonta.

Tasopintojen vertailut Lento	Tasopinta 1		Tasopinta 2		Tasopinta 3	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ
Viisto_X1_PPK_100	0,013	0,044	0,010	0,023	0,017	0,030
Viisto_X1_GCP_100	0,045	0,042	0,034	0,023	0,028	0,029
Viisto_X2_PPK_100	0,007	0,039	0,011	0,022	0,012	0,027
Viisto_X2_GCP_100	0,047	0,039	0,047	0,024	0,059	0,027
Nadir_α6000_PPK_100	-0,001	0,034	0,007	0,027	0,012	0,033
Nadir_α6000_GCP_100	-0,041	0,035	0,081	0,027	0,031	0,034
Nadir_RX1RII_PPK_150	0,040	0,031	0,040	0,018	0,041	0,023
Nadir_RX1RII_GCP_150	0,044	0,027	0,059	0,018	0,047	0,025

Tuloksista voidaan havaita, että molemmilla paikannustavoilla saavutetaan hyvä korkeustarkkuus. Jos verrataan kaikkien tasopintojen normaalijakauman keskiarvojen keskiarvoja PPK- ja GCP-paikannuksien välillä, havaitaan ero PPK:n hyväksi. PPK-paikannuksen keskiarvo on 0,017 m ja tukipistepaikannuksen 0,040 m. Keskihajontojen keskiarvot ovat ymmärrettävästi samat molemmilla paikannustavoilla.

Viisto- ja nadiirikuvauksia verrattaessa ei korkeustarkkuuksissa tai hajonnoissa syntynyt mainittavia eroja.

Maastomallien tuottaminen kyseisistä aineistoista onnistuu hyvin. Kohina on keskihajonnoista päätellen suhteellisen pientä vaikkakin aineistoista löytyy vertailupinnoista noin 15–25 cm eroavia pisteitä. Nämä on mahdollista suodattaa pois maastomallia tuottaessa erilaisia pistepilven luokittelualgoritmeja käyttäen.

6.3.2 Kontrollipisteiden vertailu

Kontrollipisteinä käytettiin pisteitä 2,4,6,8 ja 10. PPK-ratkaisua käytettäessä kontrollipisteinä toimivat kaikki muut pisteet paitsi kaikilla laskentatavoilla tukipisteenä käytetty piste 3. Pix4D-ohjelmassa tukipisteet voidaan asettaa Check point -muotoon, jolloin niiden avulla voidaan kontrolloida lasketun mallin tarkkuutta eikä niitä käytetä georeferointiin.

Taulukko 12. Kontrollipisteiden erot Pix4D:llä laskettuun malliin nähden.

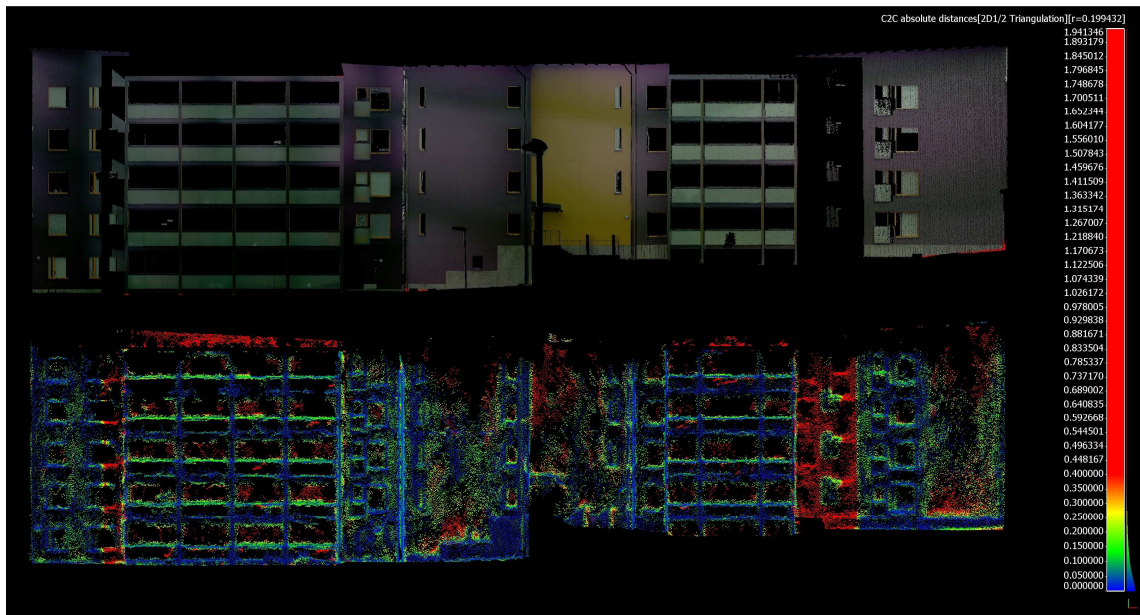
Kontrollipistevertailu Lento	Piste 1			Piste 2			Piste 3			Piste 4			Piste 5		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
Viisto X1 α6000 PPK 100m	0,013	-0,018	0,004	-0,016	-0,012	0,019				0,003	-0,027	0,003	-0,013	-0,002	0,022
Viisto X1 α6000 GCP 100m							Tukipiste			0,007	-0,005	0,005			
Viisto X2 α6000 PPK 100m	-0,004	-0,026	0,013	-0,004	-0,026	0,014				-0,019	-0,020	0,018	-0,005	-0,022	0,015
Viisto X2 α6000 GCP 100m							Tukipiste			-0,005	-0,007	-0,033			
Nadir α6000 PPK 100m	0,011	0,002	0,020	0,016	0,002	0,025				0,015	0,002	0,031	0,020	0,004	0,022
Nadir α6000 GCP 100m							Tukipiste			-0,005	-0,002	-0,024			
Nadir RX1RII PPK 150m	-0,020	-0,036	0,024	-0,008	-0,020	-0,021				-0,013	-0,037	-0,002	-0,003	-0,012	0,004
Nadir RX1RII GCP 150m							Tukipiste			0,000	-0,002	-0,009			

	Piste 6			Piste 7			Piste 8			Piste 9			Piste 10		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
Viisto X1 α6000 PPK 100m	-0,003	-0,017	0,011	-0,003	-0,012	0,016	0,002	-0,022	0,013	0,009	-0,036	0,008	-0,004	-0,023	0,009
Viisto X1 α6000 GCP 100m															
Viisto X2 α6000 PPK 100m	-0,003	-0,004	-0,027				0,008	-0,009	-0,030				-0,002	-0,004	-0,029
Viisto X2 α6000 GCP 100m	-0,009	-0,021	0,009	-0,007	0,000	0,001	-0,013	-0,017	0,016	-0,019	-0,030	0,003	-0,013	-0,019	0,014
Nadir α6000 PPK 100m	0,003	-0,007	-0,035				0,002	0,002	-0,029				0,001	-0,004	-0,039
Nadir α6000 GCP 100m	0,024	0,001	0,003	0,036	0,012	0,005	0,023	0,001	0,006	0,012	-0,004	0,027	0,021	0,002	0,009
Nadir RX1RII PPK 150m	0,005	-0,007	-0,070				-0,005	0,003	-0,002				-0,002	-0,002	-0,029
Nadir RX1RII GCP 150m	-0,001	-0,025	-0,012	0,007	-0,020	-0,013	-0,003	-0,036	-0,012	-0,014	-0,048	0,018	-0,002	-0,032	-0,016
	-0,005	-0,006	-0,028				-0,001	0,001	-0,005				-0,004	0,000	-0,012

Paikannustapojen vertailussa korkeustarkkuudessa ei löytynyt mainittavia eroja. XY-suunnassa PPK-paikannuksen virheiden keskiarvo oli 0,015 m ja tukipistepaikannuksella 0,004 m. Tutkimuksessa oli tavoitteena selvittää, kuinka hyvin PPK-paikannuksen tarkkuus käyttäytyy melko suuria korkeuseroja sisältävän maaston kartoituksessa. Tuloksien mukaan soveltuu erittäin hyvin eikä mainittavia virheitä löytynyt.

6.3.3 Seinäpintojen vertailu

Fotogrammetrisista pistepilvistä leikattiin referenssirakennusten kohdilta kaikki muut paitsi seiniin muodostuneet pisteet ja niitä verrattiin takymetrilla skannattuihin seinäpintoihin. Vertailussa käytettiin Cloud Compare -ohjelman Cloud to Cloud -laskentaa, jolla voidaan verrata kahta eri pistepilveä toisiinsa. Vertailuasetukseksi valittiin Local Modeling ja 2D $\frac{1}{2}$ triangulation, joka soveltuu paremmin sellaisten aineistojen vertailuun, jotka sisältävät jyrkkiä kulmia. (Cloud Compare 2019) Skannattu pistepilvi toimi referenssiaineistona eli aineistona, josta etäisyyksiä lasketaan toiseen aineistoon. Tuloksien väriskaalan Saturation-arvoa muutettiin 40 cm:iin, jotta erot ovat paremmin havaittavissa havainnekuvin. Voidaan karkeasti arvioida, että siniset pisteet kuvissa ovat käyttökelpoisia mittaus- ja mallintamistarkoituksiin, koska niiden ero skannatuista seinäpinnoista on noin <10 cm. Tämä toimenpide oli tarpeen, sillä aukot skannatuissa aineistoissa aiheuttavat niin suuria eroja vertailuaineistoihin. Vertailukuvat ovat liitteessä 4.



Kuva 24. Esimerkkirakennus 2:n vertailukuva skannatun aineiston ja Viisto_X1_GCP_100:n välillä.

Taulukossa 13 näkyvät laskettujen pisteiden lukumäärät skannatuilla referenssisseinäpinnoilla. Pistemääristä voidaan havaita, että viistokuvauksissa pistemäärä melko tarkasti kaksinkertaistuu, kun kuvien määrä kaksinkertaistuu. Ristikkäisillä lentolinjoilla lennettäessä (Viisto_X2_100) saadaan 5 % enemmän seinäpisteitä suhteessa kuvamääriin kuin yhteen suuntaan lennettäessä (Viisto_X1_100). Samalta korkeudelta kuvatun nadiirikuvauksen (Nadir_α6000_100) pistemäärät suhteessa kuvamääriin ovat 12,9 % pienemmät yhteen suuntaan lennetyn viistokuvauksen pistemääristä ja 18,8 % pienemmät kahteen suuntaan lennetyistä.

Kahdessa eri nadiirikuvauksessa kuvauskorkeuden noustessa 50 metrillä pistemäärät putoavat 1-kerroksisissa rakennuksissa. Kerrostalon tapauksessa pistemäärät ovat melkein samat (51 200 ja 47 700). Liitteessä 4 olevista vertailukuvista voidaan päätellä, että 150 m:n korkeudesta tehdystä nadiirikuvauksesta on hankala mallintaa 1-kerroksisten rakennusten seinärakenteita. Molempien nadiirikuvauksien maastopikselikoko oli noin 2 cm.

Liitteessä 4, kuvassa "Nadir_RX1R11_150, rakennus 1" toiselta seinältä lähes täysin puuttuvat pisteet johtuvat lentosuunnitelmassa tehdystä virheestä, jossa lentolinjat jäivät hieman liian lyhyiksi eikä pisteitä muodostunut normaaliin tapaan rakennuksen pohjoispuolen seinäpinnalle.

Taulukko 13. Laskettujen pisteiden lukumäärä vertailuseinissä.

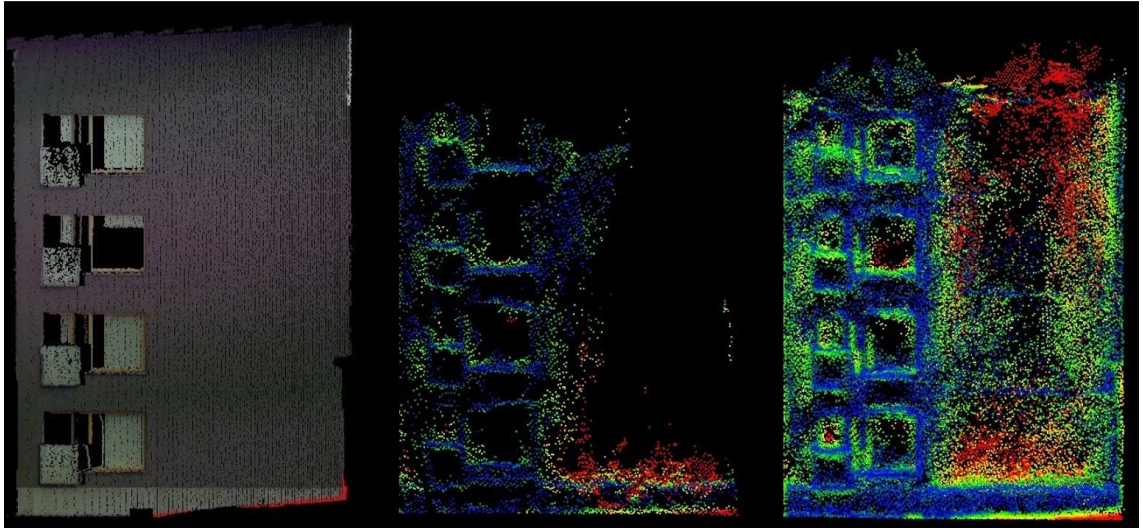
Pistemäärät vertailuseinissä			
Lento	Rakennus 1	Rakennus 2	Rakennus3
Viisto_X1_100	19 250	123 700	14 600
Viisto_X2_100	50 300	249 600	31 700
Nadir_α6000_100	10 200	51 200	8 400
Nadir_RX1RII_150	3 200	47 700	3 500

Taulukossa 14 esitetään vertailuseiniin laskennassa muodostuneiden pisteiden tarkkuutta. Prosenttilukemat kuvaavat niiden pisteiden osuutta, jotka ovat alle 10 cm:n etäisyydellä skannatuista seinäpinnoista. Prosentit eivät ole absoluuttisia ja niitä voidaan vertailla vain toisiinsa, sillä skannattuiden seinäpintojen aukot aiheuttavat virhettä prosentteihin. Esimerkiksi rakennuksen 2 kohdalla aukon vaikutus pienentää lukemia kahdella prosenttiyksiköllä. Ennako-olettama oli, että viistokuvauksista lasketuista aineistoista saataisiin suhteessa enemmän tarkempia pisteitä kuin nadiirikuvauksista. Prosentteja tarkastellessa tämä ei näytä pitävän paikkaansa, vaan kaikissa kuvauksissa tarkkojen pisteiden suhde epätarkkoihin on melko tarkalleen sama. Liitteessä 3 esitetyistä vertailukuvista ja kuvasta 25 havaitaan, että tasaisilla, vähästruktuurisilla seinäpinnoilla laskettujen aineistojen tarkkuus heikkenee merkittävästi. Nadiirikuvauksissa pisteitä ei muodostu juuri ollenkaan ja viistokuvauksissa pisteitä muodostuu, mutta niiden tarkkuus on huono.

Taulukko 14. Niiden laskettujen seinäpisteiden osuus kaikista lasketuista seinäpisteistä, joiden etäisyys skannatuista pisteistä alle 10 cm.

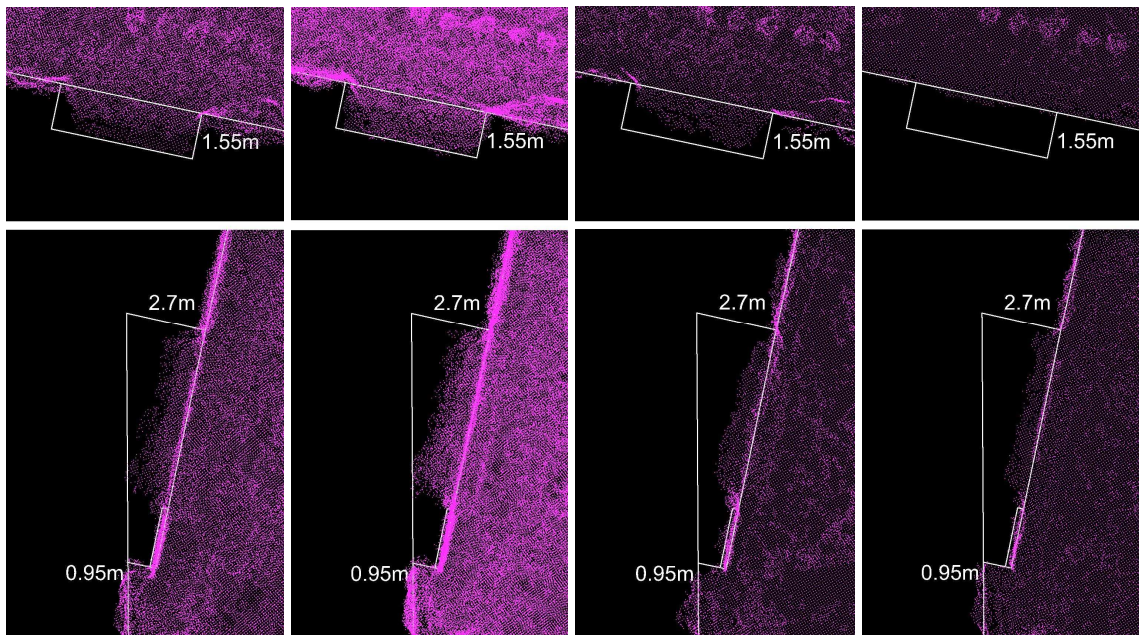
Pisteitä <10 cm vertailuseinissä				
Lento	Rakennus 1	Rakennus 2	Rakennus 3	Keskiarvo
Viisto_X1_100	60 %	56 %	62 %	59 %
Viisto_X2_100	59 %	54 %	57 %	57 %
Nadir_α6000_100	62 %	58 %	58 %	59 %
Nadir_RX1RII_150	64 %	62 %	58 %	61 %

Vertailukuvista liitteessä 4 ja kuvasta 25 voidaan myös havaita, että rakennus 2:n tapauksessa viistokuvista lasketuissa aineistoissa on noin 1,5 m korkeammalle muodostuneita seinäpisteitä. Rakennus 2 on kerrostalo, mutta siinä räystäslinja on 80 cm:n päässä seinälinjasta.



Kuva 25. Tasainen, vähästruktuurinen seinäpinta. Skannattu, Nadir_α6000_100 ja Viisto_X2_100.

Sisennyksien kartoittamista pistepilvistä tarkasteltiin vertaamalla laskettuja pistepilviä keskenään Rakennus 1:n kahden sisennyksen osalta. Sisennysten korkeus molemmissa oli 3 m ja syvyydet 0,95–2,7 m. Pisteitä muodostui hyvin sisennyksen lattiapintaan, mutta missään aineistossa ei pisteitä muodostunut sisennyksen seinäpintoihin, mitä seinälinjojen mittaaminen luotettavasti edellyttäisi. Kuvassa 26 on esitetty laskettujen aineistojen pisteet sisennysten kohdilta ilman kattopisteitä.



Kuva 26. Laskettujen pisteiden muodostuminen sisennyksissä. Vasemmalta Viisto_X1_100, Viisto_X2_100, Nadir_α6000_100 ja Nadir_RX1RII_150.

6.4 Mallintaminen

Kattopintojen mallintamista laserkeilausaineistoista on tehty Jyväskylän kaupungilla jo vuosia. Työtä on tehty Terrasolid-ohjelmilla. Seinät rakennuksille on normaalisti muodostettu kattopinnan reunoista suoraan alas vetämällä. Trimble Locuksen viime vuosien mallinnustyökalujen kehittyttyä voidaan ohjelmaan viedä kattopinnot ja muodostaa 3D-rakennukset mitattua kivijalkavektoria hyödyntäen. Siten seinälinja jakaa kattopinnasta räystäät omiksi kohteikseen. Kaikkia vanhoja rakennuksia ei ole mitattu maastossa, vaan niiden kivijalkavektorit voivat olla peräisin esimerkiksi vanhasta stereokartoituksesta. Näiden rakennusten kivijalkavektorien tarkkuus ei yleensä riitä 3D-rakennuksen muodostamiseen.

Fotogrammetrisista pistepilvistä on mallinnettu noin 50 rakennuksen kattopinnot. Kehittyneemmän lentotoiminnan ja paremman kameran ansiosta pistepilvien kohina on jo niin pientä, että pistepilveä luokittelemalla mallintaminen onnistuu hyvin TerraScan-työkaluilla.

Liitteessä 3 esitetyistä kuvista voidaan päätellä, että mitä enemmän kuvia on otettu, sitä enemmän saadaan seiniin pisteitä ja rakennusten mallintaminen helpottuu. Nadiirikuvausten aineistoista voidaan arvioida, että useimmissa tapauksissa seinälinjan kartoittaminen onnistuu. Kun kuvataan viistoon ja kuvamäärä kasvaa, voidaan paremmin mallintaa myös seinärakenteita ja yksityiskohtia.

6.5 Teksturointi

Mallinnettujen rakennusten teksturointia on tehty tähän saakka käyttäen helikopterilla kuvattuja viistokuvia. Kamerana oli viimeisimmässä vuonna 2018 tehdyssä kuvauksessa Vexcel Ultacam Osprey Prime II. Kameran kuvien maastopikselikoko on nadiirissa noin 5 cm 770 m:n korkeudelta kuvattuna, joten ne kelpaavat teksturointitarkoituksiin Jyväskylän kaupungin kokemusten mukaan hyvin. Kuvasta 27 havaitaan, että helikopterikuvista teksturoidut rakennukset näyttävät hyviltä lintuperspektiivistä ja kauempaa katsottuina. Katunäkymää tarkasteltaessa rakennusten teksturoinnissa näkyy epätarkkuuksia.



Kuva 27. Helikopterikuvista teksturoituja rakennuksia.

RPAS-viistokuvausten kuvia voidaan käyttää rakennusten teksturoinnissa. Prosessi on samantyyppinen kuin helikopterilla ja usean kameran ilmakuvauuskameroiden kuvien käsittely. Pix4D:llä suoritetun viistokuvablokin alkuprosessoinnin jälkeen ohjelmasta saadaan kamerakalibrointi, tarkat kuvanottoaikat ja kameran asentotiedot. Nämä tiedot viedään TerraPhoto-ohjelmaan ja mallinnetut rakennukset voidaan teksturoida.

7 Yhteenveto

Kaavan pohjakartta on muutoksessa. Tietomallipohjaisen suunnittelun kehittyminen on ajanut ohi vanhoista 2D-esitystapaa käyttävistä aineistoista. Tulevaisuuden suunnittelun lähtöaineisto on kokoelma eri lähteistä koostetusta ajantasaisista aineistoista, joista jokaista koskevat omat ohjeistukset ja validoinnit. Yksi näistä aineistoista on kuntien ja kaupunkien 3D-kantakartta eli kaupunkimalli. Kaupunkimallin ylläpitämisessä on RPAS-laitteilla merkittävä rooli. Yksi lento kaupunginosan yllä tuottaa tosiortokuvan sekä pistepilven visualisointiin, mallinnukseen ja korkeusmallituotantoon. Kun lisätään kiinteistötiedot, lähtötiedot tulevaisuuden kaavan pohjakarttaan ovat kasassa.

Pistepilvien kerääminen on vuosi vuodelta nopeampaa ja edullisempaa. Niiden käyttö suunnittelussa tulee kasvamaan ja ne tulee voida liittää helpommin sellaisinaan suunnitteluprosesseihin.

RPAS-laitteiden kehitys on ollut nopeaa. Laitteesta on tullut nopeasti yksi tärkeä mittausväline lisää kuntien ja kaupunkien mittaustoimintaan. Nykyisillä kuormankantokyvyillä ja lentoajoilla voidaan kuvata jo kaupunginosakokoisia alueita. SfM-tekniikan kehittyminen on tuonut mahdolliseksi nopeasti ja joustavasti tuotetut tarkat tosiortokuvat sekä tiheät ja tarkat kuvilta prosessoidut pistepilvet. Näiden aineistojen tarkkuus on parantunut laitteiden ja menetelmien kehittymisen myötä. Avoimessa kaupunkiympäristössä menetelmä on riittävän tarkka ja hyvin kustannustehokas verrattuna laserkeilaukseen.

1.7.2020 alkaen sovellettavat uudet säädökset koskien miehittämättömien ilma-alusten ja lennokkien toimintaa eivät juurikaan muuta kartoitustoimintaa entisestä. Rekisteröitymispakko ja verkkotentin suorittaminen ovat yleisesti toimintaa selkeyttäviä asioita. Lentokorkeuden lasku 120 metriin on kuitenkin huono asia. Hyvällä kameralla, kuten Sony RX1RII:lla, kuvattaessa 150 m:n lentokorkeuden säilyttäminen olisi ollut hyödyllistä.

PPK-paikannuksen käyttäminen yhdellä tukipisteellä tuottaa tarkat pistepilvet tehokkaasti. Vertailuissa ei havaittu epätarkkuuksia, ja paikannustapa toimi hyvin myös suuria korkeuseroja sisältävässä maastossa. Tehokkuus lisääntyy sekä maastossa että aineistoja prosessoidessa. RPAS-laitteen lennättäjä voi ajaa kohdealueen keskelle ja tehdä yhden tukipisteen ajoneuvon viereen. Sen mitattua voidaan suorittaa lento samalta

paikalta. Aikaa säästyy myös prosessoidessa, sillä suuria kuvamääriä sisältävissä aineistoissa tukipisteiden osoittamistyö kuvilta pienenee viidesosaan verrattuna viidellä tukipisteellä tehtävään tukipistepaikannukseen.

Viistokuvilta laskettu pistepilvi on tarkka ja käyttökelpoinen lähtöaineisto kartoituksiin ja suunnitteluun. Pistepilven korkeustarkkuudessa ei havaittu eroa viistokuvauksien ja samalta korkeudelta kuvatun nadiirikuvauksen välillä. Viistokuvauksista tuotetut pistepilvet eivät kuitenkaan tuoneet juurikaan lisäarvoa rakennusten mallintamista ajatellen. Rakennusten seinälinjat voitiin kartoittaa hyvin myös nadiiriaineistoista, eivätkä viistokuva-aineistot tuoneet apua melko pienienkään sisennysten kartoittamiseen. Viistokuvauksista laskettujen pistepilvien seiniin muodostuneiden pisteiden tarkkuudet eivät olleet parempia kuin nadiirikuvauksissa.

Tutkimus toi esiin mahdollisia lisätutkimusaiheita. Tutkimuksessa käytettiin viistokuvagimbaalia, jossa kamerat olivat verraten vähän kallellaan nadiiriin nähden. Suuremmilla kallistuskulmilla voitaisiin saada enemmän laskettuja pisteitä esimerkiksi rakennusten sisennyksiin. Kallistuskulmat aina 45 asteeseen saakka olisi mielenkiintoista tutkia. Sfm-tekniikassa voidaan hyödyntää kuvia lähes mistä lähteestä tahansa. Voisiko kattavan fotogrammetrisen pistepilven tuottaa RPAS-laitteella kuvatuista viistokuvista ja ajoneuvolla kuvatuista katunäkymäkuvista? Tällaisessa pistepilvessä ei käytännössä olisi katuverkon ympäristössä katveita laisinkaan. Myös RPAS-laitteella kuvattujen viistokuvien hyödyntäminen mallinnettujen rakennusten teksturoinnissa olisi mielenkiintoinen tutkimusaihe.

Lähteet

Alam, N., Coors, V., Zlatanova, S., & Oosterom, P. V. 2011. Shadow effect on photovoltaic potentiality analysis using 3D city models. In Proceedings of the Joint ISPRS Workshop on 3D City Modelling & Applications and the 6th 3D GeoInfo Conference (s. 26–28).

Benner, J., Geiger, A., Leinemann, K. 2005. Flexible generation of semantic 3D building models. In: Gröger, Kolbe (eds.) 1st Intern. ISPRS/EuroSDR/DGPF-Workshop on Next Generation 3D City Models. Bonn, Germany, EuroSDR Publication No. 49.

Cloud Compare Version 2.6.1 User Manual. 2019. Verkkoaineisto. <<http://www.cloudcompare.org/doc/qCC/CloudCompare%20v2.6.1%20-%20User%20manual.pdf>> Luettu 26.8.2019.

Colomina I. & Molina P. 2014. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 92, s. 79–97.

Dharmapuri Srinu & Tully Mike. 2018. Evolution of Point Cloud. Lidar magazine. Verkkoaineisto. <<https://lidarmag.com/2018/07/16/evolution-of-point-cloud/>> Luettu 19.6.2019.

Do RTK/PPK drones give you better results than GCPs? 2019. Verkkoaineisto. Pix4D. <<https://www.pix4d.com/blog/rtk-ppk-drones-gcp-comparison>> Luettu 25.6.2019.

Eisenbeiss Henri. 2009. UAV photogrammetry. Ph.D. Thesis. Institute for Geodesy and Photogrammetry, ETH Zürich, Switzerland.

Eisenbeiss Henri. 2004. A Mini Unmanned Aerial Vehicle (UAV): System Overview and Image Acquisition. Institute for Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, Switzerland.

Elkaim Gabriel, Lie Fidelis, Gebre-Egziabher Demoz. 2014. Principles of guidance, navigation and control of UAVs. Teoksessa: Valavanis, K., Vachtsevanos, G., Handbook of Unmanned Aerial Vehicles. Springer. s. 1600.

Eltner Anette, Kaiser Andreas, Castillo Carlos, Rock Gilles, Neugirg Fabian, Abellán Antonio. 2016. Image-based surface reconstruction in geomorphometry -merits, limits and developments. Earth Surface Dynamics, 4, s. 359–389.

European Drones Outlook Study. Unlocking the value for Europe. 2016. SESAR, Single European Sky ATM Research.

Fritsch Dieter, Becker Susanne, Rothermel Mathias. 2013. Modeling Facade Structures Using Point Clouds from Dense Image Matching. Proc. of The Intl. Conf. on Advances in Civil, Structural and Mechanical Engineering, CSM 2013.

GeoDrone X4L. 2019. Verkkoaineisto. VideoDrone Finland Oy.
<<https://videodrone.fi/geodrone-x4l/>> Luettu 19.6.2019.

Gerke M., Nex F., Remondino F., Jacobsen K., Kremer J., Karel W., Hu H., Ostrowski W. 2016. Orientation of Oblique Airborne Image Sets – Experiences from the ISPRS/EUROSDR Benchmark on Multi-Platform Photogrammetry. XXIII ISPRS Congress, 12–19 July 2016. Prague, Czech Republic.

Global Trends of Unmanned Aerial Systems. 2019. DTI, Danish Technological Institute. In cooperation with AUVSI Association for Unmanned Vehicle Systems International. Taastrup.

Gröger Gerhard, Kolbe Thomas H., Nagel Claus, Häfele Karl-Heinz. 2012. OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard. Open Geospatial Consortium.

Haala Norbert. 2013. The Landscape of Dense Image Matching Algorithms. Photogrammetric Week 2013, Wichmann Verlag, Berlin/Offenbach, s. 271–284.

Haala Norbert, Mathias Rothermel and Stefan Cavegn. 2015. Extracting 3D Urban Models from Oblique Aerial Images. Institute of Photogrammetry, Stuttgart University.

Haggrén Henrik, Koistinen Katri. 2003. Fotogrammetrian perusteet, luento 7: fotogrammetrinen mittausprosessi. Aalto-yliopiston rakennetun ympäristön mittauksen ja mallinnuksen instituutin luentomateriaali. Verkkoaineisto. Aalto-yliopisto.
<<http://foto.aalto.fi/opetus/300/luennot/7/7.html>> Muutettu 2005. Luettu 26.7.2019.

HxGN SmartNet. 2019. Rinex lataus. Verkkoaineisto. Hexagon Geosystems.
<<https://hxgnsmartnet.com/fi-fi/services/rinex-lataus>> Luettu 13.8.2019.

Hyötykuormat. 2019. Verkkoaineisto. VideoDrone Finland Oy.
<<https://videodrone.fi/hyotykuormat/>> Luettu 26.7.2019.

Höhle Joachim. 2008. Photogrammetric Measurements in Oblique Aerial Images. Photogrammetrie, Fernerkundung, Aalborg University

INSPIRE-direktiivi. Verkkoaineisto. Maanmittauslaitos.
<<https://www.maanmittauslaitos.fi/kartat-ja-paikkatieto/paikkatietojen-yhteiskaytto/inspire>>. Luettu 17.7.2019.

James, Mike R., Robson Stuart. 2014. Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. Earth Surf. Process. Landforms 2014, 39, s. 1413–1420.

JHS 185. 2014. Asemakaavan pohjakartan laatiminen. Julkisen hallinnon neuvottelukunta.

Kolbe Thomas H., Nagel Claus, & Stadler Alexandra. 2009. CityGML– OGC Standard for Photogrammetry. 52nd Photogrammetric week, Stuttgart, Germany.

Koko EU:n kattavat drone-asetukset on julkistettu. 2019. Verkkoaineisto. Traficom. <<https://www.traficom.fi/fi/ajankohtaista/koko-eun-kattavat-drone-asetukset-julkistettu>> Tiedote julkaistu 13.6.2019. Luettu 13.6.2019.

Korkeusmallit. Verkkoaineisto. Maanmittauslaitos. <<https://www.maanmittauslaitos.fi/tutkimus/teematietoa/korkeusmallit>>. Luettu 25.7.2019.

Kuntapilotti, loppuraportti 20.6.2019. 2019. Sitowise, Trimble, Symetri, Ae Partners.

Laserkeilausaineistoja ja ilmakuvia päivitetään jatkossa tiheämmin. 2019. Verkkoaineisto. Maanmittauslaitos. <<https://www.maanmittauslaitos.fi/ajankohtaista/laserkeilausaineistoja-ja-ilmakuvia-paivitetaan-jatkossa-tiheammin>> Luettu 11.10.2019.

Leica Nova MS50 Datasheet. 2013. Verkkoaineisto. Leica Geosystems AG. <http://www.leicageosystemsdares.com/download/Leica_Nova_MS50_DAT_us.pdf> Luettu 13.8.2019.

Mikkola Juhani, Teknologiajohtaja. VideoDrone Oy. Muurame. Haastattelu 23.7.2019 klo 9:00–10:30.

Nagel Claus, Stadler Alexandra, Kolbe Thomas H. 2009. Conceptual Requirements for The Automatic Reconstruction of Building Information Models from Uninterpreted 3D Models. Institute for Geodesy and Geoinformation Science, Technical University of Berlin.

Nesbit Paul Ryan, Hugenholtz Christopher H. 2018. Enhancing UAV-SfM 3D Model Accuracy in High-Relief Landscapes by Incorporating Oblique Images. Artikkel: Remote Sensing. Julkaistu 24.1.2019.

Ohjeita dronen lennättäjille. 2019. Verkkoaineisto. ANS Finland. <<https://ansfinland.fi/fi/palvelumme/palvelut-ilmatilan-kayttajille/dronen-lennattajille>> Luettu 26.7.2019.

Ostrowski W. & Bakula K. 2016. Towards Efficiency of Oblique Images Orientation. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-3/W4, 2016.

Pix4Dmapper 4.1 User Manual. 2014. Pix4D.

Rakennukset ja rakenteet käsitelmä. 2019. Verkkoaineisto. Paikkatietoalusta. <<http://www.paikkatietoalusta.fi/kunnille/kasitemallit/rakennukset-ja-rakenteet-kasitemalli>> Luettu 18.7.2019.

Remondino Fabio, Gerke Markus. 2015. Oblique Aerial Imagery – A Review. ResearchGate Conference Paper.

Remondino F., Barazetti L., Nex F., Scaioni M., Sarazzi D. 2011. UAV Photogrammetry for Mapping and 3D Modeling – Current Status and Future Perspectives -. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVIII-1/C22, 2011. ISPRS Zurich 2011 Workshop, 14-16 September 2011, Zurich, Switzerland

RPAS tilastoja. 2019. Verkkoaineisto. Traficom.
<https://www.droneinfo.fi/fi/lentotyto/rpas_tilastot> Luettu 26.7.2019

Seifert Erich, Sifert Stefan, Vogt Holger, Drew David, van Aardt Jan, Kunneke Anton, Sifert Thomas. 2019. Influence of Drone Altitude, Image Overlap, and Optical Sensor Resolution on Multi-View Reconstruction of Forest Images. Artikkel: Remote Sensing. Julkaistu 27.5.2019.

Strategic Concept of Employment for Unmanned Aircraft Systems in NATO. 2010. JAPCC, Joint Air Power Competence Center.

Study analysing the current activities in the field of UAV. First Element: Status. 2007. European Commission, Enterprise and Industry Directorate-General. ENTR/2007/065. Frost & Sullivan.

Suomen ilmailun turvallisuusohjelma. 2018. Verkkoaineisto. Traficom.
<https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/publication/Suomen_ilmailun_turvallisu_suhjelma_2018_%28FASP_2018%29.pdf> Luettu 11.6.2019

Tietoa KMTK:sta. Verkkoaineisto. KMTK Kansallinen maastotietokanta.
<<http://kmtk.paikkatietoalusta.fi/tietoa-kmtksta>>. Luettu 17.7.2019.

Tietoa paikkatietoalustasta. Verkkoaineisto. Paikkatietoalusta.
<<http://www.paikkatietoalusta.fi/tietoa-paikkatietoalustasta>> Luettu 17.7.2019.

Trimble Locus 18.2 käyttöohje. 2019. Trimble Solutions Oy. Luettu 13.8.2019.

Unmanned Aircraft Systems. Aerospace Forecast 2019-2039. 2019. Verkkoaineisto. FAA, Federal Aviation Administration.
<https://www.faa.gov/data_research/aviation/aerospace_forecasts/media/Unmanned_Aircraft_Systems.pdf> Luettu 12.6.2019.

Väestötilastot. 2019. Verkkoaineisto. Jyväskylän kaupunki.
<<https://www.jyvaskyla.fi/jyvaskyla/tilastot/vaestotilastot>> Luettu 9.10.2019.

Watts Adam C., Ambrosia Vincent G., Hinkley Everett A. 2012. Unmanned Aircraft Systems in Remote Sensing and Scientific Research: Classification and Considerations of Use. Remote Sensing 2012, 4, s. 1671–1692.

Zhang He, Aldana-Jague Emilien, Clapuyt Francois, Wilken Florian, Vanacker Veerle, Van Oost Kristof. 2019. Evaluating the Potential of PPK Direct Georeferencing for UAV-SfM Photogrammetry and Precise Topographic Mapping. Earth Surface Dynamics Discussions 2019.

3D-muodostamisohjeet. 2018. Rakennukset ja rakenteet. Kommentoitava versio. Verkkoaineisto. KMTK Kansallinen maastotietokanta. <https://pta-files-prod.s3.eu-west-1.amazonaws.com/pta-public/attachments/2018/05/2018-05-23_3D-muodostamisohjeet_Kommentoitava_versio_0.pdf?VY_uUdr0kYkGxQpz.q2t07B4aaNh8xBt> Luettu 17.7.2019.

Liite 1. Pix4D-raportti laskennasta Nadir_α6000_PPK_100

Quality Report

Generated with Pix4Dmapper version 4.4.4 Pro

1 Important: Click on the different icons for:

- Help to analyze the results in the Quality Report
- Additional information about the sections

Click [here](#) for additional tips to analyze the Quality Report

Summary

Project	PPK26_0/2
Processed	2019-08-22 09:37:33
Camera Model Name(s)	ILCE-6000_E20mmF2.8_200_6000x4000 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	2.07 cm / 0.81 in
Area Covered	0.272 km ² / 27.2150 ha / 0.11 sq mi / 67.2944 acres
Time for Initial Processing (without report)	54m:44s

Quality Check

1 Images	median of 70563 keypoints per image	✓
2 Dataset	100% out of 1006 images calibrated (100%), all images enabled	✓
3 Camera Optimization	0.02% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	✓
4 Matching	median of 2507.6 matches per calibrated image	✓
5 Georeferencing	yes, no 3D GCP	⚠

Preview



Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before identification.

Calibration Details

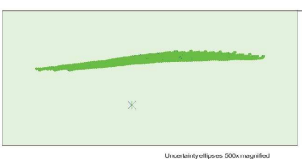


Figure 2: Top view of the initial image position. The green line follows the position of the images in time starting from the target size dot.

1 Absolute camera position and orientation uncertainties

	X [m]	Y [m]	Z [m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.005	0.005	0.002	0.003	0.002	0.001
Sigma	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

2 Overlap

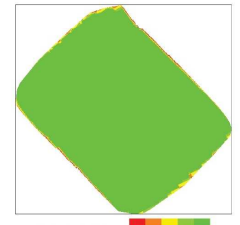


Figure 4: Number of overlapping images considered for each pixel of the orthomosaic. Red and yellow areas indicate low overlap for which poor results may be generated. Green areas indicate an overlap of 4 or 5 images for every pixel. Good quality results will be generated as long as the number of keypoint matches is also sufficient for these areas (see Figure 5 for keypoint matches).

Bundle Block Adjustment Details

Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	28480109
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	4913426
Mean Reproduction Error [pixels]	0.242

Number of Calibrated Images	1006 out of 1006
Number of Geocoded Images	1006 out of 1006

3 Initial Image Positions

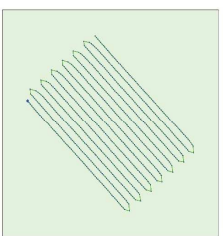
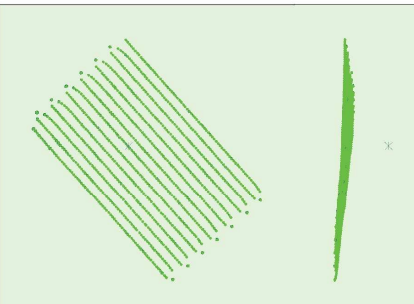


Figure 2: Top view of the initial image position. The green line follows the position of the images in time starting from the target size dot.

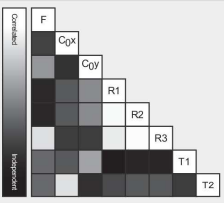
4 Computed Image/GCPs/Manual Tie Points Positions



5 Internal Camera Parameters

ILCE-6000_E20mmF2.8_20_0_6000x4000 (RGB). Sensor Dimensions: 23.333 [mm] x 15.556 [mm]

	Focal Length	Principal Point X	Principal Point Y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	5142.857 [pixel] 20.000 [mm]	2000.000 [pixel] 11.967 [mm]	2000.000 [pixel] 7.778 [mm]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Optimized Values	5147.495 [pixel] 19.995 [mm]	2051.950 [pixel] 11.400 [mm]	2040.638 [pixel] 7.627 [mm]	-0.028	0.052	-0.024	0.001	-0.001
Uncertainties (Sigma)	0.328 [pixel] 0.001 [mm]	0.036 [pixel] 0.000 [mm]	0.032 [pixel] 0.000 [mm]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000



The correlation between camera internal parameters determined by the bundle adjustment. White indicates a full compensation between the parameters, i.e. any change in one can be fully compensated by the other. Black indicates that the parameter is completely independent, and is not affected by other parameters.

The number of Automatic Tie Points (ATPs) per pixel, averaged over all images of the camera model, is color coded between black and white. White indicates that, on average, more than 16 ATPs have been extracted at the pixel location. Black indicates that, on average, 0 ATPs have been extracted at the pixel location. Click on the image to see the average direction and magnitude of the tie projection error for each pixel. Note that the vectors are scaled for better visualization. The scale bar indicates the magnitude of 1 pixel error.

6 2D Keypoints Table

	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	70563	26208
Min	34308	10255
Max	91803	44561
Mean	69092	28315

7 3D Points from 2D Keypoint Matches

	Number of 3D Points Observed
In 2 Images	3584312
In 3 Images	1269221
In 4 Images	627371
In 5 Images	302594
In 6 Images	230583
In 7 Images	159420
In 8 Images	114473
In 9 Images	86203
In 10 Images	67906

In 11 Images	5548
In 12 Images	48010
In 13 Images	23251
In 14 Images	28320
In 15 Images	24235
In 16 Images	21066
In 17 Images	19462
In 18 Images	19297
In 19 Images	14562
In 20 Images	17901
In 21 Images	11468
In 22 Images	10410
In 23 Images	9744
In 24 Images	8679
In 25 Images	7605
In 26 Images	6889
In 27 Images	6179
In 28 Images	5517
In 29 Images	5394
In 30 Images	4840
In 31 Images	4332
In 32 Images	4228
In 33 Images	4097
In 34 Images	3715
In 35 Images	3611
In 36 Images	3394
In 37 Images	3024
In 38 Images	2843
In 39 Images	2527
In 40 Images	2343
In 41 Images	2388
In 42 Images	2094
In 43 Images	2019
In 44 Images	2006
In 45 Images	1853
In 46 Images	1906
In 47 Images	1546
In 48 Images	1436
In 49 Images	1365
In 50 Images	1294
In 51 Images	1221
In 52 Images	1241
In 53 Images	1178
In 54 Images	1167
In 55 Images	1151
In 56 Images	1027
In 57 Images	948
In 58 Images	728
In 59 Images	485
In 60 Images	276
In 61 Images	160
In 62 Images	110
In 63 Images	71
In 64 Images	50
In 65 Images	37
In 66 Images	15
In 67 Images	10
In 68 Images	13
In 69 Images	5

Localization accuracy per GCP and mean errors in the three coordinate directions. The last column counts the number of calibrated images where the GCP has been automatically verified - vs. manually marked.

Absolute Geolocation Variance

Min Error [m]	Max Error [m]	Geolocation Error X [%]	Geolocation Error Y [%]	Geolocation Error Z [%]
-	-0.08	0.00	0.20	0.60
-0.08	-0.06	0.00	0.10	0.60
-0.08	-0.05	0.20	0.20	0.10
-0.05	-0.03	0.50	0.30	1.10
-0.03	-0.01	4.77	4.77	9.84
-0.01	0.00	46.82	45.13	36.06
0.00	0.01	43.54	43.94	37.67
0.01	0.03	3.68	4.67	11.03
0.03	0.05	0.10	0.10	2.49
0.05	0.06	0.20	0.10	0.30
0.06	0.08	0.10	0.10	0.10
0.08	-	0.00	0.40	0.00
Mean [m]	-0.000551	-0.000127	-0.000057	
Sigma [m]	0.009643	0.011750	0.016755	
RMS Error [m]	0.009508	0.011750	0.016755	

Min Error and Max Error represent geolocation error intervals between -1.5 and +1.5 times the maximum accuracy of all the images. Columns X, Y, Z show the percentage of images with geolocation errors within the specified error intervals. The geolocation error is the difference between the initial and computed image positions. Note that the image geolocation errors do not correspond to the accuracy of the observed 3D points.

Relative Geolocation Variance

Relative Geolocation Error	Images X [%]	Images Y [%]	Images Z [%]
[1.00, 1.00]	98.91	98.51	98.51
[2.00, 2.00]	99.90	99.20	99.80
[3.00, 3.00]	100.00	100.00	100.00
Mean of Geolocation Accuracy [m]	0.000000	0.000000	0.000000
Sigma of Geolocation Accuracy [m]	0.000000	0.000000	0.000000

Images X, Y, Z represent the percentage of images with a relative geolocation error in X, Y, Z.

Initial Processing Details

System Information

Hardware	CPU: Intel(R) Xeon(R) W2155 CPU @ 3.30GHz RAM: 64 GB GPU: NVIDIA Quadro P4000 (Driver: 24.21.14.1163), Dell/Webs Development/Micro Driver 64-bit (Driver: unknown)
Operating System	Windows 10 Enterprise, 64-bit

Coordinate Systems

Image Coordinate System	ETRS89 / OKBFIN (2D)
Output Coordinate System	ETRS89 / ETRS-OKBFIN (2D)

Processing Options

Detected Template	No Template Available
-------------------	-----------------------

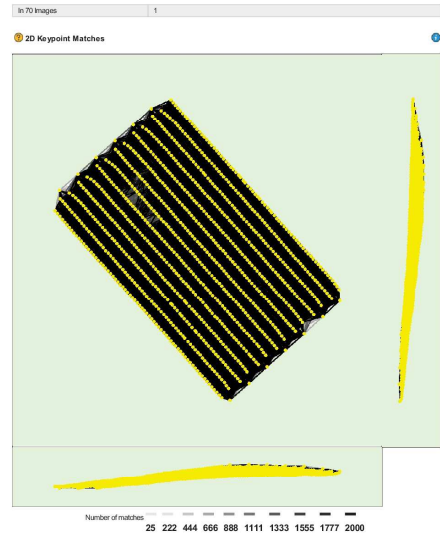


Figure 5: Computed image positions with links between matched images. The thickness of the links indicates the number of matched 2D keypoints between the images. Bright links indicate weak links and require manual fix points or more images.

Geolocation Details

Ground Control Points

GCP Name	Accuracy XYZ [m]	Error X [%]	Error Y [%]	Error Z [%]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
TP8000 (3D)	0.020/0.020	0.034	0.008	0.054	0.222	3/3

Keypoints Image Scale	Full Image Scale: 1
Advanced: Merging Image Pairs	Asial Grid or Corridor
Advanced: Merging Strategy	Use Geometrically Verified Matching: yes
Advanced: Keypoint Extraction	Targeted Number of Keypoints: Automatic
Advanced: Calibration	Calibration Method: Intermediate Internal Parameters Optimization: All External Parameters Optimization: All Reinitial: Auto: no

Point Cloud Densification details

Processing Options

Image Scale	multireso: 1/2 (Half image size, Default)
Point Density	Optimal
Minimum Number of Matches	6
3D Textured Mesh Generation	no
LCD	Generated: no
Advanced: Image Groups	group1
Advanced: Use Processing Area	yes
Advanced: Use Annotations	yes
Time for Point Cloud Densification	02h:40m:21s
Time for Point Cloud Classification	N/A
Time for 3D Textured Mesh Generation	N/A

Results

Number of Processed Clusters	2
Number of Generated Tiles	4
Number of 3D Densified Points	61706173
Average Density (per m ²)	336.22

DSM, Orthomosaic and Index Details

Processing Options

DSM and Orthomosaic Resolution	5 [m/pixel]
DSM Files	Noise Filtering: yes Surface Smoothing: yes, Type: Sharp
Resler DSM	Generated: yes Method: Inverse Distance Weighting Merge Tiles: yes
Orthomosaic	Generated: yes Merge Tiles: yes GeoTIFF Without Transparency: no Google Maps Tiles and HTML: no
Time for DSM Generation	03m:53s
Time for Orthomosaic Generation	36m:35s
Time for DSM Generation	00s
Time for Contour Lines Generation	00s
Time for Reflectance Map Generation	00s
Time for Index Map Generation	00s

Liite 2. Takymetrimittausten orientointiraportit

```

Mannisenmäki_orientoinnit_250619.txt

-----
System 1200 Lokitiedosto - Alku
-----
*****
*****

-----
Leica System 1200 Aseointi Versio. 6.13 Lokitiedosto
-----
Kojetyyppi : MS50 1" R2
Kojeen sarjanumero : 369833

Työ : jukkaap
Aseointi Alku : 25.06.19, 07:09:39

-----
Aseointi menetelmä "Vapaa asemapiste"
-----

Havainnot
-----
Piste Nr.      Hz      V      Matka
Pri.K      Pri.Vakio
12555      149.5938      88.3172      9.968
1.941      0.0231
9902      300.4442      108.7501      88.216
1.941      0.0231

Jäännövirheet Piste 12555 : dHz= -0.0388 dZ= dVinom.= ----
Käytä: 3D

Jäännövirheet Piste 9902 : dHz= 0.0005 dZ= dVinom.= ----
Käytä: 2D

Tulokset
-----
Asemapiste Nr. : 1000
Y= 485080.848 X= 6908196.149 Z=
110.000 Kojek.= 0.000

Ori Korj. : 26.5465
Mittakaava :

Keskvirhe Y : 0.010
Keskvirhe X : 0.012
Keskvirhe Z : 0.000
Keskvirhe Ori. : 0.0059

-----
Sivu 1

```

```

Mannisenmäki_orientoinnit_250619.txt
Leica System 1200 Maastoonmerkintä, Versio 6.13 Lokitiedosto
-----
Kojetyyppi : MS50 1" R2
Kojeen sarjanumero. : 369833

Työ : jukkaap
Merkintä Alku : 25.06.19, 07:13:08

TPS Asemapiste : 1000 Y= 485080.848 X=
6908196.149 Z= 110.000 hi= 0.000

-----
Leica System 1200 Aseointi Versio. 6.13 Lokitiedosto
-----
Kojetyyppi : MS50 1" R2
Kojeen sarjanumero : 369833

Työ : jukkaap
Aseointi Alku : 25.06.19, 07:43:15

-----
Aseointi menetelmä "Vapaa asemapiste"
-----

Havainnot
-----
Piste Nr.      Hz      V      Matka
Pri.K      Pri.Vakio
50060      42.9457      97.0117      111.943
1.937      0.0231
12553      210.7233      100.9662      249.491
1.941      0.0231

Jäännövirheet Piste 50060 : dHz= 0.0009 dZ= -0.002 dVinom.=
----- Käytä: 3D

Jäännövirheet Piste 12553 : dHz= -0.0003 dZ= 0.002 dVinom.=
----- Käytä: 3D

Tulokset
-----
Asemapiste Nr. : 1001
Y= 485205.679 X= 6908368.792 Z=
129.787 Kojek.= 0.000

Ori Korj. : 170.5124
Mittakaava :

Keskvirhe Y : 0.005
Keskvirhe X : 0.004

-----
Sivu 2

```

```

Mannisenmäki_orientoinnit_250619.txt
Keskvirhe Z : 0.002
Keskvirhe Ori. : 0.0005

-----
Leica System 1200 Aseointi Versio. 6.13 Lokitiedosto
-----
Kojetyyppi : MS50 1" R2
Kojeen sarjanumero : 369833

Työ : jukkaap
Aseointi Alku : 25.06.19, 08:10:21

-----
Aseointi menetelmä "Vapaa asemapiste"
-----

Havainnot
-----
Piste Nr.      Hz      V      Matka
Pri.K      Pri.Vakio
TPS0002      4.6237      99.2707      122.516
1.941      0.0231
12553      216.1401      101.4348      119.373
1.941      0.0231

Jäännövirheet Piste TPS0002 : dHz= -0.0002 dZ= -0.001 dVinom.=
----- Käytä: 3D

Jäännövirheet Piste 12553 : dHz= 0.0002 dZ= 0.001 dVinom.=
----- Käytä: 3D

Tulokset
-----
Asemapiste Nr. : 1002
Y= 485193.793 X= 6908238.389 Z=
128.695 Kojek.= 0.000

Ori Korj. : -13.0412
Mittakaava :

Keskvirhe Y : 0.004
Keskvirhe X : 0.004
Keskvirhe Z : 0.001
Keskvirhe Ori. : 0.0002

-----
Leica System 1200 Maastoonmerkintä, Versio 6.13 Lokitiedosto
-----
Kojetyyppi : MS50 1" R2

-----
Sivu 3

```

```

Mannisenmäki_orientoinnit_250619.txt
Kojeen sarjanumero. : 369833

Työ : jukkaap
Merkintä Alku : 25.06.19, 08:28:54

TPS Asemapiste : 1002 Y= 485193.793 X=
6908238.389 Z= 128.695 hi= 0.000

-----
Leica System 1200 Aseointi Versio. 6.13 Lokitiedosto
-----
Kojetyyppi : MS50 1" R2
Kojeen sarjanumero : 369833

Työ : jukkaap
Aseointi Alku : 25.06.19, 08:53:08

-----
Aseointi menetelmä "Vapaa asemapiste"
-----

Havainnot
-----
Piste Nr.      Hz      V      Matka
Pri.K      Pri.Vakio
12560      124.3800      96.6759      12.544
1.941      0.0231
50060      343.0451      99.0886      72.737
1.937      0.0231

Jäännövirheet Piste 12560 : dHz= -0.0026 dZ= -0.001 dVinom.=
----- Käytä: 3D

Jäännövirheet Piste 50060 : dHz= 0.0001 dZ= 0.001 dVinom.=
----- Käytä: 3D

Tulokset
-----
Asemapiste Nr. : 1003
Y= 485332.244 X= 6908410.603 Z=
133.996 Kojek.= 0.000

Ori Korj. : -33.8517
Mittakaava :

Keskvirhe Y : 0.002
Keskvirhe X : 0.002
Keskvirhe Z : 0.001
Keskvirhe Ori. : 0.0005

-----
Sivu 4

```


Mannisenmäki_orientoinnit_250619.txt

Leica System 1200 Asemointi Versio. 6.13 Lokitiedosto

Kojetyyppi : MS50 1" R2
Kojeen sarjanumero : 369833

Työ : jukkaap
Asemointi Alku : 25.06.19, 10:40:41

Asemointi menetelmä "Vapaa asemapiste"

Havainnot

Piste Nr.	Hz	V	Matka
Pri.K	Pri.Vakio		
3617	296.5635	94.3949	42.547
1.941 0.0231			
12558	233.3690	90.5272	79.272
1.941 0.0231			

Jäänvärheet Piste 3617 : dHz= -0.0022 dZ= 0.001 dVinom.=
----- Käytä: 3D

Jäänvärheet Piste 12558 : dHz= 0.0007 dZ= -0.001 dVinom.=
----- Käytä: 3D

Tulokset

Asemapiste Nr. : 1004
Y= 485447.226 X= 6908195.047 Z=

139.874 KojeK.= 0.000

Ori Korj. : -188.3783

Mittakaava :

Keskivirhe Y : 0.002

Keskivirhe X : 0.002

Keskivirhe Z : 0.001

Keskivirhe Ori. : 0.0023

Leica System 1200 Asemointi Versio. 6.13 Lokitiedosto

Kojetyyppi : MS50 1" R2
Kojeen sarjanumero : 369833

Työ : jukkaap

Sivu 5

Mannisenmäki_orientoinnit_250619.txt

Asemointi Alku : 25.06.19, 11:15:11

Asemointi menetelmä "Vapaa asemapiste"

Havainnot

Piste Nr.	Hz	V	Matka
Pri.K	Pri.Vakio		
12559	388.7855	103.8028	95.780
1.941 0.0231			
12558	131.2537	91.1702	58.758
1.941 0.0231			

Jäänvärheet Piste 12559 : dHz= 0.0005 dZ= 0.000 dVinom.=
----- Käytä: 3D

Jäänvärheet Piste 12558 : dHz= -0.0012 dZ= 0.001 dVinom.=
----- Käytä: 3D

Tulokset

Asemapiste Nr. : 1005
Y= 485356.670 X= 6908154.612 Z=

143.501 KojeK.= 0.000

Ori Korj. : -186.8173

Mittakaava :

Keskivirhe Y : 0.002

Keskivirhe X : 0.002

Keskivirhe Z : 0.001

Keskivirhe Ori. : 0.0009

Leica System 1200 Asemointi Versio. 6.13 Lokitiedosto

Kojetyyppi : MS50 1" R2
Kojeen sarjanumero : 369833

Työ : jukkaap
Asemointi Alku : 25.06.19, 11:37:47

Asemointi menetelmä "Vapaa asemapiste"

Havainnot

Sivu 6

Mannisenmäki_orientoinnit_250619.txt

Piste Nr.	Hz	V	Matka
Pri.K	Pri.Vakio		
tps0008	211.7081	96.2391	58.646
1.941 0.0231			
12559	370.9486	103.5168	46.717
1.941 0.0231			

Jäänvärheet Piste tps0008 : dHz= 0.0001 dZ= -0.001 dVinom.=
----- Käytä: 3D

Jäänvärheet Piste 12559 : dHz= -0.0001 dZ= 0.001 dVinom.=
----- Käytä: 3D

Tulokset

Asemapiste Nr. : 1006
Y= 485360.471 X= 6908206.866 Z=

140.362 KojeK.= 0.000

Ori Korj. : 67.4945

Mittakaava :

Keskivirhe Y : 0.000

Keskivirhe X : 0.000

Keskivirhe Z : 0.001

Keskivirhe Ori. : 0.0001

System 1200 Lokitiedosto - Loppu

Sivu 7

```

Mannisenmaki_orientoinnit_skannaus_250619.txt
-----
System 1200 Lokitiedosto - Alku
-----
Leica System 1200 Aseointi Versio. 6.13 Lokitiedosto
Kojetyyppi : MS50 1" R2
Kojeen sarjanumero : 369833
Työ : jukkascan
Aseointi Alku : 25.06.19, 13:53:30
-----
Aseointi menetelmä "Vapaa asemapiste"
-----
Havainnot
-----
Piste Nr.      Hz      V      Matka
Pri.K      Pri.Vakio
TPS0006      354.0902      101.1952      46.104
1.941      0.0231      150.3009      98.1051      109.781
TPS0007      150.3009      98.1051      109.781
1.941      0.0231
Jäännövirheet Piste TPS0006 : dHz= 0.0002 dZ= -0.000 dVinom.=
---- Käytä: 3D
Jäännövirheet Piste TPS0007 : dHz= -0.0000 dZ= 0.001 dVinom.=
---- Käytä: 3D
Tulokset
-----
Asemapiste Nr. : 2000
Y= 485372.545 X= 6988269.801 Z=
137.114 Kojek.= 0.000
Ori Korj. : -67.1037
Mittakaava :
Keskvirhe Y : 0.003
Keskvirhe X : 0.003
Keskvirhe Z : 0.000
Keskvirhe Ori. : 0.0001
-----
Sivu 1

```

```

Mannisenmaki_orientoinnit_skannaus_250619.txt
-----
Leica System 1200 Aseointi Versio. 6.13 Lokitiedosto
Kojetyyppi : MS50 1" R2
Kojeen sarjanumero : 369833
Työ : jukkascan
Aseointi Alku : 25.06.19, 14:13:29
-----
Aseointi menetelmä "Vapaa asemapiste"
-----
Havainnot
-----
Piste Nr.      Hz      V      Matka
Pri.K      Pri.Vakio
TPS0004      332.0727      102.3110      10.772
1.941      0.0231      43.0966      98.8130      113.064
tps0010      43.0966      98.8130      113.064
1.941      0.0231
Jäännövirheet Piste TPS0004 : dHz= 0.0133 dZ= 0.004 dVinom.=
---- Käytä: 3D
Jäännövirheet Piste tps0010 : dHz= -0.0001 dZ= -0.004 dVinom.=
---- Käytä: 3D
Tulokset
-----
Asemapiste Nr. : 2001
Y= 485262.592 X= 6988134.199 Z=
136.573 Kojek.= 0.000
Ori Korj. : -197.8526
Mittakaava :
Keskvirhe Y : 0.003
Keskvirhe X : 0.003
Keskvirhe Z : 0.004
Keskvirhe Ori. : 0.0018
-----
Leica System 1200 Aseointi Versio. 6.13 Lokitiedosto
Kojetyyppi : MS50 1" R2
Kojeen sarjanumero : 369833
Työ : jukkascan
Aseointi Alku : 26.06.19, 08:51:08
-----
Sivu 2

```

```

Mannisenmaki_orientoinnit_skannaus_250619.txt
-----
Aseointi menetelmä "Vapaa asemapiste"
-----
Havainnot
-----
Piste Nr.      Hz      V      Matka
Pri.K      Pri.Vakio
12553      212.1967      101.1608      164.040
1.941      0.0231      6.2811      99.0903      77.075
TPS0002      6.2811      99.0903      77.075
1.941      0.0231
Jäännövirheet Piste 12553 : dHz= -0.0000 dZ= -0.001 dVinom.=
---- Käytä: 3D
Jäännövirheet Piste TPS0002 : dHz= 0.0000 dZ= 0.001 dVinom.=
---- Käytä: 3D
Tulokset
-----
Asemapiste Nr. : 2002
Y= 485195.091 X= 6988283.877 Z=
128.996 Kojek.= 0.000
Ori Korj. : -41.9879
Mittakaava :
Keskvirhe Y : 0.001
Keskvirhe X : 0.001
Keskvirhe Z : 0.001
Keskvirhe Ori. : 0.0000
-----
Leica System 1200 Aseointi Versio. 6.13 Lokitiedosto
Kojetyyppi : MS50 1" R2
Kojeen sarjanumero : 369833
Työ : jukkascan
Aseointi Alku : 26.06.19, 09:53:45
-----
Aseointi menetelmä "Vapaa asemapiste"
-----
Havainnot
-----
Piste Nr.      Hz      V      Matka
Pri.K      Pri.Vakio
50060      103.9151      92.8297      46.976
1.941      0.0231      216.5912      99.7884      101.852
TPS0002      216.5912      99.7884      101.852
1.941      0.0231
Jäännövirheet Piste 50060 : dHz= -0.0009 dZ= -0.001 dVinom.=
---- Käytä: 3D
-----
Sivu 3

```

```

Mannisenmaki_orientoinnit_skannaus_250619.txt
-----
Pri.K      Pri.Vakio
tps0011      334.7348      102.3136      71.397
1.941      0.0231      369.6792      102.4160      33.407
TPS0003      369.6792      102.4160      33.407
1.941      0.0231
Jäännövirheet Piste tps0011 : dHz= 0.0010 dZ= -0.002 dVinom.=
---- Käytä: 3D
Jäännövirheet Piste TPS0003 : dHz= -0.0045 dZ= 0.002 dVinom.=
---- Käytä: 3D
Tulokset
-----
Asemapiste Nr. : 2003
Y= 485260.856 X= 6988248.845 Z=
132.221 Kojek.= 0.000
Ori Korj. : -141.8147
Mittakaava :
Keskvirhe Y : 0.005
Keskvirhe X : 0.006
Keskvirhe Z : 0.002
Keskvirhe Ori. : 0.0052
-----
Leica System 1200 Aseointi Versio. 6.13 Lokitiedosto
Kojetyyppi : MS50 1" R2
Kojeen sarjanumero : 369833
Työ : jukkascan
Aseointi Alku : 26.06.19, 12:26:16
-----
Aseointi menetelmä "Vapaa asemapiste"
-----
Havainnot
-----
Piste Nr.      Hz      V      Matka
Pri.K      Pri.Vakio
50060      103.9151      92.8297      46.976
1.941      0.0231      216.5912      99.7884      101.852
TPS0002      216.5912      99.7884      101.852
1.941      0.0231
Jäännövirheet Piste 50060 : dHz= -0.0009 dZ= -0.001 dVinom.=
---- Käytä: 3D
-----
Sivu 4

```

Mannisenmaki_orientoinnit_skannaus_250619.txt

Jäännövirheet Piste TP50002 : dHz= 0.0002 dZ= 0.001 dVinom.=
 ----- Käytä: 3D

Tulokset

 Asemapisten Nr. : 2004
 Y= 485228.927 X= 6908458.983 Z=
 129.759 KojeK.= 0.000

Ori Korj. : -186.7941
 Mittakaava :

Keskivirhe Y : 0.001
 Keskivirhe X : 0.001
 Keskivirhe Z : 0.001
 Keskivirhe Ori. : 0.0005

Mannisenmaki_orientoinnit_skannaus_250619.txt

144.913 KojeK.= 0.000

Ori Korj. : 166.4415
 Mittakaava :

Keskivirhe Y : 0.001
 Keskivirhe X : 0.001
 Keskivirhe Z : 0.001
 Keskivirhe Ori. : 0.0004

 System 1200 Lokitiedosto - Loppu

 Leica System 1200 Asemointi Versio. 6.13 Lokitiedosto

 Kojetyyppi : MS50 1" R2
 Kojeen sarjanumero : 369833

Työ : jukkascan
 Asemointi Alku : 26.06.19, 13:24:43

 Asemointi menetelmä "Vapaa asemapiste"

Havainnot

 Piste Nr. Hz V Matka
 Pri.k Pri.vakin
 tps0009 253.8071 100.1979 78.935
 1.941 0.0231
 tps0008 11.9609 101.8213 38.062
 1.941 0.0231

Jäännövirheet Piste tps0009 : dHz= -0.0002 dZ= 0.000 dVinom.=
 ----- Käytä: 3D

Jäännövirheet Piste tps0008 : dHz= 0.0007 dZ= -0.001 dVinom.=
 ----- Käytä: 3D

Tulokset

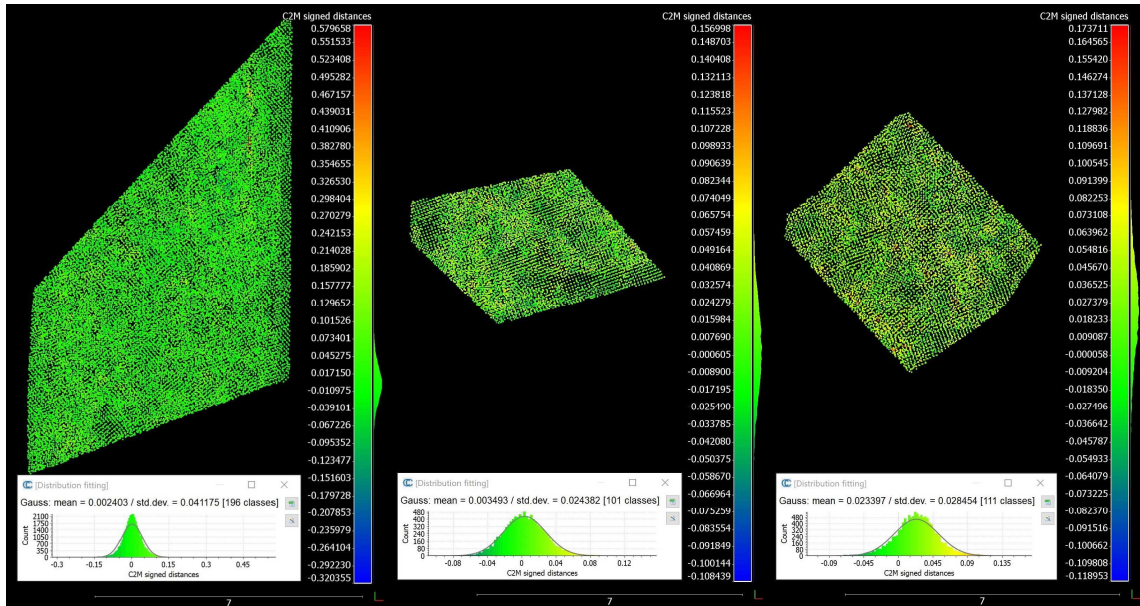
 Asemapisten Nr. : 2005
 Y= 485342.658 X= 6908111.933 Z=
 129.759 KojeK.= 0.000

Sivu 5

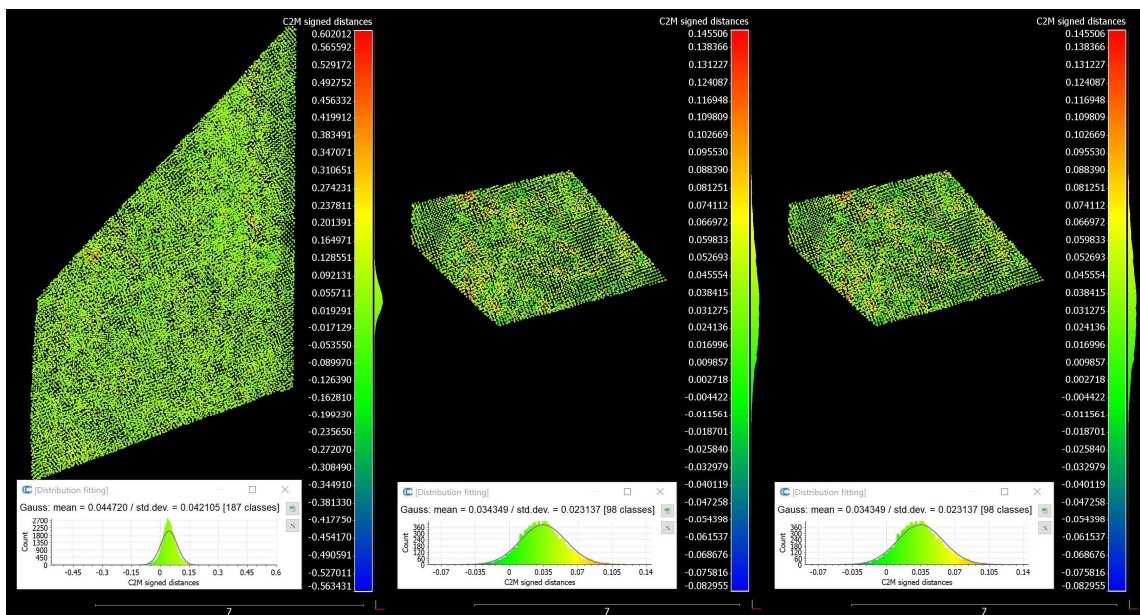
Sivu 6

Liite 3. Tasopintojen vertailut

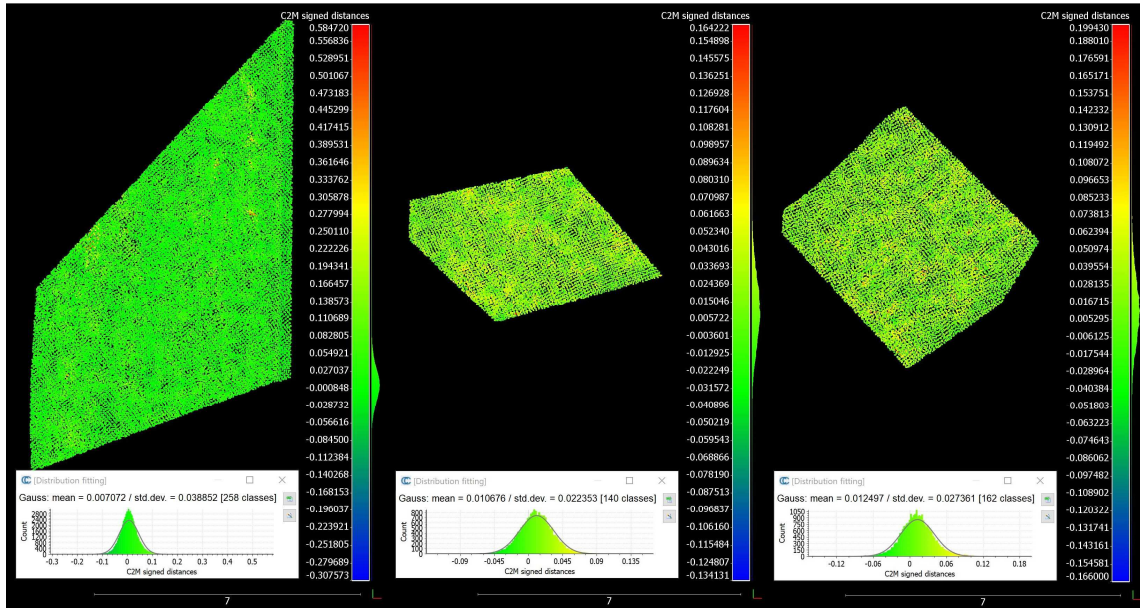
Viisto_X1_PPK_100



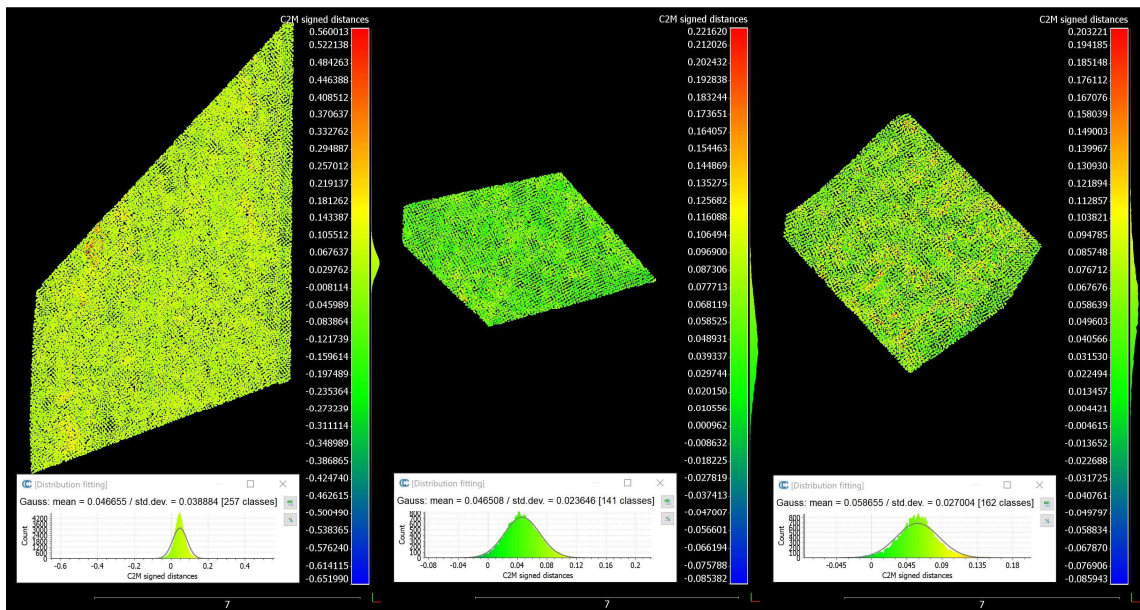
Viisto_X1_GCP_100



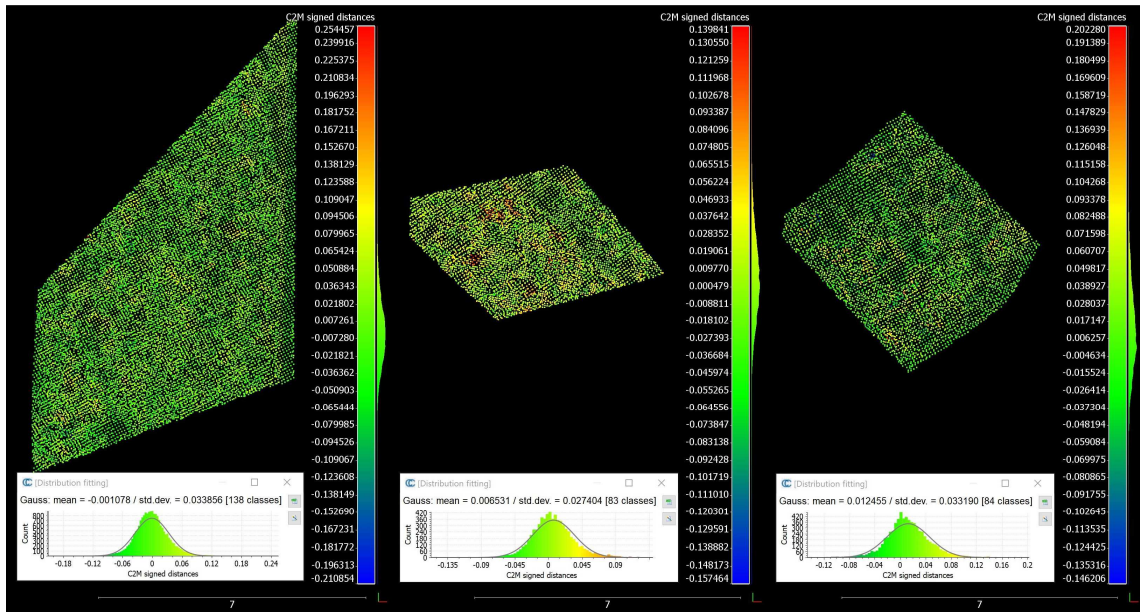
Viisto_X2_PPK_100



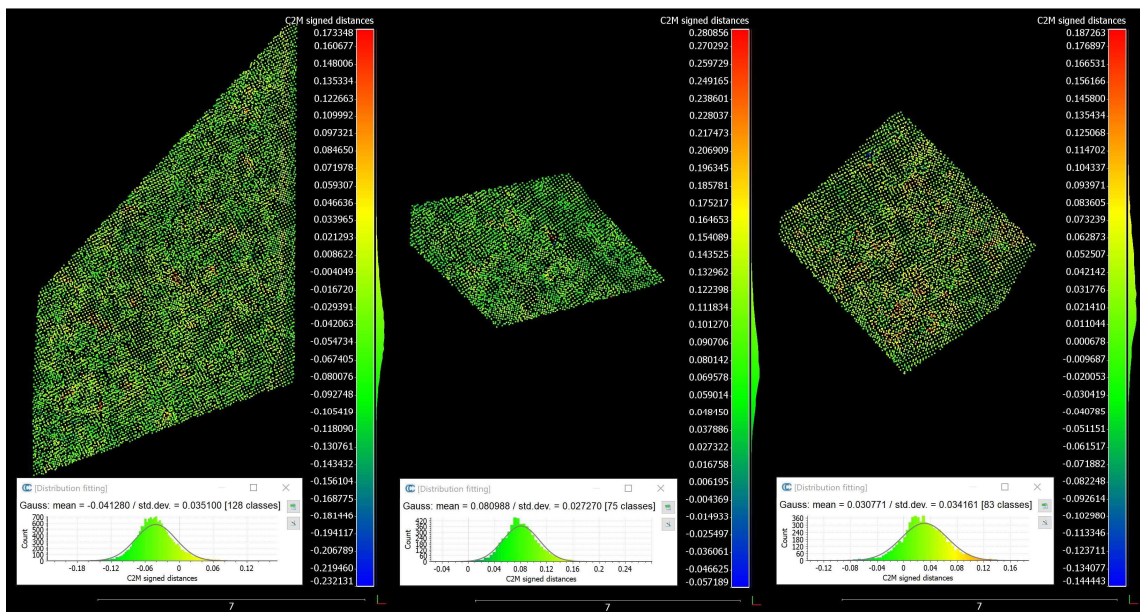
Viisto_X2_GCP_100



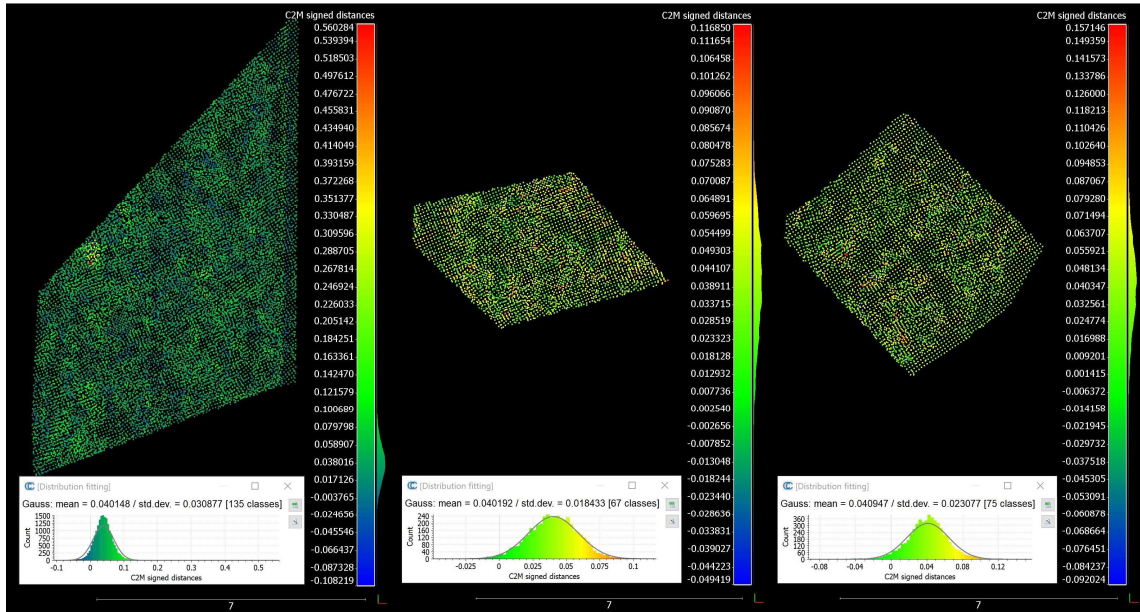
Nadir_α6000_PPK_100



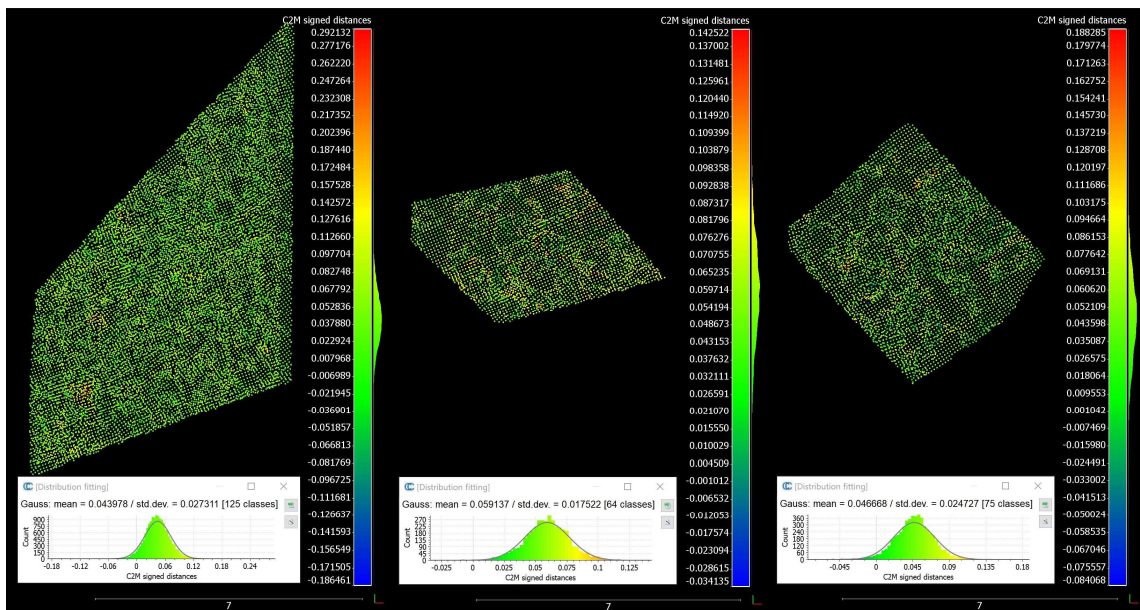
Nadir_α6000_GCP_100



Nadir_RX1RII_PPK

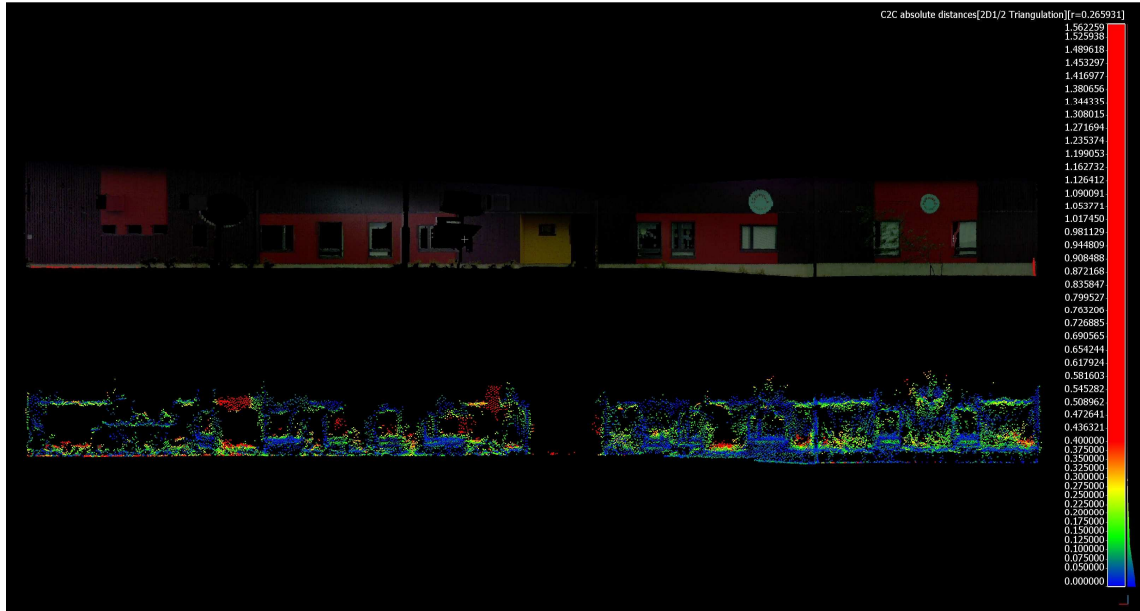


Nadir_RX1RII_GCP

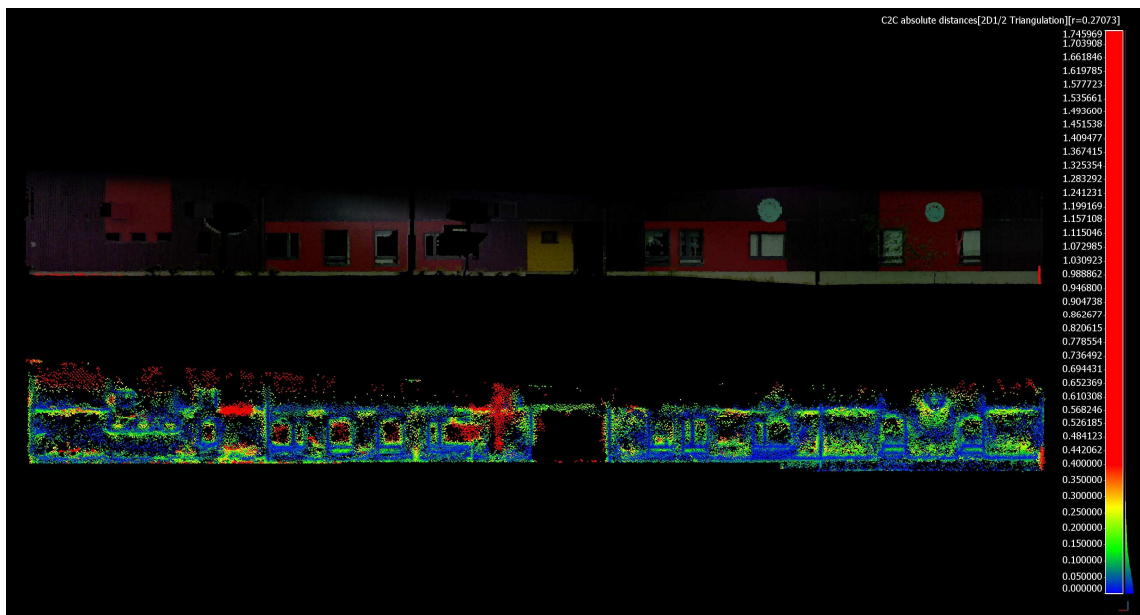


Liite 4. Seinäpintojen vertailut

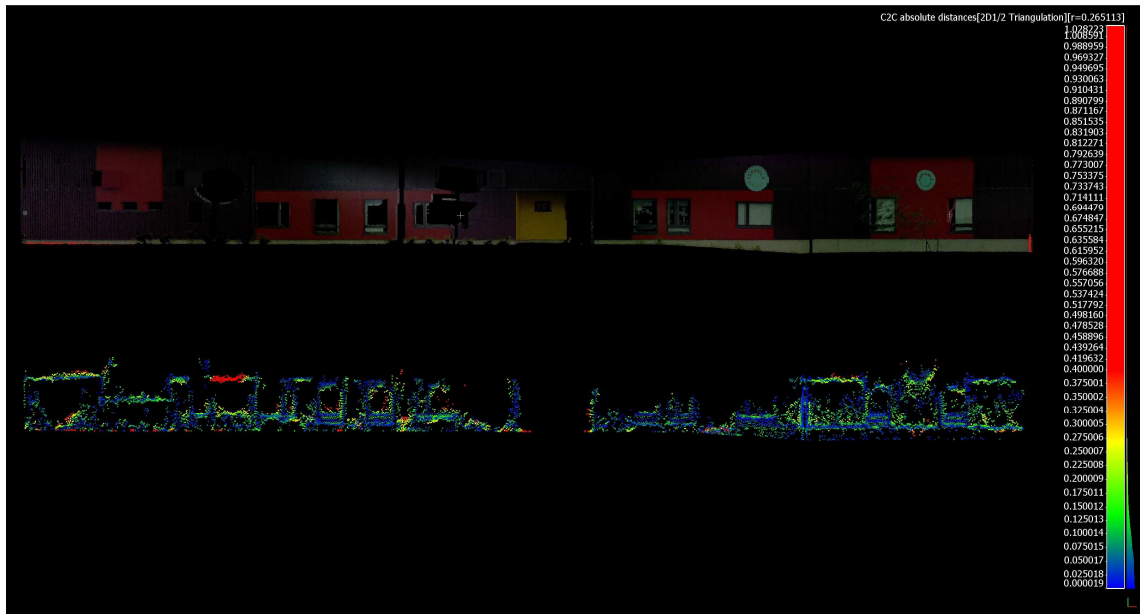
Viisto_X1_100, rakennus 1



Viisto_X2_100, rakennus 1



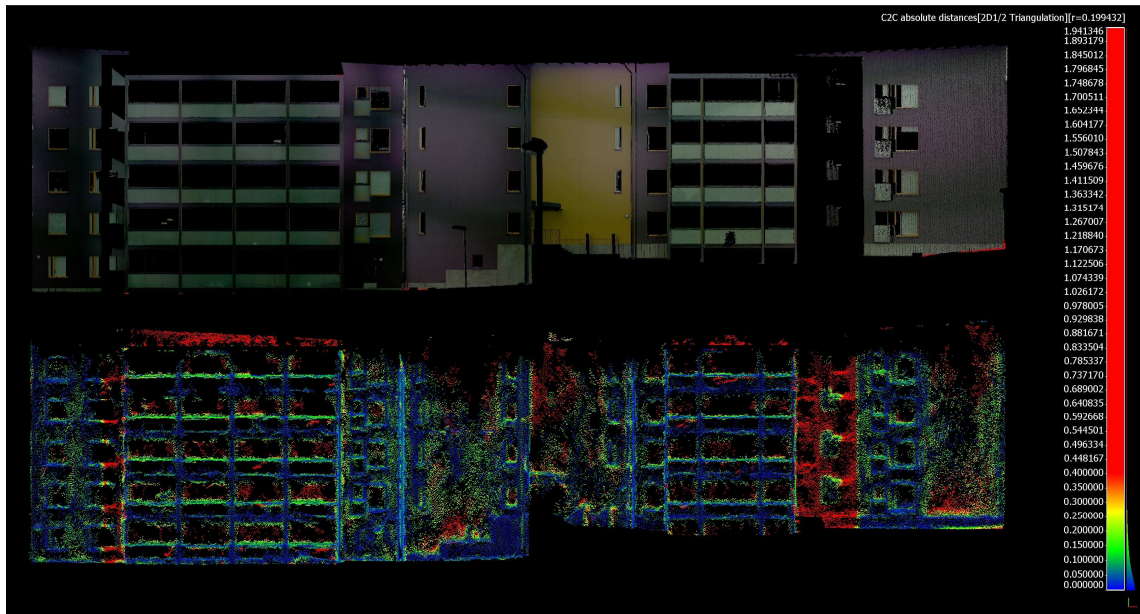
Nadir_α6000_100, rakennus 1



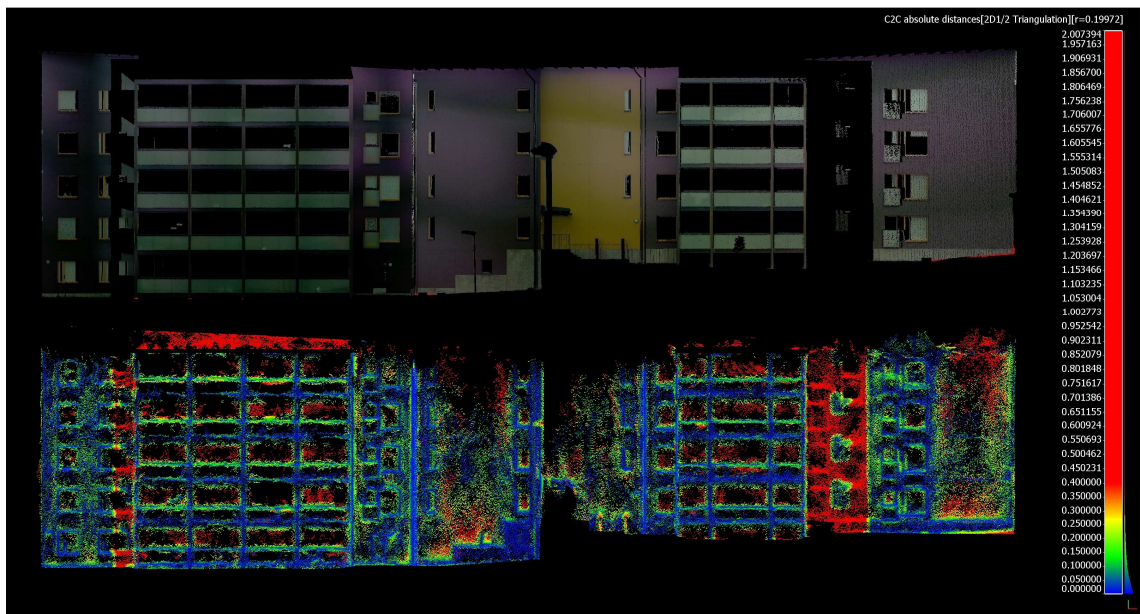
Nadir_RX1RII_150, rakennus 1



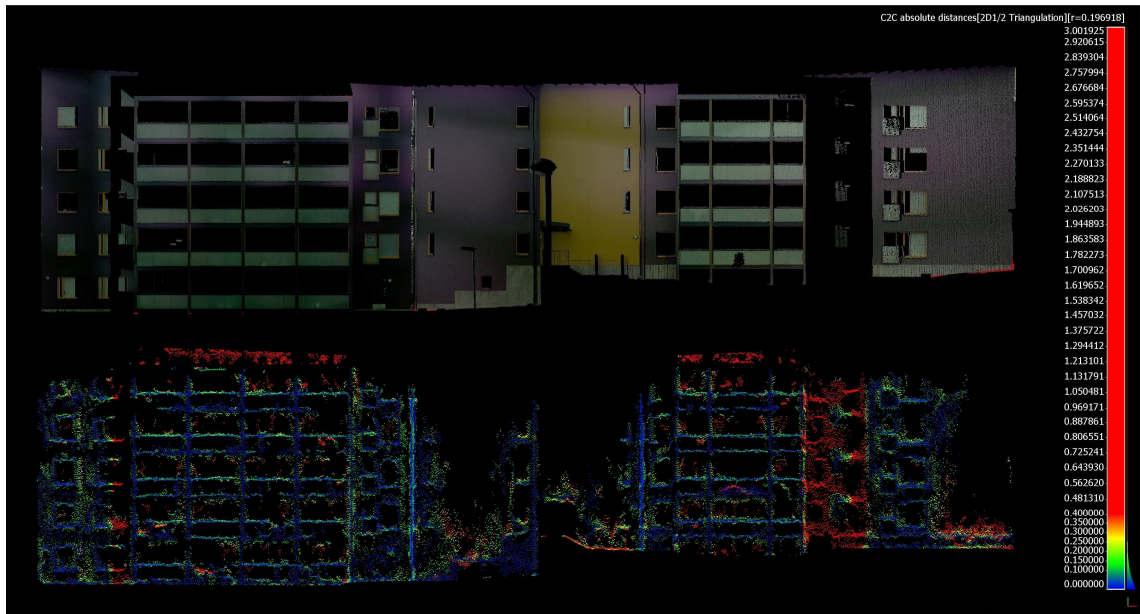
Viisto_X1_100, rakennus 2



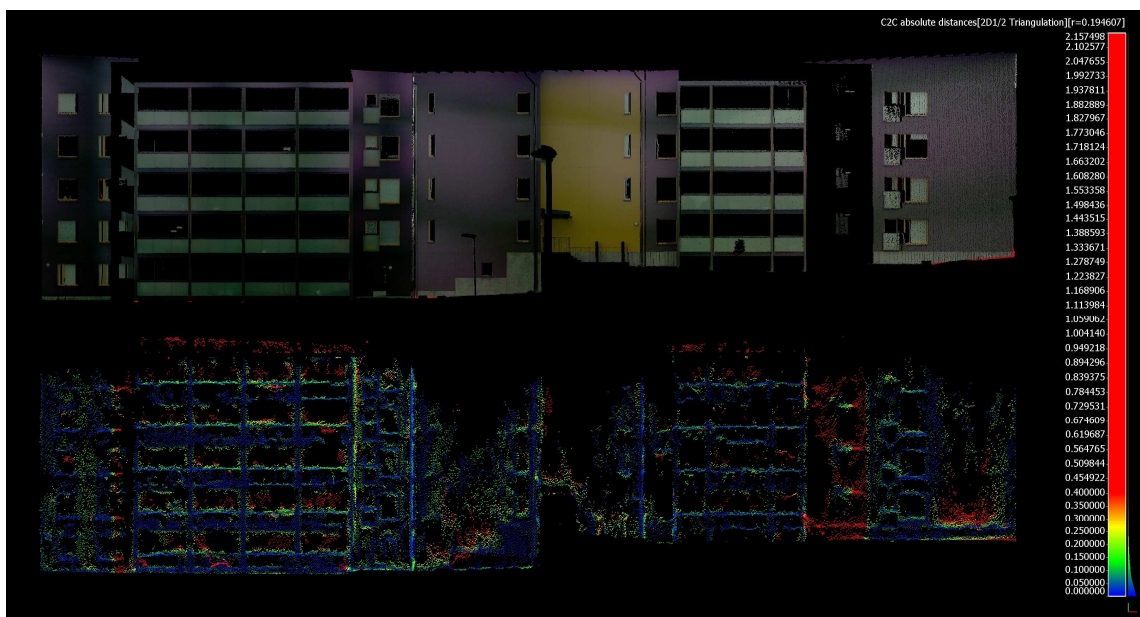
Viisto_X2_100, rakennus 2



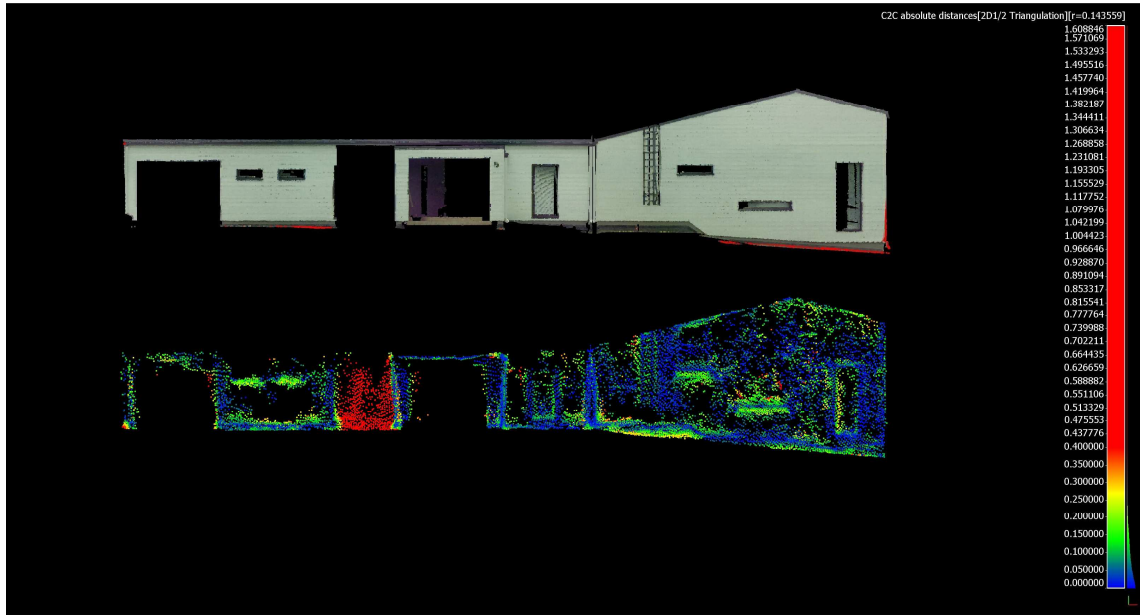
Nadir_α6000_100, rakennus 2



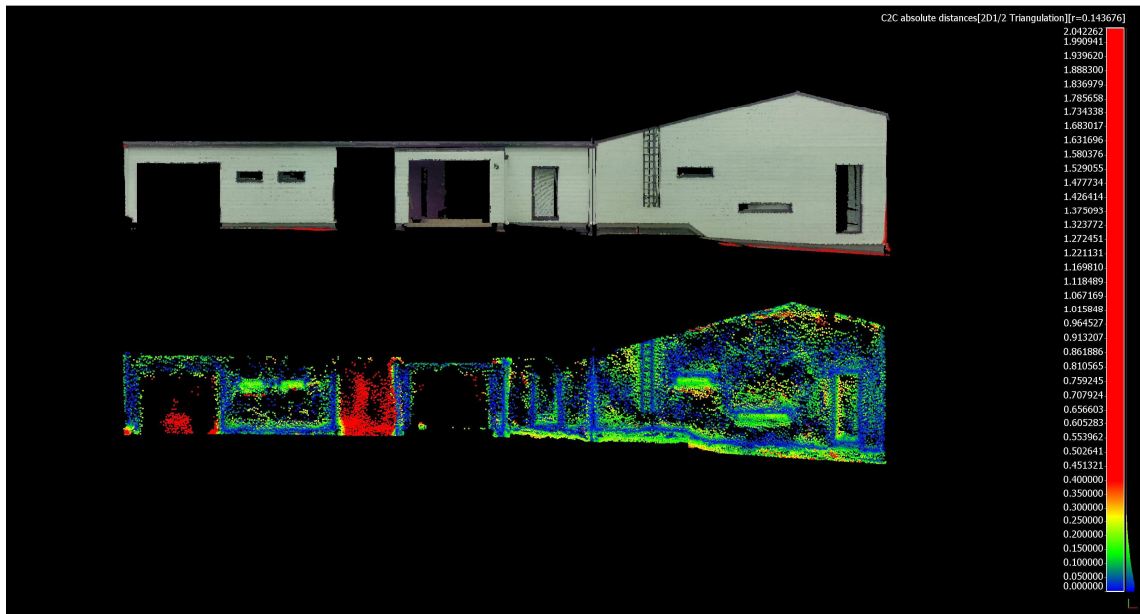
Nadir_RX1RII_150, rakennus 2



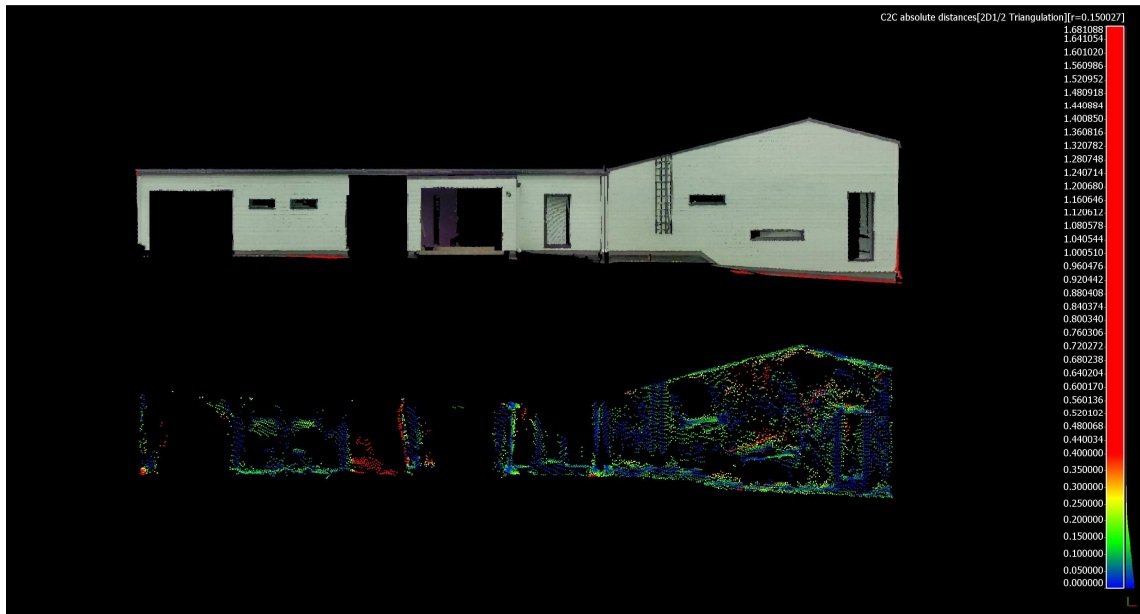
Viisto_X1_100, rakennus 3



Viisto_X2_100, rakennus 3



Nadir_α6000_100, rakennus 3



Nadir_RX1RII_150, rakennus 3

