

DIGITAALINEN ILMAKUVAUS JA SEN MAHDOLLISUUDET

Eija Honkavaara, Lauri Markelin, Kimmo Nurminen

Geodeettinen laitos, Kaukokartoituksen ja fotogrammetrian osasto

eija.honkavaara@fgi.fi, lauri.markelin@fgi.fi, kimmo.nurminen@fgi.fi

TIIVISTELMÄ

Ilmakuvaus on ollut jo pitkään keskeinen menetelmä karttatiedon tuottamiseen. Uudet digitaaliset kuvausjärjestelmät tuottavat tehokkaasti ja nopeasti ajantasaista kuvatieta paikkatietojärjestelmiin. Uudet automaattiset prosessointimenetelmät, erityisesti kuvien sävyarvojen reflektanssikalibrointi ja kuvansovituksen avulla tuotettavat pistepilvet, avaavat entistä parempia mahdollisuuksia automatisoida kuvatukintaprosesseja. Ilmakuvia voidaan käyttää erilaisissa kaukokartoitussovellutuksissa sellaisenaan tai yhdistämällä muihin kaukokartoitusaineistoihin, kuten laserkeilaukseen. Artikkelin tavoitteena on selvittää modernin ilmakuvausmenetelmien ominaisuuksia sekä luoda katsaus tulevaisuuteen viimeaikaisten tutkimustulosten perusteella.

1. JOHDANTO

Kaukokartoitustiedon tarve lisääntyy jatkuvasti. Henkilökohtaisen navigoinnin ja jokapaikan (ubiquitos) paikkatietosovellutusten hyödyntäminen edellyttää ajantasaisia karttoja ja 3D-virtuaalimalleja. Viranomaiset käyttävät kaukokartoitustietoa enenevässä määrin erilaisissa valvontatehtävissä, kuten Maaseutuviraston EU:n vaatimuksesta tekemä peltojen viljelyalojen kontrollointi (Peltolohkokartta). Ilmastomuutoksen ennaltaehkäisy edellyttää entistä tehokkaampaa ja ympäristöystävällisempää maa- ja metsätaloutta. Ennustetaan myös, että ilmastonmuutos lisää luonnonkatastrofeja, kuten myrsky- ja tulvatuhot tai tuohyönteiset, joiden ennakointi ja hoito edellyttävät tehokkaita kartoitusmenetelmiä. Kaukokartoitusta käytetään enenevässä määrin myös erilaisissa turvallisuustehtävissä, kuten reaaliaikaisessa väkijoukkojen monitoroinnissa.

Suuria muutoksia on tapahtunut paikkatietoa tarjoavissa tahoissa: perinteisten toimijoiden – valtio ja kunnat – ohella paikkatietoa tuottavat nyt myös globaalit kaupalliset toimijat, kuten Microsoft ja Google. Kartoitusyritykset globalisoituvat ja Suomessakin toimii useita kansainvälisiä yrityksiä. Globalisaation myötä ylikansalliset standardit, kuten Euroopan Unionin antama Inspire direktiivi, tulevat ohjaamaan paikkatietotuotteiden kehittymistä. Toinen tärkeä kehityssuunta on henkilökohtainen ja sosiaalinen paikkatiedon tuotanto ja tiedon jakaminen web-palveluiden kautta. Mielenkiintoinen uusi projekti on Microsoftin ”Global Ortho Project”, jonka tavoitteena on tuottaa ortokuvia 30 cm pikselikoolla USA:sta ja läntisestä Euroopasta kolmen vuoden ajantasaistusvälillä (Luccio, 2011).

Kaukokartoitusmenetelmien kehitys jatkuu voimakkaana ja uusilla menetelmillä maanpintaa ja sen kohteita pystytään havainnoimaan ja mittaamaan ennen näkemättömän tarkasti ja tehokkaasti. Erilaiset sovellutukset edellyttävät erilaisten kartoitusmenetelmien käyttöä. Keskeisiä kaukokartoitusmenetelmän käyttökelpoisuuden määrittäviä indikaattoreita ovat geometrinen (sijainti) tarkkuus, spatiaalinen resoluutio (erotuskyky), radiometriset ominaisuudet (sävykyky, signaali-kohinasuhde, heijastustiedon tarkkuus), spektraalit ominaisuudet (minkälaisilla valon aallonpituuden kaistoilla havainnot on tehty), ajallinen resoluutio, kattavuus, saatavuus erilaisissa

olosuhteissa, prosessoinnin nopeus sekä kustannukset. Havainnointimenetelmät vaihtelevat globaaleista hyvin paikallisiin mittaukseen. Globaalit menetelmät kattavat koko maapallon tiheällä aikaresoluutiolla, mutta heikolla sijaintiresoluutiolla. Uusia innovaatioita yksityiskohtaisissa mittauksissa ovat esim. ajoneuvoista tai polkupyöristä (esim. Google Streetview) tai miehittämättömistä lennokeista käsin tehtävät mittaukset. Vasteajan puolesta huonoissakin olosuhteissa toimivia menetelmiä ovat tutkakuvauus sekä pilvien alapuolella tehtävä lennökkikuvaus.

Tämä artikkeli käsittelee digitaalisilla kameroilla lentokoneista tehtävää ilmakehävaihtelua. Kerättävän tieto on multispektraalia, geometrisesti tarkkaa, stereoskooppista ja sen spatiaalinen resoluutio (ground sample distance, GSD) on 0,03-1 m. On huomattava, että ilmakehävaihtelun ohella myös muut kuvauslaitteet tuottavat samankaltaista kuvatietaa. Hyvän resoluution satelliittisensorit tuottavat tänä päivänä tarkimmillaan 0,4 m resoluutiota ja soveltuvat 1:5000 ja sitä pienempimittakaavaiseen kartoitukseen (Jacobsen, 2011). Miehittämättömistä lennokeista tapahtuva kuvaaminen soveltuu erityisesti pienialaisiin ja ajallisesti tiheää ja nopeaa vastetta vaativiin sovellutuksiin (Everaerts, 2009).

Maanmittauslaitos (MML) kerää järjestelmällisesti koko Suomen kattavaa digitaalista ilmakehävaihtelua. Lisäksi markkinoilla toimii useita yrityksiä, jotka suorittavat ilmakehävaihtelua. Suuria ilmakehävaihtelun perustuvia kartoitusprosesseja Suomessa ovat MML:n tekemä Maastotietokannan ylläpito, Maaseutuviraston tekemä Peltolohkokartan tuotanto ja ylläpito, Metsäkeskusten metsäsovellutukset sekä useat kuntien kartoitus- ja ortokuvatuotantoprosessit. Internetin erilaiset palvelut, kuten Paikkatietoikkuna, tarjoavat ilmakehävaihtelua lisääntyvässä määrin kansalaisten käyttöön. Ilmakehävaihtelua käytetään myös erilaisissa turvallisuussovellutuksissa toiminnan tukena, esim. palo ja pelastustoimi.

Ilmakehävaihtelun toimintaympäristö on muuttunut voimakkaasti viime vuosina. Tänä päivänä kuvatuottajilla on käytössään erilaisia kameroita ja niiden erilaisia versioita. Kameroita operoidaan erilaisilta kuvauslaitteilta ja niistä tuotetaan lopputuotteita monenlaisilla prosessointiohjelmistoilla. Esim. fotogrammetrisella viikolla 2009 esitettiin n. 10 erilaista laajaformaattista ilmakehävaihtelukameraa, ja vielä useampia keskiformaattisia kameroita (Toth, 2009). Formaattilla tarkoitetaan kuvakokoa, joka alkuperäisten määritelmien mukaan on laajaformaattisilla kameroilla yli 60 Megapikseliä, keskiformaattisilla yli 40 Megapikseliä ja tätä pienemmät ovat pieniformaattisia. Digitaaliselle ilmakehävaihtelulle ei ole vielä olemassa standardeja eikä optimoituja menettelytapoja. Olosuhteet poikkeavat siis yhä enenevässä määrin yli kaksi vuosikymmentä vallinneesta tilanteesta, jolloin siviilipuolen ilmakehävaihtelumarkkinoita hallitsivat kahden kameravalmistajan tuottamat hyvin samankaltaiset 23 x 23 cm² reunamerkeillä varustetut kamerat ja tuotantoprosessit olivat pitkälle standardoidut. Vaihtelevassa ympäristössä laadunvalvonta muodostuu haasteelliseksi.

Tavoitteenamme on selvittää modernin ilmakehävaihtelun ominaisuuksia sekä luoda katsaus tulevaisuuteen viimeaikaisten tutkimustulosten perusteella. Kappaleessa 2 esitellään ilmakehävaihtelussa käytettäviä digitaalisia kamerajärjestelmiä ja kappaleessa 3 kuvaillaan ilmakehävaihtelun käsittelyä ja hyödyntämistä. Kappale 4 käsittelee ilmakehävaihtelun laadunvarmistusta testikentillä ja johtopäätelmät esitellään kappaleessa 5.

2. ILMAKEHÄVAIHTELUJÄRJESTELMÄT

Ilmakehävaihtelun on tarjolla monenlaisia kuvausjärjestelmiä, jotka usein jaotellaan kuvakokonsa ja suorituskykynsä puolesta laaja- tai keskiformaattisiin kartoituskameroihin sekä muihin ilmasta

operoitaviin (pieniformaattisiin) kameroihin. Grenzdörffer (2010) jaotteli ilmakehuuskamerat viiteen luokkaan seuraavasti: laajaformaattiset kamerrat, ammattilaistason keskiformaattiset kamerrat, puoliammattilaistason keskiformaattiset kamerrat sekä pieniformaattiset kaupalliset kamerrat, jotka voidaan luokitella amatöörilaitteisiin (mm. järjestelmäkamerat) sekä halpisiin pienkameroihin.

Keskeiset ilmakehuuskäyttöjärjestelmän komponentit ovat ilma-alus, kuvausjärjestelmä ja paikannus- ja navigointijärjestelmä (esim. Global Navigation Satellite System/Inertial Measurement Unit; GNSS/IMU). Kiinteänä osana ilmakehuuskäyttöjärjestelmään kuuluu kuvien jälkikäsittely. Ensimmäisessä vaiheessa suoritetaan kuvien esikäsittely, jossa korjataan pääosin laboratoriossa määritettyjen kalibrointiparametrien avulla kuvien sävyjä (esim. lens falloff, virheelliset pikselit) ja geometriaa (esim. linssivirheiden korjaaminen, kanavien rekisteröinti ja laajaformaattisen kuvan laskeminen). Toisessa vaiheessa suoritetaan kuvablokin georeferointi ja sävyjen korjaaminen (Kappale 3). Kaikki em. komponentit ovat keskinäisessä vuorovaikutussuhteessa ja osaltaan vaikuttavat kuvatuotannon tehokkuuteen ja laatuun.

Järeimpiä laitteistoja ovat laajaformaattiset joko matriisi- tai rivikeilainperusteella toimivat kartoituskamerat. Laajaformaattiset matriisikamerat ovat luonteeltaan monikamerajärjestelmiä, jotka tuottavat korkearesoluutioista pankromaattista kuvaa sekä matalampiresoluutioista multispektraalia kuvaa. Näihin päiviin asti virtuaalinen 1-kanavainen mustavalkoinen kuva on muodostettu 4-9 osakuvasta, mutta laajoihin CCD kennoihin liittyvät haasteet on vihdoinkin voitettu ja Intergraph tarjoaa laajaformaattista DMC-kameraa yhdellä CCD kennolla. Laajaformaattiset kamerrat tuottavat nykyisin 100-250 Megapikselin kokoista suuriresoluutioista kuvaa, kuvakoko on esimerkiksi UltraCam Eagle monikamera järjestelmässä 20 010 x 13 080 pikseliä (Linssi 1: $f_1=80$ mm, Linssi 2: $f_2=210$ mm: Avauskulma (field of view) $f_1: 66^\circ \times 46^\circ$, $f_2: 28^\circ \times 20^\circ$; Pikseli $5,2 \mu\text{m}$) (Microsoft UltraCam, 2011) ja yhteen laajaan DALSA:n valmistamaan CCD kennoon perustuvassa Intergraphin DMC II 250 kamerassa $17\,216 \times 14\,656$ pikseliä ($f=112$ mm; Avauskulma $46,6^\circ \times 40,2^\circ$; Pikseli $5,6 \mu\text{m}$) (Intergraph, 2011). Järjestelmiin sisältyy elektroninen kuvaliikkeen kompensointi. Rivikeilainten markkinoilla Leica Geosystems ADS40/80 on ollut markkinajohtaja (Leica Geosystems, 2011); ADS-sensorissa yhdelle kuvatasonleveydelle voidaan sijoittaa korkeintaan 12 leveydeltään 12 000 pikseliä CCD-linjaa ja stereoskooppinen tieto saadaan asettamalla linjat kuvatason eri osiin. Kaikki laajaformaattiset järjestelmät tuottavat monikanavaista tietoa sinisellä, vihreällä, punaisella ja lähi-infrapuna-alueella ja kullakin kanavalla on oma CCD-kennonsa. Erityisesti ADS järjestelmässä on huomioitu kokonaisvaltaisesti tarkka spektritiedon käsittely (Kappale 3.3). Kartoituskameroissa tarkan geometrisen tiedon tuotanto on huomioitu kuvauskameran rakenteessa sekä jälkiprosessoinnissa. Kuvausjärjestelmät on varustettu stabiloidulla kamerajalustalla sekä GNSS/IMU-järjestelmällä. Valtaosa kaupallisesti saatavilla olevista fotogrammetrisista perusohjelmistoista on kehitetty laajaformaattisia matriisikuvia ajatellen.

Keskiformaattiset kartoituskameroiden kuvakoko on jatkanut kasvuaan ja on nykyään laajimmillaan 80 Megapikseliä (Petrie, 2010). Järjestelmät ovat joko monikamerajärjestelmiä tai koostuvat yhdestä kamerasta, esimerkkejä ovat Applanix/Trimble DSS 439, Trimble Aerial Camera, IGI-Systems DigiCAM, Leica Geosystems RCD105 sekä Intergraph RMK-D (Toth, 2009; Grenzdörffer, 2010; Petrie, 2010). Järjestelmien toteutuksessa on laatueroja mm. kuvauskameran, kamerajalustan ja GNSS/IMU-järjestelmän osalta, jotka parhaimmillaan ovat laajaformaattisten kartoituskameroiden tasoa (Grenzdörffer, 2010). Kuvakoon ohella järjestelmät poikkeavat laajaformaattisista järjestelmistä värierottelun osalta. Multispektraali tieto tuotetaan useimmiten käyttäen Bayer-matriiseja, mutta myös tarkempia – ja kalliimpia – toteutuksia on tarjolla. Bayer-matriisiin liittyviä ongelmia ovat heikompi kuvalaatu, rajoittuminen kolmeen kanavaan sekä

kuvaliikkeen kompensoinnin monimutkaisuus (Petrie, 2010). Kaupallisesti saatavilla olevat fotogrammetriset perusohjelmistot soveltuvat hyvin keskiformaattisten kuvien käsittelyyn.

Ilmakuvausta tehdään yleisesti myös valokuvaukseen tarkoitetuilla CCD tai CMOS tekniikkaan perustuvilla järjestelmäkameroilla, kuten Canon EOS-1Ds Mark III (21 Megapikseliä) ja Nikon 3Dx (24,5 Megapikseliä) sekä myös halvemmilla ja keveämmillä kameroilla (Grenzdörffer, 2010; Petrie 2010). Kuluttajakameroiden kehittyminen on nopeaa ja niiden avulla saadaan rakennettua edullisesti uusimman tekniikan taseisia kuvausjärjestelmiä. Tarkkoihin kartoituskameroihin verrattua kuvalaatu on heikompi johtuen mm. heikommasta kamerajalustasta, puuttuvasta kuvaliikkeen kompensoinnista sekä Bayer-matriisiin perustuvasta värierottelusta. Kuvakoko on pienempi, mikä voi hankaloittaa stereokartoitusmittauksia ja tiedon prosessointia (georeferointi, kuvakorjaus). Kuvien geometrisessä käsittelyssä tulee huomioida, että kuvavääristymät voivat olla suuriakin ja että sensori voi olla epästabiili. Kamerat tuottavat joko värikuvia tai väärävärikuvia ja sävyjen käsittelemisellä haasteita voi asettaa sensorin epästabiilius. Halpojen ja keveiden GNSS/IMU-järjestelmien kehittäminen on yksi tärkeä tulevaisuuden haaste (Miraliakbari ym., 2010). Perinteiset fotogrammetriset ohjelmistot eivät sovellu kovin hyvin pieniformaattisten kuvien käsittelyyn. Maailmanlaajuisesti tunnettu pieniformaattisille kuville soveltuva kaupallinen ohjelmisto on Suomessa kehitetty EnsoMosaic (MosaicMill, 2011).

Viistokuvauksen suosio on lisääntynyt voimakkaasti. Viistokuvausta voidaan tehdä käyttäen yhtä kameraa, mutta erityisen tehokkaita ovat useita eri suuntiin katsovia kameroita yhdistävät kuvauslaitteet. Suosittu Maltan risti-periaate yhdistää viisi kameraa, joista yksi on pystykamera ja neljä ovat eteen, taakse, vasemmalle ja oikealle kuvaavia viistokameroita (Petrie, 2010). Esimerkki kaupallisesti saatavilla olevasta järeästä Maltan risti-tyypin viistokuvausjärjestelmästä on Track'Air Midas, jossa käytetään laboratoriossa kalibroituja, Zeiss linsseillä varustettuja Canon EOS-1Ds Mark II kameroita. Kamerat asennetaan kehikkoon keskinäisen liikkumisen estämiseksi ja paikannus/navigointijärjestelmänä käytetään Applanix POSAV GNSS/IMU – järjestelmä (Midas, 2010). Tärkeä viistokuvauspalvelujen tuottaja on Pictometry (2011), joka on suorittanut viistokuvauksia maailmanlaajuisesti suurissa kaupungeissa. Viistokuvia löytyy monista Internetin karttasovellutuksista Birds view-nimellä. Perinteiset fotogrammetriset ohjelmistot soveltuvat huonosti viistokuvien käsittelyyn. Erityisiä viistokuville tehtyjä sovellutusohjelmistoja ovat Oblivision (Idan, 2011), Electronic Field Study (Pictometry, 2011) sekä MultiVision (Ofek, 2011). Viistokuvien käsittelymenetelmien kehittäminen on yksi tärkeä tulevaisuuden tutkimushaaste.

Laajaformaattisten kartoituskameroiden vahvuuksia ovat niiden luotettavuus, prosessoinnin tehokkuus sekä lopputuotteiden laatu. Yleisesti ottaen laajaformaattiset systeemit eivät ole parhaita vaihtoehtoja nopeaa vastetta vaativiin, tiheästi toistuviin ja pienialaisiin tehtäviin. Keskiformaattisia kameroita käytetään laserkeilausjärjestelmien osana ja ne soveltuvat hyvin pienialaisiin projekteihin ja viistokuvien tuotantoon. Nykyään digitaaliset keskiformaatin kamerat ovat kypsiä järjestelmiä ja ajantasaisen tiedontarpeen myötä todennäköisesti niiden suosio lisääntyy tulevaisuudessa. Pieniformaattisilla kameroilla on myös laajeneva käyttöalue ja ohjelmistojen kehittymisen myötä myös kuvien käsittely helpottuu ja tarkentuu. Viistokuvien käyttö on lisääntynyt erityisesti tarkkojen kaupunkimallien tarpeen myötä. Henkilökohtainen paikantaminen ja kollektiivisen katunäkymän koostaminen jokapaikan tietotekniikan avulla ovat lähitulevaisuudessa viistokuvista hyötyviä sovellusalueita. Aiemmin vain vähän käytetty teräväpiirtovideokuvaus voisi tuoda osittaista apua katveiden taakse näkemiseen ja kaupunkimallien tekemiseen.

Uuden tekniikan ominaisuudet tulee myös huomioida kuvankerauissa. Digitaalisten kuvien paremman radiometrian ansiosta kuvia voidaan kerätä entistä matalammilla auringon korkeuskulmilla, ja silti voidaan varjoissakin suorittaa mittauksia. Lentosuuntaista kuvauspeittoa voidaan kasvattaa perinteisesti käytetystä 60% ilman lentokustannusten lisääntymistä, esim. 80-90% asti, mistä on hyötyä mm. pintamallien ja tosiortokuvien tuotannossa. GNSS paikannuksella varustetuissa ilmakehuvausjärjestelmissä kuvanotto tapahtuu lähellä suunniteltua sijaintia, jolloin reunavaroja voidaan pienentää. Fotogrammetrian ja Kaukokartoituksen Seura on ylläpitänyt ilmakehuvaussuosituksia Suomessa, ja Seuran nimeämä työryhmä on nyt uudistamassa suosituksia digitaalista kuvausta varten (FKS, 2011).

3. ILMAKUVIEN PROSESSOINTI

Ilmakuvat tulee prosessoida käyttökelpoiseen muotoon, jotta niitä voidaan hyödyntää paikkatietojärjestelmissä ja muissa sovellutuksissa. Prosessoinnin vaiheita ovat georeferointi ja radiometrian korjaaminen. Digitaalisen ilmakehuvauksen uusia innovaatioita ovat pistepilvien luominen kuvansovituksen avulla sekä reflektanssikalibrointi.

3.1 Georeferointi

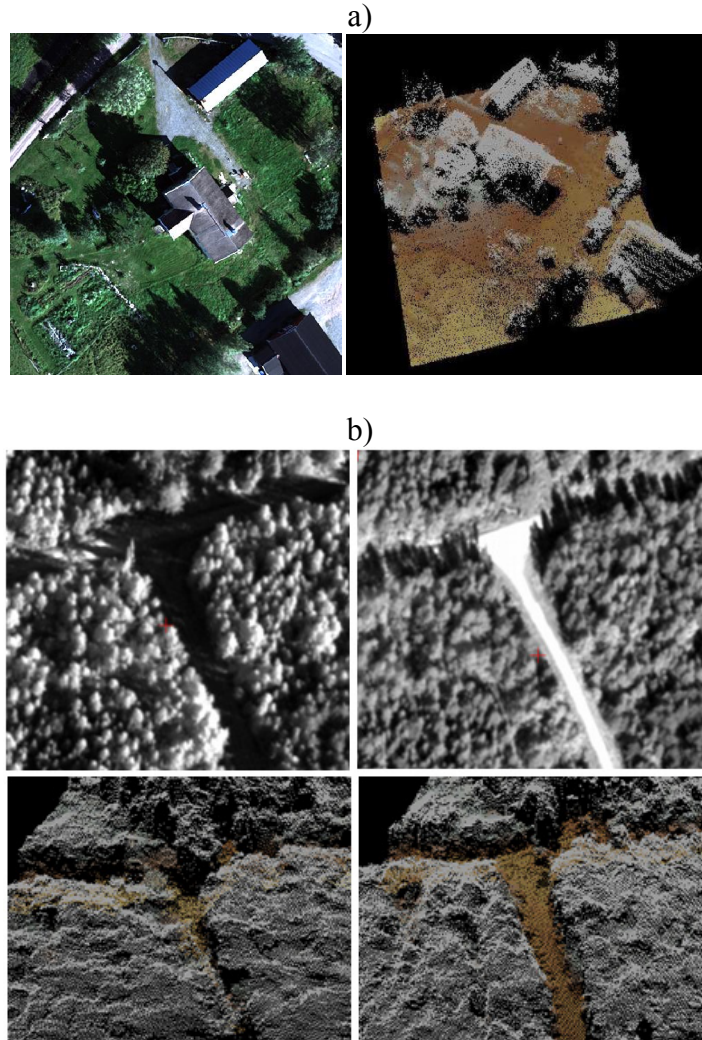
Georeferoinnilla määritetään kuvapisteen ja kohdekoordinaatiston välinen yhteys. Ilmakehuvaustuotteita hyödynnetään usein ortokuvina, mutta stereoskooppisen tiedon käyttö tulee myös lisääntymään.

Tarkat GNSS/IMU suorapaikannustekniikat sekä tarkat GNSS prosessointitekniikat (Virtual Reference Station, Precise Point Positioning) ovat tehostaneet georeferointiprosessia. Uusia edistysaskeleita ovat GNSS ja IMU datan prosessointi samassa laskennassa (tightly coupled solution), joka mahdollistaa tiukkojen kaarten tekemisen lentojonojen välillä ja parantaa muutenkin laskentatulosta. Kuvien georeferoinnissa saatetaan saavuttaa jopa pelkästään GNSS/IMU tietoon perustuvalla suorageoreferoinnilla monille sovellutuksille riittävä tarkkuus, joskin lopullisen tarkkuuden määrittää järjestelmien laatu ja erityisesti geometrisen kalibroinnin tarkkuus (Toth, 2009). Kuvamittaukseen perustuva menetelmä on blokkitasoitus, jolla tarkkuutta voidaan edelleen parantaa, jolloin automaattisesti mitattavilla liitospisteillä ja jo pienellä tukipistemäärällä kuvajoukko saadaan luotettavasti sijoitettua kohteeseen. Eri sensorityypeillä blokkitasoitukseen liittyy erilaisia haasteita ja huolellinen prosessointi on aina tärkeää (Kappale 2). (Honkavaara, 2008; Honkavaara ym., 2011a; Jacobsen ym., 2010)

Georeferointiprosessit kehittyvät myös uusien kuvansovitusmenetelmien ansiosta. Sosiaalisia kovakollaasisovellutuksia varten on kehitetty tehokkaita kuvansovitusmenetelmiä (mm. SIFT ja SURF) (Lowe, 2004; Frahm, ym., 2010). Näiden menetelmien avulla pystytään järjestämään suurikin kalibroimattomilla kameroilla, vaihtelevissa kuvaolosuhteissa ja erilaista kuvausperspektiiveistä kerätty kuvajoukko kokonaan ilman ulkoisen orientoinnin alkulikiarvoja. Esimerkkejä olemassa olevista palveluista ja sovellutuksista ovat Microsoftin Photosynth (2011) ja Geosynth (2011). Odotettavissa on, että näitä menetelmiä kehitetään edelleen voimakkaasti mm. yksityiskuvaajien tarpeisiin. Sama tekniikka soveltuu hyvin myös ilmasta kerättyjen pysty- ja viistokuvien käsittelyyn.

3D pisteenmääritystarkkuus on fotogrammetrisen tiedontuotannon geometrisen tarkkuuden keskeinen laatuindikaattori. Tarkkuus riippuu kokonaissysteemin tarkkuudesta, sisältäen erityisesti kuvien georeferoinnin tarkkuuden, sekä kuvasäteiden leikkauskulmasta (kanta/korkeus-

suhde) ja lukumäärästä. Koetyöt ovat osoittaneet, että laajaformaattisilla kameroilla saavutetaan tyypillisissä käyttötilanteissa GSD/2 tasotarkkuus ja GSD korkeustarkkuus. Keskiformaattiset kamerat tuottavat parhaimmillaan yhtä hyvää tarkkuutta ja myös pieniformaattisilla kameroilla päästään huolellisella prosessoinnilla hyvään tarkkuuteen. (Honkavaara, 2008; Jacobsen ym., 2010; Honkavaara ym., 2011)



Kuva 1. a) 5 cm resoluutiosta kuvasta johdettu pintamalli. b) 4 km korkeudelta kuvatulta seteremallilta (GSD 40 cm) luotu pintamalli. Vasemmalla varjoinen kuva ja oikealla aurinkoinen.

3.2 Automaattinen pintamallien tuotanto

Tärkeä ilmakuvien prosessoinnin innovaatio ovat uudet kuvansovitusmenetelmät, jotka tuottavat tiheitä pintamalleja (Haala ym., 2010; Leberl ym., 2010). Uusilla menetelmillä pystytään mittaamaan korkeusmalleja jopa pikselin resoluutiolla ja lopputuotteet ovat kohteen pintaa kuvaavia pistepilviä (Kuva 1). Kattavia malleja saadaan käyttämällä suuria peittoprosentteja. Tutkimukset ovat osoittaneet, että näillä menetelmillä tuotettujen pistepilvien tarkkuus lähestyy stereokartoituksen tarkkuutta. Riippumattomilla tarkistuspisteillä tehdyssä vertailussa korkeusmallien tarkkuus oli jopa parempi kuin GSD (Haala ym., 2010; Honkavaara ym., 2011a).

Kuvansovitukseen perustuvaan pistepilvien tuotantoon liittyy vielä haasteita. Kuvansovitukselle hankalia kohteita ovat vesistöt ja sävyiltään tasaiset pinnat. Myös ohuet kolmiulotteiset kohteet,

kuten sähkötolpat ja lehdeettömät puut aiheuttavat hankaluuksia. Ongelmia on myös havaittu sovituksessa varjojen peittämällä alueilla (Kuva 1b) (Haala ym., 2010).

3.3 Radiometrian korjaus ja reflektanssikalibrointi

Laadukas radiometria on tärkeä modernin digitaalisen ilmakuvauksen etu filmikuvaukseen verrattuna. Alhaisen kohinatason ansiosta kuvilla on laaja dynaaminen alue (Markelin ym., 2008) ja järjestelmät ovat myös stabiileja (Markelin ym., 2010a). Näiden ominaisuuksien ansiosta kuvat soveltuvat hyvin automaattiseen kuvansovitukseen sekä mahdollistavat laadukkaan kuvatuotannon heikommissakin kuvausolosuhteissa (matala auringon korkeuskulma, kuvaus pilvien alapuolella). Kuvat soveltuvat myös reflektanssikalibrointiin.

Reflektanssikalibroinnissa kuvien sävyarvot muunnetaan kohteen heijastavuutta kuvaavaksi suureeksi. Haasteita reflektanssikalibroinnille asettavat monet kuvien sävyarvoihin vaikuttavat tekijät, joista tärkeimpiä ovat itse kohde, kohteen ympäristö, ilmakehä, kuvauslaite sekä kuville tehtävä prosessointi. Suuriresoluutioisessa fotogrammetrisessä kuvaamisessa keskeiset sensorille tulevan säteilyn (L_{at_sensor}) komponentit ovat kohteen heijastama auringonsäteily (L_s), heijastunut taivaansäteily (L_{sky}), taustasta tuleva heijastunut säteily (L_{bg}) sekä tämän moninkertaiset heijastumat (L_{bg_multi}); naapuristoheijastus (L_{adj}) ja ilmakehän säteily (L_{atm}) ovat säteilykomponentteja, jotka eivät kannu mitään tietoa kohteesta (Schott, 2007):

$$L_{at_sensor} = L_s + L_{sky} + L_{bg} + L_{bg_multi} + L_{adj} + L_{atm}. \quad (1)$$

Esimerkiksi tyypillisillä pilvettömällä säällä kerätyillä ilmakuvilla merkittävin säteilykomponentti on heijastunut suora auringonvalo, eli

$$L_s(\lambda, \theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \rho(\lambda, \theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \tau_s(\lambda) \tau_v(\lambda) E_s^0 \cos \theta_s / \pi, \quad (2)$$

missä τ_s ja τ_v ovat ilmakehän läpäisevyys ilmakehän yläpuolelta kohteeseen ja kohteesta sensoriin, θ_i and θ_r are ovat tulevan auringonvalon ja heijastuneen auringonvalon zenittikulmat vertikaalista ja φ_i and φ_r are ovat vastaavat atsimutikulmat. $\rho(\lambda, \theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$ on bidirectional reflectance distribution function (kaksisuuntaisheijastavuusfunktio, BRDF), joka kuvaa kohteen heijastavuuden riippuvuutta valaistuksen ja havaitsijan sijainnista kohteeseen nähden, mikä pitää ottaa huomioon laajalla havaintokulmalla kuvaavien ilmakuvasesensoreiden tapauksessa.

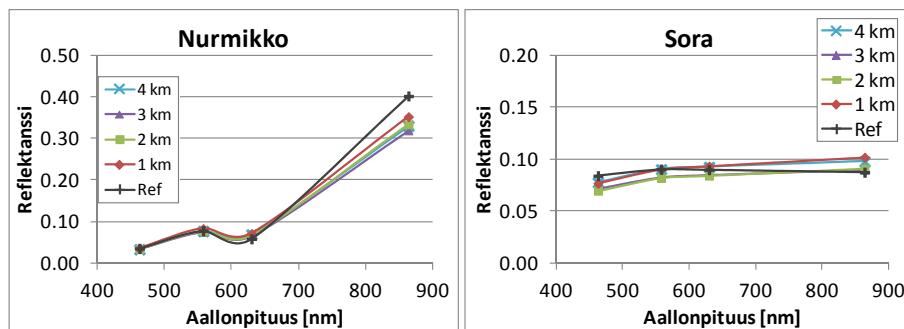
Kaavasta 2 nähdään myös, että auringon laskiessa maanpinnalle tulee vähemmän auringon säteilyä. Toinen äärilaita on varjot, joissa L_s komponenttia ei ole ollenkaan.

Sensorin ominaisuudet lopulta määrittävät kuinka paljon ja kuinka tarkasti tuleva säteily mitataan. Pikselin harmaasävyarvo (digital number, DN) saadaan seuraavasti (olettaen että musta kohina on huomioitu):

$$DN = GA_d \Omega \tau \int_0^{\infty} L_{at_sensor}(\lambda) S(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

missä G on systeemin vahvistus (gain), A_d on CCD elementin pinta-ala, Ω is on linssin aperttuuri, τ on integrointiaika, $S(\lambda)$ is on systeemin spektraali vaste ja λ on aallonpituus. Kaavan 3 sensorimalli on annettu Intergraphin DMC-kameralle, joka on mm. käytössä MML:ssa (Ryan ja Pagnutti, 2009).

Markkinoilla on jo kaupallisia ohjelmistoja, jotka suorittavat reflektanssikalibrointia. Esimerkiksi Leica Geosystems tarjoaa ADS40/80 ilmakuvakameralleen XPro-ohjelmiston, jolla voidaan tuottaa maastoreflektansseiksi kalibroituja ilmakuvia (Beisl ym., 2008; Markelin ym. 2010b). XPro on tarkoitettu suurten kuvamäärien automaattiseen prosessointiin, joten siinä on pyritty minimoimaan ulkopuolista dataa tai operaattoria vaativat toiminnot. Ohjelman radiometriset korjaukset perustuvat laboratorioissa tehtyyn kameran kalibrointiin, kuvadatasta kerättyihin ilmakehäparametreihin ja semiempiiriseen ilmakehän mallinnukseen. Kameran radiometrisen kalibroinnin ansiosta kameran kuvalle tallentamat sävyarvot voidaan muuntaa fysikaaliseksi säteilysuureeksi eli radianssiksi. Seuraavaksi kovalta etsitään tumma kohde, jonka perusteella voidaan määrittää kameralle tuleva ilmakehän sirottama säteily. Kun lisäksi on tiedossa auringon keskimääräinen spektraalinen irradianssi, voidaan sopivalla fysikaalisella mallilla laskea kuvadatasta loputkin tarvittavat suuret (ilmakehän läpäisevyys auringosta maahan ja maasta kameralle) ja ratkaista iteratiivisesti haluttu kohteen reflektanssi maan pinnalla. Näin saatu reflektanssi on suuntariippuvainen eli pätee vain kyseessä olevalle kameran havainto- ja auringon valaisukulmille. XPro-ohjelmassa on lisäksi tarjolla kokeellinen korjausmenetelmä, joka muuntaa tämän suuntariippuvaisen maastoreflektanssin vastaamaan suoraan ylhäältäpäin tehtyä havaintoa. Tällainen ns. BRDF-korjaus mahdollistaa mm. saumattomien kuvamosaiikkien luomisen. Nurmikon ja soran reflektanssispektrit kuvassa 2 ovat esimerkkejä reflektanssikalibroinnista.



Kuva 2. Nurmikon ja soran reflektanssit neljältä eri lentokorkeudelta otetulta kovalta sekä maastossa mitattu referenssireflektanssi. Käytössä oli ATCOR-4 ohjelmisto, kameran in-flight kalibrointi ja kuvailta määritetyt ilmakehäparametrit.

Geodeettinen laitos johti Eurooppalaista tutkimusprojektia (Euroopan paikkatiedon tutkimus-yhteisön tutkimusprojektia, EuroSDR) ”Radiometric Aspects of Digital Photogrammetric Images” (Honkavaara ym., 2009; 2011b). Projektissa mm. vertailtiin erilaisia reflektanssikalibroinnin menetelmiä. Tutkimusta varten kerättiin kuvia ADS40 ilmakuvaukskameralla 1 km, 2, km 3 km ja 4 km korkeudelta Hyytiälän testialueella. Alueella sijaitsee myös Helsingin yliopiston ilmakehätieteiden laitoksen ylläpitämä SMEAR-II havaintoasema, joka on osa NASA:n AERONET-verkkoa. Tämä asema mittaa monipuolisesti ilmakehän ominaisuuksia, ja tätä dataa voidaan käyttää hyväksi ilmakuville tehtävässä ilmakehäkorjauksessa. Kuville suoritettiin reflektanssikalibrointi käyttäen järjestelmän omaa kalibrointiohjelmistoa (XPro) sekä erityisesti hyperspektraalien ilmakuvakameroiden käsittelyyn tarkoitettua ATCOR-4 ohjelmistoa. Tarkkuustutkimusta varten testialueella oli tarkasti tunnettuja reflektanssireferenssikohteita. Ne käsittivät neljä kappaletta Geodeettisen laitoksen reflektanssipressuja (Kuva 3: kohteet P05, P20, P30 ja P50, sekä kirkas valkoinen teflonlevy D), joiden heijastusominaisuudet eri valaisu- ja havaintokulmilla on mitattu tarkasti laboratorioissa. Lisäksi ilmakuvauksen aikana näiden pressujen nadiiriheijastusta mitattiin spektrometrillä. Pressujen lisäksi kentällä mitattiin erilaisten pysyvien kohteiden nadiiriheijastusta (A: asfaltoitu tie, B ja C: nurmikko, E: hiekka, F ja G: soratie).



Kuva 3. Reflektanssirenessikohteita Hyytiälän ADS40 kampanjassa. P05, P20, P30 ja P50: siirrettäviä pressuja; A: asfaltti; B, C: nurmikko; E: hiekka; F, G: sora.

Tutkimuksessa vertailtiin XPro- ja ATCOR-4 ohjelmien tuottamia maastoreflektansseja referenssimittauksiin. Vertailut tehtiin erikseen pressuille, epäorgaanisille kohteille (sorat, hiekka ja asfaltti) sekä nurmikolle. Parhaimmillaan molemmilla ohjelmilla päästiin pressuilla alle 5 % virheeseen, epäorgaanisilla kohteilla reilun 5 % tarkkuuteen ja nurmikolla noin 10 % tarkkuuteen. Tulokset riippuivat mm. aallonpituudesta, käytössä olleesta kameran radiometrisestä kalibroinnista, lentokorkeudesta sekä kuvilla mahdollisesti näkyvistä pilvistä. XPro:n etuja olivat suurten datamäärien tehokas ja automaattinen käsittely, ongelmia olivat mm. suurehkot virheet sinisellä kanavavalla sekä nurmikko. ATCOR-4:n etuja olivat mm. mahdollisuus kameran radiometriseen kalibrointiin kuvaolosuhteissa sekä mahdollisuus interaktiiviseen ilmakehän parametrien määrittämiseen kuvadatasta; ongelmia aiheuttivat mm. raskas ja paljon muistia vaativa laskenta. Lisää projektin tuloksia esittelevät Honkavaara ym. (2009, 2011a, b) sekä Markelin ym. (2010a, b).

Edellä kuvattu menetelmä toimii radiometrisesti kalibroiduilla, stabiileilla sensoreilla. Muille ilmakuvajärjestelmille menetelmiä tulee vielä kehittää. Filmikuvauksen aikana ilmakuvien sävyjen korjaamiseen ei laajamittaisesti käytetty tarkkoja menetelmiä, johtuen filminkäsittelyprosessin epästabiiliudesta. Satelliittikuvien ja hyper/multispektraalien kameroiden kohdalla reflektanssikalibrointia on suoritettu pitkään.

3.4 Uuden ilmakuvauksen sovellutuksista

Ilmakuvauksen nykyisiä sovellutuksia esiteltiin Kappaleessa 1. Seuraavassa sovellutuksia tarkastellaan lyhyesti lähinnä uuden tekniikan tuomien mahdollisuuksien näkökulmasta.

Uudet tarkat korkeusmallien mittausten menetelmät (laserkeilaus, kuvansovitus) sekä reflektanssikalibrointi mahdollistava uuden sukupolven ortokuvatuotannon. Tarkoilla pintamalleilla pystytään tuottamaan tosiortokuvia, joiden tarkkuus parempi kuin GSD (Honkavaara ym. 2011a). Uusilla reflektanssikalibroinnin menetelmillä kuvien sävykorjaus ja mosaikointi on tarkkaa ja automaattista (Markelin ym. 2010b). Kalibroiduilta ilmakuvilta voidaan myös tuottaa muita tuotteita, kuten kasvillisuusindeksikarttoja (normalized differential vegetation index, NDVI).

Esim. Espanjassa koko Katalonia ilmakuvaan vuosittain 20 cm resoluutiolla, ja ortokuvat sekä näistä johdetut NDVI-ortokuvat luovutetaan hyödyntäjille nopeasti kuvauksen jälkeen.

Kaupunkimallien ja karttojen tuotanto ja ajantasaisuus ovat tärkeitä ilmakuvaussovellutuksia. Ilmakuvien tulkintaa tehdään nykyään usein visuaalisesti, mikä on ihmistyövoimaa vaativa, virhealtis prosessi (Spreckels ym., 2010). Automaattisia ratkaisuja kehitetään yhdistämällä joko laserkeilainten tai kuvansovituksen tuottamaa korkeustietoa ja kuvien sävyarvoja (Zepedin ym., 2006; Le Bris ja Boldo, 2008), ja näitä menetelmiä voidaan edelleen parantaa hyödyntämällä reflektanssikalibroituja sävytietoja.

Metsäsovellutuksissa laserkeilauksella tuotettujen pintamallien ja ilmakuvilta irrotetun reflektanssitudon käyttöä tutkittiin puulajien luokittelussa (Korpela ym., 2011). Tutkimus osoitti, että sävyarvojen hyödyntäminen yksittäisen puun tasolla oli haastavaa puulajinen sisäisen hajonnan vuoksi. Tutkimukset ovat myös osoittaneet, että uudet kuvansovitusmenetelmät tuottavat tarkkoja pintamalleja metsissä (Baltsavias ym., 2008).

Peltojen täsmäviljely ja kasvun seuranta sekä maatalouteen liittyvä valvonta ovat maailmanlaajuisesti tärkeitä kysymyksiä. Ilmakuvilta tuotettava reflektanssitudon, NDVI-kuvat ja pintamallit saattavat olla toimivia ratkaisuja sekä viljelijöiden että viranomaisten tarpeisiin.

Ympäristössä tapahtuvien muutosten tunnistaminen on uusi ilmakuvaussovellutusalue. Pintamallien ja reflektanssitudon ansiosta kuvat soveltuvat esim. automaattiseen metsien myrskytuhojen tunnistamiseen sekä metsäpalossa kärsineiden puiden tunnistukseen. Ympäristön ääri-ilmiöiden odotetaan lisääntyvän ilmastomuutoksen myötä.

Kun kalibroituja kuvia alkaa kertyä, niin historiallisten aikasarjojen vertailu tulee mahdolliseksi, mikä osaltaan voi helpottaa automaattista muutostulkintaa.

4. KUVATUOTANNON LAADUNVARMISTUS

Kuvilta johdettuun tietoon perustuvan päätöksenteon perusta on kuvien laatu. Kuvatuotannon laadunvarmistus on haastava tehtävä nopeasti kehittyvässä ilmakuvaussovellutuksen toimintaympäristössä. Ilmakuvausjärjestelmien laadussa on eroja ja myös laitteissa voi olla vikoja.

Testikentät ovat yksi tapa hallita kuvatuotannon laatua. Geodeettinen laitos ylläpitää fotogrammetristä testikenttää Kirkkonummen Sjökuullassa (Honkavaara, 2008). Testikentän käyttö lisääntyi merkittävästi suorapaikannusjärjestelmien käyttöönoton jälkeen. MML ja kuvatuottajat määrittävät järjestelmien kalibroinnin Sjökuullassa kuvauskauden alussa. Testikentällä on suoritettu kuvauksia monilla kuvausjärjestelmillä tutkimustarkoituksessa, sisältäen kaikki ensimmäisen sukupolven laajaformaattiset fotogrammetriset kamerat sekä myös keskiformaattisia kameroita ja hyperspektraaleja järjestelmiä.

Sjökuullassa geometristä kalibrointia/validointia voidaan suorittaa pieni- ja suurimittakaavaisille ilmakuvaussovellutuksille, maastoresoluutioalue on noin 3 cm – 1 m. Suurimittakaavaiseen kalibrointiin tarkoitettulla kentällä on n. 40 signaloitua kiintopistettä 1 km x 1 km alueella (Kuva 4). Pienimittakaavaisin alue on kooltaan 10 km x 10 km. Radiometriaa varten testikentällä on pääosin sorasta tehtyjä pysyviä reflektanssikohteita ja kampanjoissa voidaan käyttää myös siirrettäviä reflektanssipressuja. Tärkeä osa radiometriasta testikenttää on GL:n kehittämä kenttägoniospektrometri, FIGIFIGO, jolla voidaan tarkasti mitata referenssikohteiden

heijastavuutta valaistus- ja katselusuunnan funktiona (Suomalainen ym., 2009). Erotuskyvyn määrittämistä varten Sjöskullan testikentällä on pysyviä sorasta tehtyjä viivatestikuvioita sekä reunaviivakohde. Lisäksi käytettävissä on siirrettäviä erotuskykykohteita.



Kuva 4. Esimerkki 1 km x 1 km alueelle lennetystä ilmakuvablokista (Ilmakuvaus: Maanmittauslaitos, Ortokuvamosaiikki: GL)

Tutkimukset ovat osoittaneet uuden digitaalisen ilmakuvauksen laadun, mutta myös paljastaneet testattujen järjestelmien toiminnassa puutteita (Honkavaara, 2008; Markelin ym., 2008, 2010a, 2010b; Honkavaara ym., 2011a).

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Ilmakuvaus on tehokas keino tuottaa tietoa ympäristöstä. Uusilla kameroilla, GNSS/IMU-tekniikoilla, kuvansovitusmenetelmillä ja reflektanssikalibroinnilla pystytään tuottamaan luotettavaa kuvatietoa automaattisesti. Osa näistä ominaisuuksista on vasta demonstroitu, mutta osa on jo käytössä tuotantoympäristöissä. Digitaalinen ilmakuvaus on jo osoittautunut filmikuvasta tehokkaammaksi ja laadukkaammaksi kuvankeruun sekä jälkiprosessoinnin osalta.

Odotamme, että ilmakuvaus tulee olemaan osa kokonaisvaltaista mittausprosessia, jolloin ilmakuvat yhdistetään muihin kaukokartoitusaineistoihin, kuten laserkeilaus, tutkakuvaus sekä satelliittikuvaus. Ilmakuvausta voidaan nykyään tehdä hyvin monenlaisilla menetelmillä ja käytettävä menetelmä määräytyy tehtävän vaatimusten ja kustannustehokkuuden mukaan. Erilaisten tietolähteiden tehokas yhdistäminen sekä ajantasaisen ja luotettavan tulkintatiedon tuottaminen päättäjille ja muille käyttäjille edellyttävät laadukasta kuvatietoa ja tulkintamenetelmien automatisointia, mihin nykyilmakuvaus antaakin hyvät eväät.

Digitaalinen ilmakuvaus on jo kypsää tekniikkaa, mutta odotettavissa on että kehittyminen jatkuu edelleen. Kuvaussensorien kuvalaatu, spektraalit ominaisuudet ja kuvakoko paranevat edelleen. GNSS/IMU tekniikka tarjoaa jo luotettavia ja tarkkoja ratkaisuja, mutta erityisesti pienien ja keveiden laitteiden suorituskykyä tulisi edelleen kehittää. Georeferointimenetelmien osalta tulisi kehittää menetelmiä pysty- ja viistokuvien joustavaan prosessointiin. Radiometrisen korjaamisen menetelmiä tulisi kehittää; menetelmien suorituskyky on jo demonstroitu, mutta tehokkaita ratkaisuja ei vielä ole saatavilla kaikkiin tuotantoympäristöihin. Uusia tarkkoja kuvansovitus-

menetelmiä pintamallien luomiseksi tulee tutkia ja kehittää lisää sekä pistepilvien hyödyntämistä tulee kehittää myös käytännön sovellutuksissa.

Uudet aineistot antavat hyvät mahdollisuudet automatisoida ja tehostaa tulkintaprosesseja. Suurien datamäärien prosessointi ja tiedon irrottaminen raakadatasta ovat keskeisiä haasteita tulevaisuudessa.

KIITOKSET

Digitaalista ilmakehän kuvausta koskevia tutkimushankkeita ovat rahoittaneet Suomen Akatemia (Projektinumero 134181) ja Maa- ja metsätalousministeriö. Kiitämme FKS ilmakehän kuvaussuositustyöryhmä: Jan Biström, Kari Ingberg, Kimmo Isokoski, Kimmo Junttila, Pentti Kupari, Petri Rönnholm, Marjut Witikainen ja Jussi Yrjölä, mielenkiintoisista keskusteluista. Kiitämme kaikkia Geodeettisen laitoksen työntekijöitä, jotka ovat osallistuneet Sjäskullan testikentän ylläpitoon ja ilmakehän kuvauskampanjoiden toteutukseen.

LÄHTEET

Baltsavias, E., Gruen A., Zhang, L. & Waser, L.T., 2008. High-quality image matching and automated generation of 3D tree models. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 29, No. 5, s. 1243-1259.

Beisl, U., Telaar, J. & Schönemark, M. V., 2008. Atmospheric correction, reflectance calibration and BRDF correction for ADS40 image data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Beijing, China, Vol. 37, part B7.

Everaerts, J. *NEWPLATFORMS - Unconventional Platforms (Unmanned Aircraft Systems) for Remote Sensing*. 102 pages. Frankfurt a.M. 2009. EuroSDR official publication 56.

FKS, 2011. Suomen Fotogrammetrian ja kaukokartoituksen seura. <http://foto.hut.fi/seura/fsprs.html> (11.8.2011).

Frahm, J.-M., Pollefeys, M., Lazebnik, S., Gallup, D., Clipp, B., Raguram, R., Wu, C., Zach, C. & Johnson, T., 2010. Fast robust large-scale mapping from video and internet photo collections. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 65, s. 538-549.

Grenzdörffer, G., 2010. EuroSDR Project: Performance of medium format digital airborne cameras – Final report. 33 s. Frankfurt a.M. 2010. EuroSDR official publication 58.

Haala, N., Hastedt, H., Wolf, K., Ressler, C. & Baltrusch, S., 2010. Digital photogrammetric camera evaluation – Generation of digital elevation models. *PFG Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*, Vol. 2010, No. 2, s. 99-115.

Honkavaara, E., 2008. *Calibrating digital photogrammetric airborne imaging systems using a test field*, Dissertation, Publications of the Finnish Geodetic Institute, N:o 140, Kirkkonummi, s. 1-130.

Honkavaara, E., Arbiol, R., Markelin, L., Martinez, L., Cramer, M., Bovet, S., Chandelier, L., Ilves, R., Klonus, S., Marshall, P., Schläpfer, D., Tabor, M., Thom, C. & N. Veje, 2009. Digital airborne photogrammetry – A new tool for quantitative remote sensing? – A state-of-the-art review on radiometric aspects of digital photogrammetric images. *Remote Sensing*, Vol. 1, No. 3, s. 577-605.

Honkavaara, E., Nurminen, K., Markelin, L., Suomalainen, J. & Ilves, R., 2011a. Calibrating and validating multispectral photogrammetric 3D imaging system at a permanent test site – Case study with an Intergraph DMC. *The Photogrammetric Record*, Vol. 26, No. 134, s. 229–249.

Honkavaara, E., Arbiol, R., Markelin, L., Martinez, L., Bovet, S., Bredif, M., Chandelier, L., Heikkinen, V., Korpela, I., Lelegard, L., Pérez, F., Schläpfer, D. & Tokola, T., 2011b. The EuroSDR project “Radiometric

aspects of digital photogrammetric images” – Results of the empirical phase. In Proceedings of the ISPRS Hannover Workshop 2011, June 14-17, 2011, Hannover, 8 s.

Idan, 2011. Idan Computers Ltd. <http://www.idan.com/> (11.8.2011)

Intergraph, 2011. <http://www.intergraph.com/photo/ia.aspx> (11.8.2011)

Jacobsen, K., Cramer, M., Ladstädter, R., Ressler, C. & Spreckels, V., 2010. GPF-Project: Evaluation of Digital Photogrammetric Camera Systems Geometric Performance. PFG Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, Vol. 2010, No. 2, s. 83-97.

Jacobsen, K., 2011. Images of change. Geospatial World, January 2011.

Korpela, I., Heikkinen V., Honkavaara E., Rohrbach F. & Tokola T., 2011. Variation and directional anisotropy of reflectance at the crown scale – implications for tree species classification in digital aerial images. Remote Sensing of Environment, Vol. 115, s. 2062–2074

Leberl, F., Irschara, A., Pock, T., Meixner, P., Gruber, M., Scholz, S. & Wiechert, A., 2010. Point clouds: Lidar versus 3D vision. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 76, No. 10, s. 1123-1134.

Le Bris, A. & Boldo D., 2008. Extraction of land cover themes from aerial ortho-images in mountainous areas using external information. Photogrammetric Record, Vol. 23, No. 12, s. 385-404.

Leica Geosystems, 2011. <http://www.leica-geosystems.com/en/index.htm>

Lowe, D. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. Int. J. Comput. Vis. 2004, Vol. 60, s. 91-110.

Luccio, M. Global ortho project. GIM International, Vol. 25, No. 7.

Markelin, L., Honkavaara, E., Peltoniemi, J., Ahokas, E., Kuittinen, R., Hyyppä, J., Suomalainen, J. & Kukko, A., 2008. Radiometric calibration and characterization of large-format digital photogrammetric sensors in a test field. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 74, No. 12, s. 1487-1500.

Markelin, L., Honkavaara, E., Hakala, T., Suomalainen & J., Peltoniemi, J., 2010a. Radiometric stability assessment of an airborne photogrammetric sensor in a test field. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 65, No. 4, s. 409-421.

Markelin, L., Honkavaara, E., Beisl, U. & Korpela, I., 2010b. Validation of the radiometric processing chain of the Leica ADS40 airborne photogrammetric sensor. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 38, Part 7A, 145-150.

Microsoft® Photosynth™ <http://photosynth.net/> (11.8.2011)

Microsoft® Geosynth™ <http://www.vexcel.com/geospatial/geosynth/> (11.8.2011)

Microsoft® UltraCam™ <http://www.microsoft.com/ultracam/en-us/default.aspx> (11.8.2011)

Midas 2011. <http://82.141.26.35/index.php/products/midas/midas-specs/> (11.8.2011)

Miraliakbari A., Hahn M. & Engels J., 2010. Development of a low-cost sensor system for use on gyrocopters, ISPRS Commission I Mid-Term Symposium - Image Data Acquisition - Sensors & Platforms, June 15-18, 2010, Calgary, Canada.

Mosaic Mill, 2011. <http://www.mosaicmill.com/> (11.8.2011)

Ofek, 2011. Ofek Multivision web-site <http://www.ofek-air.com/Ofek-MultiVision> (11.8.2011)

Petrie G., 2010, Current Developments in Airborne Digital Frame Cameras, As Displayed in the Intergeo 2010 Exhibition, GEO Informatics, December 2010, Vol. 13.

Pictometry, 2011. http://www.pictometry.com/government/product_online.shtml (11.8.2011)

- Ryan, R.E. & Pagnutti, M, 2009. Enhanced Absolute and Relative Radiometric Calibration for Digital Aerial Cameras. In: Fritsch, D., (Ed.), Photogrammetric Week 2009, Wichmann Verlag, Heidelberg, Germany, s. 81-90.
- Schott, J.R., 2007. Remote sensing: The image chain approach. Oxford University Press, Inc. 2nd ed., 666 s.
- Spreckels, V., Syrek, K. & Schlienkamp, A., 2010. DGPF Project: Evaluation of digital photogrammetric camera systems – stereoplotting. PFG Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, Vol. 2010, No. 2, s. 117-130.
- Suomalainen, J., Hakala, T., Peltoniemi, J., Puttonen, E., 2009. Polarised multiangular reflectance measurements using Finnish Geodetic Institute Field goniospectrometer. Sensors, Vol. 9, No. 5, s. 3891-3907.
- Toth, C., 2009. The state-of-the-art in airborne data collection systems – focused on LiDAR and optical imagery. In: Fritsch, D., (Ed.), Photogrammetric Week 2009, Wichmann Verlag, Heidelberg, Germany, s. 147-161.
- Zebedin, L., Klaus, A., Gruber-Geymayer, B. & Karner, K., 2006. Towards 3D map generation from digital aerial images, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing Vol. 60, No. 6, s. 413-427.