

LASERKEILAUS- JA KUVA-AINEISTOJEN AUTOMAATTINEN TULKINTA KARTTOJEN AJANTASAISTUKSESSA

Leena Matikainen¹, Juha Hyyppä¹, Kirsi Karila¹, Matti Vaaja² ja Antero Kukko¹

¹Geodeettinen laitos, Kaukokartoituksen ja fotogrammetrian osasto

²Aalto-yliopisto, Maanmittaustieteiden laitos

leena.matikainen@fgi.fi, juha.hyyppa@fgi.fi, kirsi.karila@fgi.fi, matti.t.vaaja@aalto.fi,
antero.kukko@fgi.fi

TIIVISTELMÄ

*Uudet kaukokartoitusaineistot ja tulkintamenetelmät edesauttavat automaattisten kuvatulkintamenetelmien käyttöönottoa karttojen ajantasaistuksessa. Artikkelissa esitellään aiheeseen liittyvää tutkimusta neljän esimerkisovelluksen kautta: rakennusten muutostulkinta, maanpeite-
luokittelu, peltolohkojen muutostulkinta ja korkeusmallin muutostulkinta. Tutkimukset osoittavat, että nykyisillä kuva- ja laseraineistoilla sekä tulkintamenetelmillä voidaan saavuttaa lupaavia tuloksia, joista todennäköisesti olisi hyötyä erityisesti vihjetietona ajantasaistuksessa. Toisaalta tutkimukset osoittavat myös, että automaattisten tulkintamenetelmien kehittäminen on edelleenkin haasteellinen tehtävä, joka vaatii paljon työtä ja asiaan perehtymistä. Kehitettyjen menetelmien vieminen käytäntöön asti vaatii myös lisää käytännönläheisiä testejä sekä operatiivisiin tuotantoprosesseihin sovittamista. Jatkossa lupaavia kehityskohteita ovat muun muassa moniaikaiset ilmalaserkeilaus- ja ilmakehävaikeudet, joita analysoimalla saadaan hyödyllistä muutostietoa, sekä liikkuvan kartoituksen käyttö ajantasaistuksessa.*

1. JOHDANTO

Kiinnostus ja tarve ajantasaiseen karttatietoon kasvaa sekä yksittäisten ihmisten elämässä että yhteiskunnan eri toiminnoissa. Esimerkkejä tästä ovat Internetin karttapalvelut, erilaiset navigointisovellukset sekä ympäristön tarkat 3D-mallit. Aineistojen tarve asettaa uusia haasteita myös tiedonkeruulle, jolta vaaditaan entistä enemmän tehokkuutta ja laatua. Ratkaisuja etsitään muun muassa eri työvaiheiden automatisoinnista.

Automaattisten kuvatulkintamenetelmien tutkimus ja kehitystyö alkoivat jo 1960- ja 1970-luvuilla digitaalisten kaukokartoitusaineistojen myötä (Kilpelä ja Kuittinen, 2011), mutta toimivien menetelmien kehittäminen on osoittautunut paljon oletettua vaikeammaksi haasteeksi. Vielä nykyisinkin käytännön kartoitustyö perustuu lähinnä visuaaliseen tulkintaan. Viime vuosina sekä aineistojen että menetelmien osalta on kuitenkin tapahtunut merkittäviä edistysaskeleita, jotka edesauttavat automaattisen tulkinnan hyödyntämistä. Tavoitteena ovat nykyisin erityisesti puoliautomaattiset prosessit, joissa esimerkiksi automaattisen muutostulkinnan tuloksia voitaisiin hyödyntää manuaalisessa ajantasaistuksessa (esim. Knudsen & Olsen, 2003; Champion, 2007; Holland ym., 2008).

Aineistojen osalta merkittäviä uutuuksia ovat olleet 2000-luvulla käyttöönotetut ilmalaserkeilaus ja digitaalinen ilmakehävaikeudet. Digitaalisista ilmakehävaikeuksista voidaan myös tuottaa korkeusinformaatiota automaattisesti. Laserkeilauksesta ja ilmakehävaikeuksista saatava tarkka korkeustieto helpottaa automaattisten tulkintamenetelmien kehittämistä oleellisesti. Esimerkiksi asfalttitiet ja rakennusten katot

saattavat olla kuvilla suhteellisen samannäköisiä automaattisen luokittelun näkökulmasta, mutta ne on helppo erottaa toisistaan, jos kohteen korkeus maanpinnasta on käytettävissä. Digitaalisissa ilmakuvissa on neljä kanavaa (punainen, sininen, vihreä ja lähi-infra), mikä mahdollistaa kohteiden entistä tarkemman erottelun myös heijastusominaisuuksiensa perusteella.

Tietokoneiden laskentakapasiteetti on jatkuvasti kasvanut, ja tämän ansiosta nykyisin voidaan käyttää entistä vaativampia kuvatulkitintamenetelmiä. Myös tulkintamenetelmät ovat kehittyneet, ja esimerkiksi aluepohjaisesta (object-based) tulkinnasta (Blaschke, 2010) on kaupallisten ohjelmistojen myötä tullut varteenotettava vaihtoehto perinteisille pikselipohjaisille luokittelumenetelmille. Pikselipohjaisiin tilastollisiin menetelmiin verrattuna aluepohjainen tulkinta on huomattavasti joustavampaa ja muistuttaa enemmän ihmisen tekemää visuaalista tulkintaa. Sävyarvotiedon lisäksi siinä voidaan hyödyntää esimerkiksi kohteiden muotoa ja sijaintia toisiinsa nähden, ja kohteiden tunnistamiseksi voidaan rakentaa monimutkaisiakin päättelysääntöjä. Säännöt voidaan laatia manuaalisesti aineistoihin perehtymisen jälkeen. Luokittelun kannalta mahdollisesti hyödyllisiä kohteiden ominaisuustietoja eli piirteitä on kuitenkin tyypillisesti paljon, joten automaattiset menetelmät sääntöjen muodostamiseksi ovat kiinnostavia. Sopivimmat piirteet voidaan valita ja säännöt muodostaa laskennallisesti esimerkiksi luokittelupuumenetelmän (Breiman ym., 1984) avulla.

Kartoituksen kannalta hyödyllistä laserkeilaus- ja kuva-aineistoa hankitaan paitsi lentokoneesta myös enenevässä määrin liikkuvan kartoituksen keinoin. Liikkuvalla kartoituksella (engl. mobile mapping) tarkoitettiin 1980-luvulla lähinnä videokameroiden avulla ajoneuvosta tapahtuvaa kartoitusta. Sensori-, paikannus- ja navigointitekniikan (erityisesti GPS- ja IMU/INS-tekniikan; GPS = Global Positioning System, IMU = Inertia Measurement Unit, INS = Inertia Navigation System) kehittyminen 1990- ja 2000-luvuilla mahdollistivat tarkat suorapaikannukseen perustuvat liikkuvan kartoituksen sovellukset. Nykyisin erilaisten sensorien, kuten laserkeilaimien, digitaalikameroiden, spektrometrien ja tutkien avulla saadaan monipuolista tietoa ajoneuvon ympäristöstä. Viimeisen kahden vuoden aikana suuret yritykset, kuten Google, Tele Atlas ja Nokia/NAVTEQ ovat ottaneet liikkuvan kartoituksen teknologian käyttöönsä. Näkyvimpänä tuotteena on syntynyt Googlen Street View -palvelu, joka julkaistiin Suomessakin helmikuussa 2010 (Kukko ym., 2010). Ajoneuvosta kerättyjen aineistojen automaattisessa tulkinnassa voidaan soveltaa vastaavia menetelmiä kuin ilma-aineistoille, joskin aineistojen erityisominaisuudet on huomioitava.

Geodeettisessa laitoksessa on tutkittu automaattisen tulkinnan mahdollisuuksia erityisesti karttojen ajantasaistusta ajatellen ja kehitetty menetelmiä rakennusten, peltolohkojen ja korkeusmallin muutostulkintaan sekä maanpeiteluokitteluun. Sovelluksissa on käytetty ilmakuvia, ilmalaserkeilausaineistoa ja liikkuvaa kartoitusta. Seuraavassa esitellään näitä sovelluksia sekä lopuksi yhteenveto ja tulevaisuuden näkymiä.

2. RAKENNUSTEN MUUTOSTULKINTA

Rakennukset ovat ajantasaistusta ajatellen tärkeä kohdeluokka, koska niissä tapahtuu paljon muutoksia ja ne ovat kartankäyttäjille tärkeitä. Ne ovat myös kohteita, joiden tulkinnassa laserkeilauksesta on selkeästi hyötyä. Jos käytettävissä on sekä uusi että vanha laserkeilausaineisto, muutostulkinta voi perustua näiden vertailuun (Murakami ym., 1999). Jos vanhaa aineistoa ei ole, rakennukset voidaan ensin tulkita uudesta aineistosta ja verrata niitä sitten ajantasaistettavaan rakennuskarttaan (Knudsen & Olsen, 2003; Matikainen ym., 2003; Vosselman ym., 2004). Kartan rakennusten oikeellisuutta voidaan myös pyrkiä analysoimaan suoraan uuden

aineiston perusteella tarkastelemalla esimerkiksi reunaviivoja (Champion, 2007). Uudet rakennukset on tällöin etsittävä erikseen. Rakennusten tulkintaa laserkeilaus- ja kuva-aineistoista on tutkittu 1990-luvun lopulta lähtien (esim. Hug, 1997), ja kirjallisuudesta löytyy suuri joukko erilaisia tulkintamenetelmiä. Tyypillisiä ovat menetelmät, joissa aineistoa luokitellaan vaiheittain hyödyntäen pintamallia (Digital Surface Model, DSM), maastomallia (Digital Terrain Model, DTM), monikanavaisia ilmakuvia ja/tai intensiteettitietoa laserkeilauksesta.

Geodeettisessa laitoksessa kehitetty menetelmä (Matikainen ym., 2010) perustuu oletukseen, että käytettävissä on vanhan rakennuskartan lisäksi uusi ilmalaserkeilausaineisto sekä uudet ortoilmakuvat. Jos laseraineistoa ei ole, vaihtoehtoisesti voidaan käyttää myös ilmakuvista johdettua korkeustietoa. Tavoitteena on tunnistaa uusista aineistoista rakennukset ja verrata niitä vanhoihin rakennuksiin muutosten havaitsemiseksi. Ajatuksena on, että automaattisen muutostulkinnan tulosta voitaisiin käyttää vihjetietona ajantasaistuksessa. Operaattori välttyisi koko alueen tarkistukselta ja voisi keskittyä muuttuneisiin rakennuksiin. Vastaavantyyppistä menetelmää on testattu tuotannollisessa ympäristössä Britanniassa (Ordnance Survey), ja automaattinen muutostulkinta todettiin hyödylliseksi, vaikka se tuotti myös paljon vääriä hälytyksiä (Holland ym., 2008).

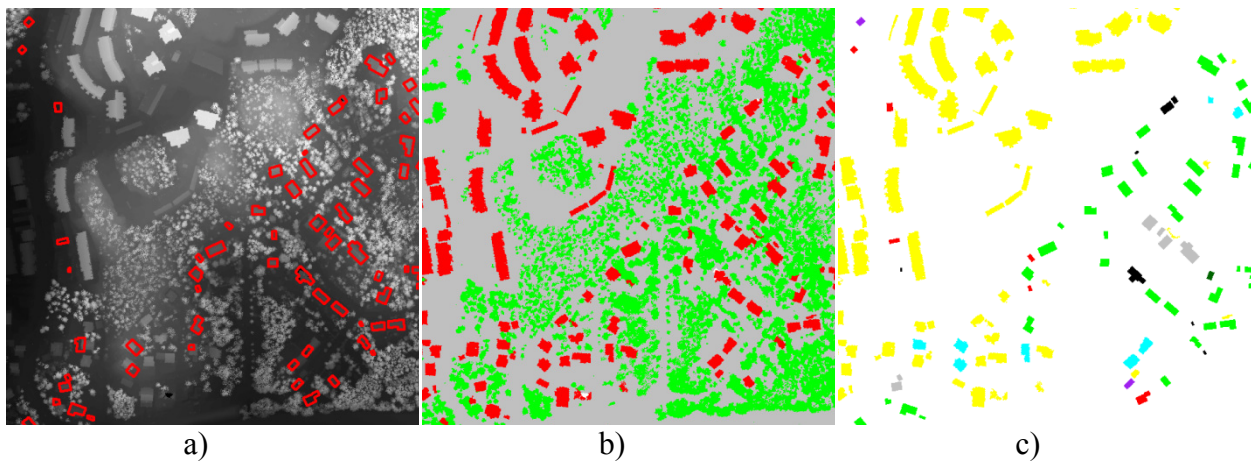
Geodeettisen laitoksen menetelmässä rakennusten tulkinta perustuu laserkeilausaineistosta muodostetun pintamallin aluepohjaiseen segmentointiin ja segmenttien luokitteluun. Pintamalli segmentoidaan korkeudeltaan yhtenäisiin alueisiin. Segmentit luokitellaan aluksi korkeiksi ja mataliksi kohteiksi erillistä laserpisteiden maanpintaluokittelua hyödyntäen. Korkeat kohteet ovat käytännössä lähinnä puita ja rakennuksia. Näiden erottamisessa toisistaan käytetään laserkeilaus- ja ortokuva-aineistosta laskettuja segmenttien ominaisuuksia kuten keskiarvoja, hajontoja, tekstuuria ja muotomittoja. Luokittelussa käytetään luokittelupuumenetelmää (Breiman ym., 1984), joka etsii parhaat piirteet luokkien erottamiseen automaattisesti opetusaineiston avulla ja muodostaa niistä luokittelupuun eli säännöt, joita voidaan soveltaa luokitteluun. Luokittelun jälkeen voidaan vielä poistaa virheluokituksia kohteiden koon ja naapuruston perusteella. Esimerkiksi hyvin pienet korkeat kohteet ovat todennäköisemmin puita kuin rakennuksia.

Muutostulkintavaiheessa etsitään toisiaan vastaavat rakennukset kartalla ja rakennustulkinnan tuloksessa. Tämä perustuu rakennusten päällekkäiseen sijaintiin. Vastaavuussuhteiden perusteella tunnistetaan vanhat, uudet ja puretut rakennukset. Vanhojen rakennusten osalta verrataan kartan rakennuksen ja tulkitun rakennuksen peittävyyttä prosentteina tai buffereiden avulla, tavoitteena selvittää, vaatiiko rakennus ajantasaistusta (voi johtua todellisesta muutoksesta tai väärästä esitystavasta kartalla). Muutostulkinnan tulos voidaan esittää esimerkiksi eri väreillä, jolloin muutoskohdat ovat helposti havaittavissa. Tulkinnan ja muutostulkinnan toteutuksessa on käytetty eCognition-, TerraScan- ja Matlab-ohjelmistoja (Trimble Geospatial, 2011; Terrasolid, 2011; The MathWorks, 2011).

Menetelmiä on testattu erityisesti Espoonlahden alueella, mutta aiempia versioita myös Otaniemessä ja rakennustulkintaa EuroSDR (European Spatial Data Research) -projektin testialueilla Ranskassa ja Tanskassa (Champion ym., 2009). Esimerkki tuloksista pienelle Espoonlahden testialueen osa-alueelle on esitetty kuvassa 1. Testeissä on käytetty erilaisia laserkeilaus- ja ilmakuva-aineistoja ja joissakin testeissä laserkeilausaineiston sijasta ilmakuvista laskettuja pintamalleja.

Espoonlahdessa tehdyn tarkkuusarvioinnin mukaan suurin osa tulkinnan virheistä liittyi pieniin tai muuten ongelmallisiin rakennuksiin (esimerkiksi rinteessä sijaitsevat autokatokset). Tässä tutkimuksessa käytettiin Optech-laserkeilausaineistoa (pistetiheys 2–4 pistettä/m²) ja DMC-

kuvista (DMC = Digital Mapping Camera) tehtyä ortokuvamosaiikkia (pikselikoko 30 cm). Testialueen koko oli noin 5 km², ja alueella oli yli 1000 rakennusta suurista teollisuushalleista omakotitaloihin ja pieniin varastorakennuksiin. Alueella on myös runsaasti puustoa ja vaihteleva maastonkorkeus. Mukana tarkastelussa olivat kaikki yli 20 m²:n rakennukset, ja rakennus katsottiin oikein tulkituksi, jos sen päällekkäisyys vertailuaineiston rakennusten kanssa oli vähintään 50 %. Tulkintatarkkuus (löydettyjen rakennusten osuus vertailuaineiston rakennuksista) oli 89 %, ja kohdetarkkuus (todellisten rakennusten osuus tulkituista rakennuksista) oli 86 %. Kun tarkastelussa olivat kaikki yli 60 m²:n rakennukset, molemmat tarkkuudet olivat 96 %. Laseraineistosta puuttuvat vertailurakennukset (ei juurikaan paluupulsseja) jätettiin tarkastelun ulkopuolelle. Isommille rakennuksille saavutettu tarkkuustaso (96 %) rakennusten havaitsemisessa voisi olla riittävä esimerkiksi Maastotietokannan laatuvaatimuksia ajatellen (Maanmittauslaitos, 1995). Muutostulkinnassa (mukana 5 luokkaa) tulkintatarkkuus oli 80 % ja kohdetarkkuus 77 % (yli 20 m²:n rakennukset). Muunnettua versiota muutostulkinnasta testattiin myös isommalla alueella (yksi karttalehti, 6 km × 6 km) yhteistyössä Maanmittauslaitoksen kanssa. Tuloksia arvioitiin visuaalisesti, ja ne olivat lupaavia vihjetiedon tuottamista ajatellen erityisesti uusista ja puretuista rakennuksista.



Värit kuvassa b):



Värit kuvassa c):

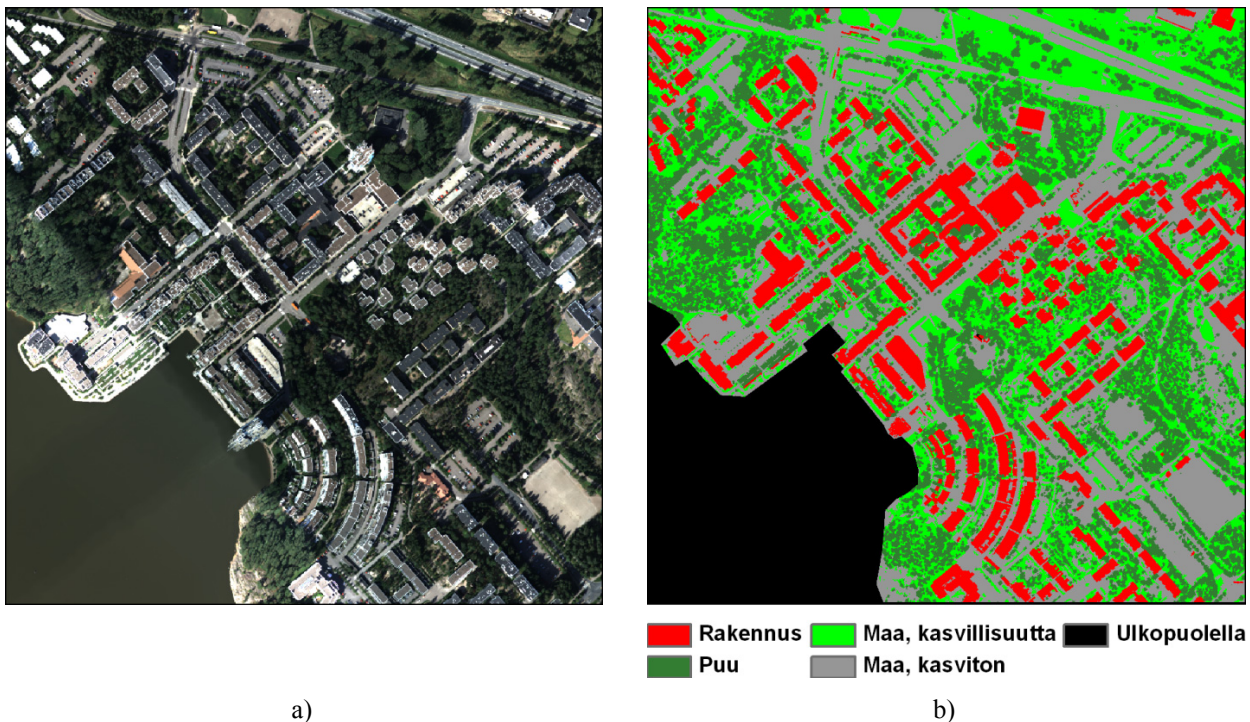


Kuva 1. a) Laserkeilausaineistosta muodostettu pintamalli ja vanhat rakennusvektorit, b) automaattisen rakennustulkinnan tulos, c) automaattisen muutostulkinnan tulos. Vanhan kartan rakennukset © Maanmittauslaitos 2001, lupa nro MML/VIR/MYY/219/09.

3. MAANPEITELUOKITTELU

Rakennusten ja puiden lisäksi laserkeilaus- ja ilmakeilaus-aineistosta voidaan pyrkiä tunnistamaan myös muita maanpeiteluokkia, kuten ruohikko ja kasvion maanpinta (esim. Haala & Brenner, 1999; Rottensteiner ym., 2005). Kuvassa 2 on esimerkki maanpeiteluokittelusta Espoonlahden testialueella. Edellisessä kappaleessa kuvattuun rakennustulkintaan verrattuna tässä on lisäksi luokiteltu matalat kohteet kasvillisuuden peittämiin ja kasvittomiin alueisiin. Tässäkin luokittelussa käytettiin luokittelupuumenetelmää. Käytännössä maaluokat erottuivat toisistaan hyvin kasvillisuusindeksin avulla (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI, joka perustuu ilmakeilan punaiseen ja lähi-infrakanavaan). Kasvillisuusindeksin kynnystys valikoitui ainoaksi säännöksi luokittelupuuhun.

Maanpeiteluokittelun tuloksessa on siis kaikkiaan neljä luokkaa: rakennus, puu, kasvillisuuden peittämä maa ja kasviton maa. Tulointatuloksen kokonaistarkkuus (oikein luokiteltujen pisteiden osuus kaikista referenssipisteistä, joita oli 269) oli 97 %. Myös visuaalisesti arvioituna tulos näyttää hyvältä, joskin joitakin virhekohtiakin löytyy. Esimerkiksi kapeita, puiden varjostamia tai peittämiä teitä on luokiteltu kasvillisuuden peittämäksi maaksi. Samoin muutamia rakennuksia, joiden katoilla on kasvillisuutta, on luokiteltu puuksi. Tutkimuksessa (Matikainen ja Karila, 2011) verrattiin eri aineistojen perusteella tehtyjä maanpeiteluokitteluja, ja tässä esitelty laserkeilaus- ja ilmakuva-aineiston yhdistelmällä saatu tulos oli selvästi paras. Pelkkään ortokuvaan perustuvassa luokittelussa tarkkuus oli 74 %. Luokittelutuloksessa ei ole eroteltu esimerkiksi teitä muista kasvittomista alueista. Visuaalisesti tiet ovat tuloskuvassa kuitenkin selvästi havaittavissa. Tievektoreiden kanssa yhdessä tarkasteltuna tällainen tulos voisi siis antaa hyödyllistä vihjetietoa myös teiden ajantasaistukseen. Luokittelusta voisi olla apua myös metsien tai muun puuston rajauksessa.



Kuva 2. a) Pala ortokuvamosaiikkia ja b) automaattisen maanpeiteluokittelun tulos. Luokittelussa käytettiin laserkeilauspintamallia ja ortokuvamosaiikkia.

4. PELTOLOHKOJEN MUUTOSTULKINTA

Suomessa Maaseutuvirasto (Mavi) ylläpitää peltolohkorekisteriä, jota tarvitaan maataloustukien maksamista varten. Rekisteriin on talletettu kaikkiaan noin 1 150 000 peltolohkoa. Lohkotiedot vaativat säännöllistä ajantasaistusta, ja se tehdään uusia ortoilmakuvia käyttäen. Ajantasaistus jakautuu kahteen vaiheeseen: lohkojen tarkastus muutoksia vaativien lohkojen löytämiseksi sekä muutosten digitointi. Geodeettisessa laitoksessa on meneillään tutkimus, jossa selvitetään automaattisen muutostulkinnan mahdollisuuksia ajantasaistusta vaativien lohkojen tunnistamisessa sekä kehitetään siihen sopivaa menetelmää. Tavoitteena on helpottaa tarkastusvaihetta, jossa nykyisin pitää visuaalisesti käydä kaikki ajantasaistettavan alueen lohkot läpi. Kirjallisuuskatsauksen perusteella peltolohkojen muutostulkinta on varsin vähän tutkittu aihe. Päävaihtoehtoina menetelmien kehityksessä ovat peltojen rajoihin keskittyvät menetelmät (esim. Janssen,

1993) ja peltolohkojen sisältöä tarkastelevat menetelmät (esim. Heipke & Straub, 1999; Oesterle & Hahn, 2004). Oesterlen & Hahnin (2004) tutkimus liittyi peltolohkorekisteriä vastaavan LPIS-järjestelmän (LPIS = Land Parcel Identification System) ajantasaistukseen, ja siinä testattiin aluepohjaista tulkintaa eCognition-ohjelmistolla. Testialue sijaitsi Saksassa.

Kehitteillä olevan menetelmän perusajatuksena on tunnistaa ensin pellot ja muut kohteet ja näiden perusteella päätellä ajantasaistustarve kunkin lohkon osalta. Oletuksena on, että jos lohkon sisällä on muuta kuin peltoa, se vaatii ajantasaistusta. Ensisijaisena aineistona tulkinnassa käytetään ortoilmakuvia. Kehitteillä oleva tulkintamenetelmä perustuu kuvien segmentointiin ja segmenttien vaiheittaiseen luokitteluun. Tulkinnassa pyritään käyttämään automaattisesti luokittelupuumenetelmällä tehtyjä sääntöjä sekä lisäksi manuaalisesti kehitettyjä sääntöjä. Sävyarvojen lisäksi säännöissä tarkastellaan muun muassa segmenttien muotoa, kokoa ja naapurussuhteita. Esimerkiksi tumma kapea kohde on todennäköisesti oja. Tummat kohteet lohkojen reunoilla taas tyypillisesti ovat puiden varjoja. Menetelmän kehityksessä on käytetty eCognition- ja Matlab-ohjelmistoja. Ortokuvien lisäksi myös laserkeilausaineiston käyttöä on kokeiltu. Laseraineisto on tehokasta korkeiden kohteiden, kuten puuston, pensaikon ja rakennusten havaitsemisessa. Tyypillinen peltokasvillisuus on suhteellisen matalaa, joten korkeat kohteet ovat todennäköisesti muuta kuin peltoa.

Automaattiseen tulkintaan tuo haasteita peltojen ja muiden kohteiden moninaisuus. Todelliset muutoskohteet pitäisi erottaa peltojen sisäisestä sävyarvojen vaihtelusta. Vaihtelua aiheuttavat esimerkiksi maan muokkaus, erot kasvillisuuden määrässä ja laadussa, kosteusvaihtelut sekä puiden varjot. Lohkojen sisällä voi olla myös kapeita ojia ja niiden reunakasvillisuutta, joita ei tarvitse erottaa lohkon ulkopuolelle. Lohkojen päälle voi yltää puiden latvoja. Lisäksi kuvien sävyarvot vaihtelevat alueelta toiselle muun muassa kamerasta, kuvausgeometriasta ja kuvausajankohdasta riippuen. Pelloissa ja muissa kohteissa on myös paikallisia eroja Suomen eri osissa. Visuaalisesti tarkasteltuna tähänastiset testitulokset ovat melko lupaavia todellisten virhekohteiden löytymisen kannalta. Kaikkia virhekohtia ei kuitenkaan ole löydetty, ja todellisten ajantasaistusta vaativien kohteiden lisäksi löytyy ylimääräisiä kohteita, joiden määrä pitäisi saada matalaksi, jotta turhaa visuaalista tarkastusta vaativien lohkojen määrä vähenisi. Tulkintamenetelmä on vielä kehitysvaiheessa, ja jatkossa sen tarkkuutta ja käyttökelpoisuutta on arvioitava tarkemmin käyttäen erilaisia kuvia ja testialueita. Kuvassa 3 on esimerkki tulkinnasta.



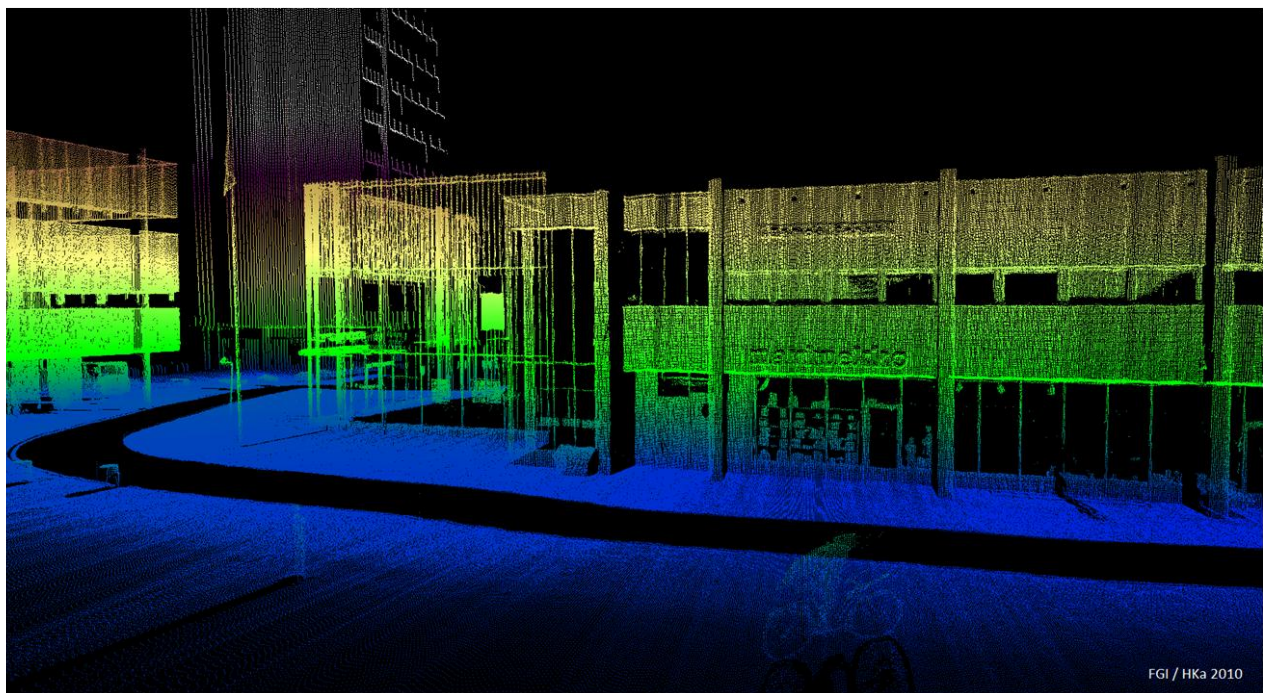
Kuva 3. Automaattisen tulkinnan tuloksia peltolohkoille. Oranssilla rajatut kohdat on luokiteltu tarkistettaviksi. Ortokuva © Maanmittauslaitos 2010, lupa nro MML/VIR/MYY/401/11.

5. LIIKKUVA KARTOITUS AJANTASAISTUKSESSA

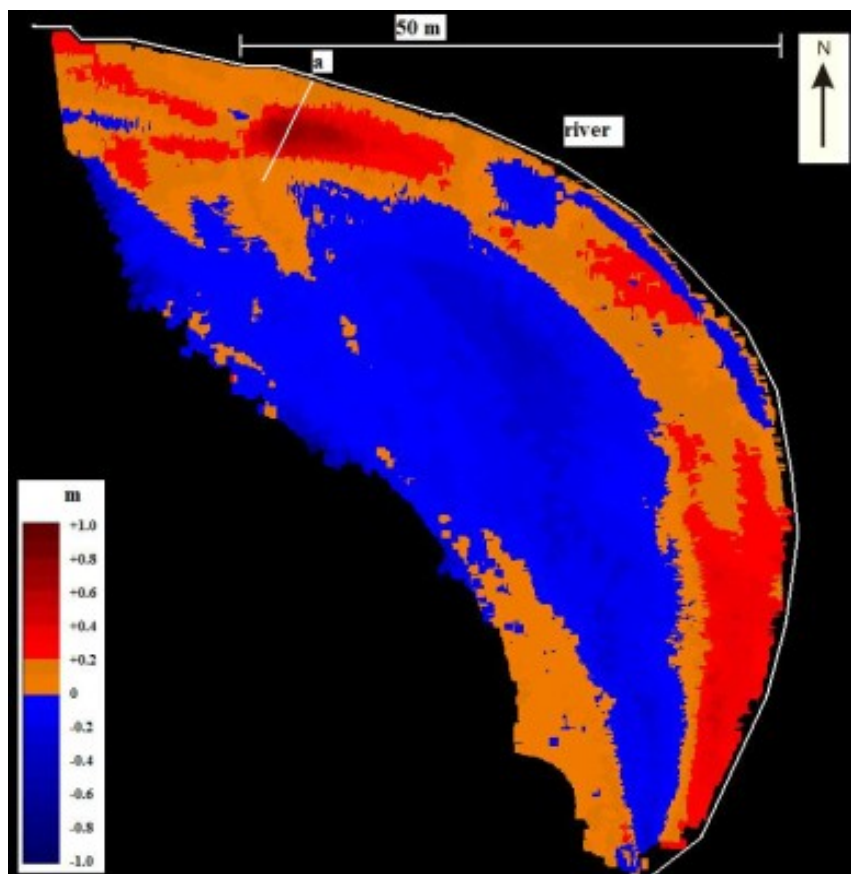
Liikkuvan kartoituksen tuottaman pistepilviaineiston pohjalta voidaan mallintaa kolmiulotteisesti ympäristö ja kartoittaa sen erilaisia kohteita (Gräfe, 2007; Hesse & Kutterer, 2007; Kremer & Hunter, 2007; Jaakkola ym., 2008; Lehtomäki ym., 2010; Zhu ym., 2011). Laseraineistoon yhdistetty digitaalinen valokuva-aineisto tarkentaa ja helpottaa kohteiden tunnistamista sekä sitomista koordinaatistoon. Liikkuvan kartoituksen tuottama pisteaineisto on tavallisesti tiheää (kuva 4), satoja tai jopa tuhansia pisteitä neliömetrillä, ja ulottuu muutaman kymmenen, jopa yli sadan metrin etäisyydelle kuljetusta reitistä. Tällaiset pistepilvet sisältävät siten helposti informaatiota useista kilometreistä teitä miljoonina pisteinä.

Liikkuvaa kartoitusta voidaan hyödyntää muutostulkintaan kartoittamalla kohde kahtena tai useampana ajankohtana. Yksityiskohtaiseen kolmiulotteiseen aineistoon perustuvan muutostulkinnan avulla voidaan ajantasaistaa muun muassa rakennusten 3D-mallit sekä teiden, suojaiteiden, parkkipaikkojen, valopylväiden, liikennemerkkien, reunapuuston ja meluesteiden vastaavat mallit.

Kuvassa 5 on esitetty liikkuvan laserkeilauksen avulla tehty muutostulkinta maanpinnan topografiasta Pulmankijoelta. Kahtena eri vuonna tehty keilaus paljastaa joen tulva-aikana syntyneet eroosion ja kasautumisen tuomat muutokset. Jokivarren kasvittomilla alueilla menetelmällä luotujen korkeusmallien RMS-virheet (RMS = Root Mean Square) vaihtelivat välillä 2,3 – 7,6 cm, kun aineistoista oli korjattu systemaattinen korkeusvirhe. Jokitutkimuksessa laskettu liikkuvan laserkeilauksen korkeuseromalli kasvittomalta maanpinnalta korreloi selitysasteella 0,93 (R^2) vastaavan staattisten maalaseraineistojen mallin kanssa (Vaaja ym., 2011). Korkeuseromallit mahdollistavat myös pintojen välisten massojen laskennan, jolloin liikkuvaa laserkeilausta voidaan hyödyntää esimerkiksi joen sedimenttien liikkeen arviointiin. Liikkuvaa laserkeilausta käyttäen on myös osoitettu mahdollisuudet puiden biomassamuutosten kartoitukseen (Lin ym., 2010; Jaakkola ym., 2010) sekä rakennetun ympäristön muutosten havaitsemiseen (Hyypä ym., 2009).



Kuva 4. Liikkuvalla laserkeilauksella tuotettu pistepilvi Tapiolasta. © Harri Kaartinen.



Kuva 5. Liikkuvalla laserkeilauksella tuotettuihin moniaikaisiin aineistoihin perustuva muutostulkinta Pulmankijoelta. Tulvaerosio on aiheuttanut jopa 1 m korkeusmuutoksia. Lisätietoja: Vaaja ym. (2011).

Liikkuvan kartoituksen absoluuttinen tarkkuus on lähes täysin riippuvainen GPS:n mittaus-tarkkuudesta ja on parhaimmillaan luokkaa 2–5 cm, huonoissa satelliittiolosuhteissa jopa metriluokkaa. Liikkuvan kartoituksen suorituskyky riittää hyvin kartoitukseen ja ajantasais-tukseen, kunhan huomioidaan mittauksen virhelähteet ja erityisesti ajantasaistuksessa ratkaistaan eriaikaisten aineistojen keskinäinen orientointi. Liikkuvan kartoituksen paikannustarkkuutta voidaan parantaa käyttämällä muilla keinoilla paikannettuja kohteita, jotka voidaan irrottaa automaattisesti pistepilvestä, kuten pylviäitä ja rakennusten seiniä. Toinen haaste aineistojen tehokkaalle hyödyntämiselle on toiminnoiltaan monipuolisten ja pitkälle automaattisten kaupallisten ohjelmistojen saaminen markkinoille.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä artikkelissa esitellyt tutkimukset osoittavat, että automaattisessa kuvatulkinnessa voidaan nykyisillä kuva- ja laseraineistoilla sekä tulkintamenetelmillä saavuttaa lupaavia tuloksia. Rakennusten tulkinnassa saavutettu tarkkuus yli 60 m²:n rakennuksille oli 96 %, ja neljän luokan maanpeiteluokittelussa kokonaistarkkuus referenssipisteisiin verrattuna oli 97 %. Liikkuvan laserkeilauksen muutostulkinnalla päästään käsiksi senttimetriluokan muutoksiin. Kehitetyt menetelmät eivät tuota kohteita, jotka sellaisenaan olisivat valmiita karttatietokantoihin, mutta on todennäköistä, että tuloksia voitaisiin hyödyntää vihjetietona visuaalisessa tulkinnassa ja ajantasaistuksessa. Erityisesti muutosten etsimiseen kuluu aikaa ja työmäärää voitaisiin vähentää, jos automaattisen tulkinnan avulla voitaisiin löytää ajantasaistusta vaativat kohteet.

Toisaalta tutkimukset osoittavat myös, että automaattisten tulkintamenetelmien kehittäminen on edelleenkin vaativa tehtävä. Jotta automaattinen muutostulkinta olisi käytännössä hyödyllinen, sen pitää löytää todelliset muutokset luotettavasti, mutta toisaalta turhia muutoshavaintoja ei saa olla liikaa. Toimivien menetelmien kehittäminen vaatii paljon työtä sekä huolellista perehtymistä aineistoihin ja tulkittavien kohteiden ominaisuuksiin. Lisähaasteita kehitystyöhön tuovat aineistojen laatuun ja ominaisuuksiin liittyvät asiat, kuten sävyarvojen vaihtelu ilmakuvissa. Automaattisilla luokittelumenetelmillä on myös omat rajoitteensa, jotka niiden soveltamisessa on huomioitava. Luokittelutulos ei ole koskaan täysin oikea eikä samanlainen kuin visuaalisen tulkinnan tulos. Tärkeää on arvioida, onko tarkkuustaso riittävä käytännön vaatimuksia ajatellen. Virheitä ja puutteita esiintyy myös visuaalisessa tulkinnassa, ja automaattisten menetelmien etuna on automaation lisäksi niiden objektiivisuus.

Geodeettisen laitoksen tutkimus on keskittynyt erityisesti rakennuksiin ja peltolohkoihin, mutta vastaavia menetelmiä voidaan kehittää myös muille kohteille. Eri kohteet vaativat omat menetelmänsä, mutta samoja peruseriaatteita ja työkaluja, kuten aluepohjaista tulkintaa ja luokittelupuumenetelmää, voidaan soveltaa. Jatkossa lupaavia kehityskohteita ovat myös moniaikaiset ilmalaserkeilaus- ja ilmakuva-aineistot, joita vertaamalla saadaan hyödyllistä muutostietoa. Erityisesti kahden korkeusaineiston vertaaminen antaa suhteellisen helposti tietoa muutoksista korkeissa kohteissa, kuten rakennuksissa ja puustossa.

Liikkuvaan kartoitukseen perustuvat ajantasaistus- ja muutostulkintamenetelmät ovat vasta kehitteillä. Yksinkertainen erotuskuva pintamalleista toimii hyvinkin monissa sovelluksissa, joissa tarkkuusvaatimus on 5–10 cm. Menetelmien käyttöönotto edellyttää kaupallisten ohjelmistojen kehittymistä ja automaatiotason nostoa.

On odotettavissa, että automaattisia kuvatulkintamenetelmiä päästään käytännössä hyödyntämään lähivuosina. Toistaiseksi käytännön sovellukset kansainvälisestäkin tarkasteltuna ovat olleet vähäisiä, mutta kiinnostus aiheeseen on merkittävää (EuroSDR, 2010). Kehitettyjen menetelmien vieminen käytäntöön asti vaatii lisää käytännönläheisiä testejä sekä menetelmien viimeistelyä kyseiset testit ja operatiiviset tuotantoprosessit huomioiden.

KIITOKSET

Kirjoittajat kiittävät tutkimukseen myötävaikuttaneita henkilöitä Geodeettisessa laitoksessa, Maaseutuvirastossa ja Maanmittauslaitoksessa. Aineistoja tutkimuksiin on saatu Maanmittauslaitokselta, Maaseutuvirastosta, FM-Kartta Oy:stä (BLOM), TopoSys GmbH:lta ja Espoon kaupungilta.

LÄHTEET

Blaschke, T., 2010. Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 65, s. 2-16.

Breiman, L., Friedman, J.H., Olshen, R.A. & Stone, C.J., 1984. *Classification and Regression Trees*, Wadsworth, Inc., Belmont, CA, USA.

Champion, N., 2007. 2D building change detection from high resolution aerial images and correlation digital surface models, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Munich, Germany, Vol. XXXVI, Part 3/W49A, s. 197-202.

Champion, N., Rottensteiner, F., Matikainen, L., Liang, X., Hyyppä, J. & Olsen, B.P., 2009. A test of automatic building change detection approaches, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Paris, France, Vol. XXXVIII, Part 3/W4, s. 145-150.

EuroSDR, 2010. EuroSDR Workshop – Automated change detection for updating national databases, Southampton, UK, http://bono.hostireland.com/~euroedr/start/index.php?option=com_content&task=view&id=57&Itemid=57, (Sivulla käyty 5.10.2011).

Gräfe, G., 2007. High precision kinematic surveying with laser scanners. *Journal of Applied Geodesy*, Vol. 1, No. 4, s.185–199.

Haala, N. & Brenner, C., 1999. Extraction of buildings and trees in urban environments. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 54, s. 130-137.

Heipke, C. & Straub, B.-M., 1999. Towards the automatic GIS update of vegetation areas from satellite imagery using digital landscape model as prior information, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, München, Germany, Vol. 32, Part 3-2W5, s. 167-174.

Hesse, C. & Kutterer, H., 2007. A mobile mapping system using kinematic terrestrial laser scanning (KTLS) for image acquisition, teoksessa A. Grün, H. Kahmen, toim., 8th Conference on Optical 3-D Measurement Techniques, July 9-12, 2007, ETH Zurich, Switzerland.

Holland, D.A., Sanchez-Hernandez, C. & Gladstone, C., 2008. Detecting changes to topographic features using high resolution imagery, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Beijing, China, Vol. XXXVII, Part B4, s. 1153-1158.

Hug, C., 1997. Extracting artificial surface objects from airborne laser scanner data, teoksessa A. Gruen, E.P. Baltsavias, O. Henricsson, toim., *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (II)*, Birkhäuser Verlag, Basel, Switzerland, s. 203-212.

Hyyppä, J., Jaakkola, A., Hyyppä, H., Kaartinen, H., Kukko, A., Holopainen, M., Zhu, L., Vastaranta, M., Kaasalainen, S., Krooks, A., Litkey, P., Lyytikäinen-Saarenmaa, P., Matikainen, L., Rönnholm, P., Chen, R., Chen, Y., Kivilahti, A. & Kosonen, I., 2009. Map updating and change detection using vehicle-based laser scanning, 2009 Urban Remote Sensing Joint Event, Shanghai, China, IEEE.

Jaakkola, A., Hyyppä, J., Kukko, A., Yu, X., Kaartinen, M., Lehtomäki, M. & Lin, Y., 2010. A low-cost multi-sensoral mobile mapping system and its feasibility for tree measurements. *ISPRS journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 65, No. 6, s. 514-522.

Jaakkola, A., Hyyppä, J., Hyyppä, H. & Kukko, A., 2008. Retrieval algorithms for road surface modelling using laser-based mobile mapping. *Sensors*, Vol. 8, No. 9, s. 5238-5249, <http://www.mdpi.com/1424-8220/8/9/5238/>, (Sivulla käyty 7.10.2011).

Janssen, L., 1993. Methodology for updating terrain object data from remote sensing data; the application of Landsat TM data with respect to agricultural fields, Doctoral thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, The Netherlands.

Kilpelä, E. & Kuittinen, R., 2011. Kaukokartoituksen alkutaipaleelta. *Maanmittaus*, Vol. 86, No. 1, s. 8-24.

Knudsen, T. & Olsen, B.P., 2003. Automated change detection for updates of digital map databases. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 69, No. 11, s. 1289-1296.

Kremer, J. & Hunter, G., 2007. Performance of the StreetMapper Mobile LIDAR Mapping system in “real world” projects, teoksessa D. Fritsch, toim., *Photogrammetric Week 2007*, s. 215-225.

Kukko, A., Hyyppä, H., Kaartinen, H., Ahlavo, M. & Vaaja, M., 2010. Liikenneympäristöt kolmiulotteisiksi liikkuvalla kartoituksella. *Positio*, No. 2/2010, s. 6-8.

Lehtomäki, M., Jaakkola, A., Hyyppä, J., Kukko, A. & Kaartinen, H., 2010. Detection of vertical pole-like objects in a road environment using vehicle-based laser scanning data. *Remote Sensing*, Vol. 2, No. 3, s. 641-664, <http://www.mdpi.com/2072-4292/2/3/641/>, (Sivulla käyty 7.10.2011).

- Lin, Y., Jaakkola, A., Hyyppä, J. & Kaartinen, H., 2010. From TLS to VLS: Biomass estimation at individual tree level. *Remote Sensing*, Vol. 2, No. 8, s. 1864-1879, <http://www.mdpi.com/2072-4292/2/8/1864/>, (5.10.2011).
- Maanmittauslaitos, 1995. Maastotietojen laatumalli, http://www.maanmittauslaitos.fi/sites/default/files/Maastotietojen_laatumalli%5B1%5D.pdf, (Sivulla käyty 5.10.2011).
- Matikainen, L. & Karila, K., 2011. Segment-based land cover mapping of a suburban area – comparison of high-resolution remotely sensed datasets using classification trees and test field points. *Remote Sensing*, Vol. 3, No. 8, s. 1777-1804, <http://www.mdpi.com/2072-4292/3/8/1777/>, (Sivulla käyty 5.10.2011).
- Matikainen, L., Hyyppä, J., Ahokas, E., Markelin, L. & Kaartinen, H., 2010. Automatic detection of buildings and changes in buildings for updating of maps. *Remote Sensing*, Vol. 2, No. 5, s. 1217-1248, <http://www.mdpi.com/2072-4292/2/5/1217/>, (Sivulla käyty 5.10.2011).
- Matikainen, L., Hyyppä, J. & Hyyppä, H., 2003. Automatic detection of buildings from laser scanner data for map updating, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Dresden, Germany, Vol. XXXIV, Part 3/W13, s. 218-224.
- Murakami, H., Nakagawa, K., Hasegawa, H., Shibata, T. & Iwanami, E., 1999. Change detection of buildings using an airborne laser scanner. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 54, s. 148-152.
- Oesterle, M. & Hahn, M., 2004. A case study for updating Land Parcel Identification Systems (IACS) by means of remote sensing, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Istanbul, Turkey, Vol. XXXV, Part B2, s. 515-520.
- Rottensteiner, F., Trinder, J., Clode, S. & Kubik, K., 2005. Using the Dempster-Shafer method for the fusion of LIDAR data and multi-spectral images for building detection. *Information Fusion*, Vol. 6, s. 283-300.
- Terrasolid, 2011. <http://www.terrasolid.fi/>, (Sivulla käyty 5.10.2011).
- The MathWorks, 2011. <http://www.mathworks.com/>, (Sivulla käyty 5.10.2011).
- Trimble GeoSpatial, 2011. <http://www.ecognition.com/>, (Sivulla käyty 5.10.2011).
- Vaaja, M., Hyyppä, J., Kukko, A., Kaartinen, H., Hyyppä, H. & Alho, P., 2011. Mapping topography changes and elevation accuracies using a mobile laser scanner. *Remote Sensing*, Vol. 3, No. 3, s. 587-600, <http://www.mdpi.com/2072-4292/3/3/587/>, (Sivulla käyty 5.10.2011).
- Vosselman, G., Gorte, B.G.H. & Sithole, G., 2004. Change detection for updating medium scale maps using laser altimetry, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Istanbul, Turkey, Vol. XXXV, Part B3, s. 207-212.
- Zhu, L., Hyyppä, J., Kukko, A., Kaartinen, H. & Chen, R., 2011. Photorealistic building reconstruction from mobile laser scanning data. *Remote Sensing*, Vol. 3, No. 7, s. 1406-1426, <http://www.mdpi.com/2072-4292/3/7/1406/>, (Sivulla käyty 7.10.2011).