



Osaamispohjainen kasvu 3D-digitalisaation, robotiikan,
paikkatiedon ja kuvankäsittelyn sekä -laskennan yhdistetyssä
teknologiamurroksessa
(COMBAT-konsortio)

Tilannekuvaraportti 2015

Prof. H. Kaartinen (konsortion johtaja), prof. J. Hyyppä, prof. H. Hyyppä, prof. T. Ojala, prof. A. Visala, prof. P. Alho, prof. P. Ståhle, TkT A. Kukko, TkT A. Jaakola, TaM J-P. Virtanen, TkT M. Vaaja, TkL M. Kurkela, FT E. Kasvi, koordinaattori M. Ahlavuo, koordinaattori H. Honkanen

Tilannekuvaraportti, COMBAT-konsortio

Osaamispohjainen kasvu 3D-digitalisaation, robotiikan, paikkatiedon ja kuvankäsittelyn sekä -laskennan yhdistetyssä teknologiamurroksessa – Pistepilviekosysteemi

Maanmittauslaitoksen Paikkatietokeskus, Aalto-yliopisto, Turun yliopisto, Oulun yliopisto

Prof. H. Kaartinen, prof. J. Hyyppä, prof. H. Hyyppä, prof. T. Ojala, prof. A. Visala, prof. P. Alho, prof. P. Stähle, TkT A. Kukko, TkT A. Jaakola, TaM J-P. Virtanen, TkT M. Vaaja, TkL M. Kurkela, FT E. Kasvi, koordinaattori M. Ahlavuo, koordinaattori H. Honkanen

1. Teknologiamurros: 3D-pistepilviekosysteemi

Perinteisesti ympäristön kohteita on kartoitettu mittaamalla yksittäisiä kohteen sijaintia kuvaavia pisteitä, esim. rakennuksen kulman sijainti, tien keskilinjan paikka tai puun sijainti metsäkoelalla. Uudet mittaustekniikat tuottavat yksittäisten valittujen pisteiden sijaan nopeasti suuren joukon 3D-pisteitä ympäristöstä eli pistepilven (Kuva 1), josta kohteet voidaan tunnistaa ja mallintaa, esimerkiksi rakennuksen seinät ikkunoineen ja ovineen, tien pinnan muoto ja katumaalaukset tai puun rungon muoto ja oksiston rakenne. Pistepilviä voidaan tuottaa automaattisesti ja tehokkaasti laserkeilaamalla, etäisyyskameroilla ja stereoperiaatteella eri sijainneista otetuista valokuvista.

Tuotteistamme ja demonstroimme uusia sovelluksia ja palveluita kehittämiimme kartoitusteknologioihin perustuen. Omien mittauslaitteiden ja -teknologioiden kehitys laitteiston rakentamisesta aina mallin saattamiseen pelimoottoriin on hyvä esimerkki laserkeilausteknologian kokonaisvaltaisesta läpimurrosta informaation tuotannossa.



Kuva 1. Ajoneuvosta laserkeilaamalla kerätty pistepilvi kaupunkiympäristöstä. Kuvan näkymä koostuu miljoonista mittausjärjestelmän mittaamista 3D-pisteistä.

Nokian kehittämä Here ja Google keräävät globaalisti suuria tietomääriä kamera- ja lasermittauspohjaisesti teillä ja rakennetuilla alueilla. Google Street Viewissä voimme katsoa kuvia, mutta emme näe laserkeilauslaitteistolla ympäristöstä mitattuja 3D-pisteitä eli pistepilviä.

Yliopistot ja teollisuus ovat viime vuosina kiinnostuneet autonomisista ajoneuvoista. Google onkin julkaissut oman itseajavan auton. Vuoden 2013 alussa Google ilmoitti, että ajoneuvot ovat myynnissä noin viidessä vuodessa. Autonvalmistajat ovat Googlen tiedotuksen jälkeen ilmoittaneet tähtäävänsä samaan tulokseen vuoteen 2020 mennessä. Ajoneuvojen aktiiviset turvajärjestelmät hyödyntävät jo nyt stereokameroita. Tulevaisuuden autoissa tulee olemaan kartoitusjärjestelmä, jolla on yhtäläisyyksiä nykyisiin korkean teknologian kartoitusautoihin (laserkeilaimet, satelliittipaikannus ja kamera). Kehitys tällä teknologian alalla on nopeaa. Vuonna 2007 Nokia osti Navteqin mukana 5,7 miljardilla eurolla kyseistä teknologiaa. Teknologia on 15 vuoden kuluessa saatavilla kuluttajien autoihin alle 1000 eurolla.

Teknologian läpimurto on nopeaa. Pistepilviä tuottavat anturit tulevat myös matkapuhelimiin ja tabletteihin. Mm. Microsoft Kinect liikeanturi tuottaa pistepilviä. Se on yksi eniten myytyjä kulutuselektronikan tuotteita. Uusista yrityksistä tutkimuslähtöinen Sharper Shape Oy työllistää 13 henkilöä toisena toimintavuotenaan. Kasvuyritys keskittyy palvelemaan sähköyhtiöitä laserkeilaamalla sähkölinjoja miehittämättömillä lennokeilla. 2020- ja 2030-luvuilla pistepilviä tuottavan elektroniikan määrä kasvaa arkikäytössäkin. Pistepilvisovelluksista tulee tärkein teknologia ajantasaisien 3D-karttojen, -mallien ja virtuaalisen todellisuuden tuottamiseen. Useat liikkuvat laserkeilaimet muodostavat pistepilviekosysteemin, jota täydentää esineiden internetin (Internet of Things, IoT) ja erilaisten anturiverkostojen tuottama tieto ympäristöstä. Itseajavien autojen muodostaman ekosysteemin lisäksi pistepilviä tuottavat ekosysteemit lisääntyvät mm. metsätaloudessa ja rakennetussa ympäristössä. Tutkimme tulevaisuuden pistepilviekosysteemiä ilmiönä, joka toteutuu 2020-luvun puolivälissä ja rakennamme kansainvälisestikin huippututkimukseen pohjautuvaa tulevaisuuden ekosysteemiä Suomeen.

Automaatio, robotiikka, kartoitus ja tietojenkäsittelytieteet lähentyvät toisiaan nopeasti. Kartoituksessa ja maanmittauksessa käytetyt laserkeilaus ja kuvapohjainen mittaus (fotogrammetria) ja robotiikassa käytetyt laser- ja kameratekniikat (kone näkö) muistuttavat etenevässä määrin toisiaan. Automaatiossa kehitetään pääosin reaaliaikaisia sovelluksia, perustuen paikalliseen sijaintitietoon. Maanmittauksessa käsitellyn aineiston tarkkuus ja globaali sijaintitieto ovat perinteisesti olleet nopeutta tärkeämpiä, jolloin on hyödynnetty jälkilaskentaa. Roolit ovat toisiaan täydentäviä. Tietojenkäsittelytiede tuottaa tärkeitä tekniikoita maanmittauksen ja automaation asiantuntijoiden tuottamien pistepilvien ja kuva-aineistojen käsittelyyn.

Teknologiamurroksen sovelluksista esimerkkeinä ovat digitalisointi, mobiiliteknologia, automaatio, esineiden internet (IoT), big data -analytiikka, robotiikka, kolmiulotteisuus, paikkatieto ja itseajavat ajoneuvot. Keskitymme erityisesti näiden tekniikoiden yhdistämiseen uudeksi tutkimukseksi ja uusiksi sovelluksiksi, joilla on suuri merkitys yhteiskunnalle ja teollisuudelle.

2. Mihin ongelmaan konsortio hakee ratkaisua?

3D-teknologiamarkkinoiden liikevaihto oli 93 miljardia euroa vuonna 2013. Liikevaihdon odotetaan kohoavan lähes 300 miljardiin vuonna 2018 ja 500 miljardiin vuonna 2020. 3D-teollisuuden kehitys tarvitsee tuekseen edistynyttä teknologiaa, tutkimusta ja innovaatioita. Google, Nokia, Apple, Samsung, Microsoft ja lukuisat autonvalmistajat (Mercedes, Audi, Toyota ym.) kehittävät sovelluksia 3D-mittaukseen ja mallinnukseen sekä niiden paikkatietosovelluksiin. Tekniikat, joita on perinteisesti käytetty tie- ja kaupunkiympäristön mallintamiseen, eivät mahdollista yksityiskohtaista kolmiulotteista suunnittelua ja visualisointia. Tiekartoituksen ja automaattisen mallinnuksen aineistotarpeisiin vastataan liikkuvalla kartoituksella. Nopea

laitteisto- ja ohjelmistokehitys avaa laserkeilaukselle uusia sovellusalueita älyliikenteen perustyökäluna, tieympäristön mallinnuksen havainnollistajana ja automaattiohjauksen sensoriteknikkana. 3D-internetteknologiaa tarvitaan avoimien selaimessa toimivien sovellusten ja palveluiden tehokkaaseen hyödyntämiseen. Rakennus-, infra- ja yhdyskunta-alan yritykset tarvitsevat elinkaaritieteologiassaan 3D-virtuaalitekniikkaa, jota liikkuva kartoitus tuottaa.

Kaupunkimallinnuksella tarkoitetaan maanmittauksen alalla kaupunkiympäristön elementtien (rakennukset, tiet, puusto, maasto) geometriaa kuvaavan mallin rakentamista, yleensä digitaalisia aineistoja ja työkaluja käyttäen. 3D-kaupunkimalleja voidaan hyödyntää monilla sovellusalueilla, kuten kulttuuriperintötyössä, katastrofitilanteiden toimintasuunnittelussa, karttasovelluksissa, älykkään liikenteen projekteissa ja kaupunkisuunnittelussa. Peliteollisuudessa tarkkaa laserkeilausta on hyödynnetty ralli- ja formulapeleissä ja sisällöntuotannon menetelmänä. Yksityiskohtaistuvat kaupunkimallit ovat edenneet myös rakennusten sisätiloihin. Rakennuksen yksityiskohtainen mallinnus voidaan toteuttaa yhdistelemällä suunnittelu- ja mittausdataa. Kehitämme peli- ja lisätyn todellisuuden sovelluksia kaupunki- ja sisätilamallien ympärille mm. kiinteistöjen hallintaan, johtamiseen ja visualisointitarkoituksiin. Peliteknologian sovelluksia, ja pelillistettyjä ympäristöjä tutkitaan hyödyntämällä pelimoottoreita. Monesti tällaiset peliteknologian hyötysovellukset tunnetaan nimellä "serious gaming". Hankkeessa haetaan ratkaisuja kaupunkimallien rakentamiseen, päivittämiseen ja hyödyntämiseen liittyviin ongelmiin.

Digitalisoituva väyläympäristö käsittää teitä, katuja, jokia, kanavia, sähkö- ja maakaasulinjoja ja puoliautomaattisten työkoneiden vaatimia ympäristöjä. Yksityiskohtaista väyläympäristön tietoa tarvitaan mm. kunnossapitoon, ympäristösuunnitteluun, melun torjuntaan, tieturvallisuuden parantamiseen, paikkatietopalveluihin kansalaisille, ajoneuvojen paikannus- ja navigointipalveluihin, ympäristötuhojen ennakointiin, kiinteistöjohtamiseen sekä rakennusvalvonnan ja rakentamisen tarpeisiin. Pistepilvien käytöllä on suuri potentiaali seurata väylien ja niiden ympäristöjen kuntoa sekä havaita nopeasti vauriot väylien rakenteissa. Suomessa väylien turvallisuus ja liikennöitävyys pyritään takaamaan huolellisella kunnossapidolla. Esimerkiksi koko Suomen tieverkoston pituus on noin 454 000 km (Liikennevirasto). Vesiväylät ja vesialueet aiheuttavat tulevaisuudessa suuria ympäristöuhkia mm. saasteiden kulkeutumisen ja tulvien myötä.

Metsätalouden osalta metsien pistepilviekosysteemillä haetaan ratkaisua hintakilpailukykyongelmaan; joudumme kilpailemaan osittain puuplantaasituotannon kanssa, jolloin puunhankinnan logistiikkaketjun on oltava mahdollisimman kustannustehokas. Metsäteollisuuden tuotteiden laatukilpailukykyongelmaan haetaan ratkaisua. Suomi ei pärjää bulkilla, joten on pyrittävä tarkempaan puuraaka-aine-erien laatupohjaiseen ohjaukseen. Metsäteollisuus tuottaa Suomessa kuitenkin 20 % Suomen viennistä. Metsäsektorin aluetaloudelliset ja työllisyysvaikutukset ovat merkittäviä. Suomessa kattavan puuhuollon piirissä toimii n. 190 metsäteollisuuden tuotantolaitosta, 880 energiapuun käyttöpaikkaa, 630 000 metsänomistajaa, 10 000 puunkorjuun, kuljetuksen ja metsäpalvelujen yrittäjää ja ammattilaista sekä laaja joukko ICT-järjestelmien ja palvelujen toimittajia. Puuhuoltoon katsotaan kuuluvaksi sekä puuntuotanto että puunhankinta. Metsäteollisuuden yhteisestä visiosta johdettu konkreettinen kehittämistavoite vuoteen 2025 mennessä on, että puuhuolto tuottaa lisäarvoa puun arvoketjuun ja on 30 % nykyistä kustannustehokkaampaa. Tärkeä osa tätä tehostamista on metsätiedon digitalisointi (Rajala ym. 2015). Ympäristöarvojen huomioonottamiseen metsäoperaatioissa ja arvokkaiden luontokohteiden tarkempaan käsittelyyn on myös löydettävä uusia keinoja.

3. Toimintaympäristön tiedontaso tässä ongelmakentässä

Kaupungit

3D-pistepilvien lisäksi kaupunkimallien (Kuva 2) onnistuneeseen toteutukseen tarvitaan usein muitakin aineistoja, kuten paikkatietoaineistoja tai yksittäisten rakennusten CAD- ja rakennusmalleja. Kaupunkimallit voidaan näin sitoa muihin kaupunkien tietojärjestelmiin ja hyödyntää yksittäisten rakennusten tarkkoja malleja. Kaupunkimallien tallennukseen ja siirtoon on kehitetty avoin XML-syntaksia noudattava formaatti, CityGML (Kolbe ym. 2005). Osana avoimen datan liikettä useat suuret kaupungit, kuten Rotterdam ja Berliini, ovat avanneet kaupunkimallinsa ja tarjoavat sen ladattavaksi CityGML-muodossa. Sovelluskehityksestä onkin tullut keskeinen näkökulma kaupunkimalleihin: kaupunkimallien tuottama lisäarvo syntyy niitä hyödyntävien sovellusten kautta sekä päivitettävyyden automatisoinnissa.

Kolmiulotteiset, paikkatietoa sisältävät verkossa toimivat tietojärjestelmät voidaan nähdä osana Älykäs kaupunki (engl. Smart City) –konseptia. Vaikka termiä onkin kritisoitu puutteellisesta määrittelystä, ja jossain määrin IT-keskeisyydestä (Hollands 2008) se on silti usein pinnalla erityisesti kaupunkien kehityksestä keskusteltaessa. Esimerkiksi IBM:n suosiman määritelmän mukaan älykkäissä kaupungeissa kaikki, erityisesti kaupungin infrastruktuuriin liittyvät tietojärjestelmät verkotetaan yhdeksi kokonaisuudeksi, joka mahdollistaa kaupungin aiempaa tehokkaamman hallinnan ja ohjauksen (Su, Li & Fu 2011). Älykkään kaupungin konseptiin on liitetty myös asukkaiden ja hallinnon vuorovaikutukseen liittyviä osia sekä innovaatioekosysteemeihin liittyviä osia (Schaffers ym. 2011). Riippumatta siitä, mitä tarkalleen katsotaan kuuluvan älykkään kaupungin käsitteeseen, vaikuttaa selvältä, että kaupungeja koskevat tietojärjestelmät tarvitsevat pohjakeen suurien alueiden riittävän yksityiskohtaisia, ja helposti ylläpidettäviä malleja. Mallien päälle voidaan toteuttaa erilaisia sovelluksia, joista älykkään kaupungin tarvitsemat järjestelmät rakentuvat. Mikäli malleissa halutaan esittää yksityiskohtaista, infrastruktuuriin liittyvää tietoa tällaisten mallien tulisi olla kolmiulotteisia.



Kuva 2. 3D-kaupunkimallin ulkoasuja. (FGI, Aalto 2012,2014)

Väylät

Väyläympäristöissä mobiililaserkeilausaineistoja (Mobile laser scanning, MLS) käsittelevät tutkimukset ovat maailmalla keskittyneet erilaisten kohteiden ja piirteiden automaattiseen tunnistamiseen pistepilvestä. Tällaisia kohteita ovat esimerkiksi tien reunaviivat ja muut merkinnät, tolpat, sähkölinjat, liikennemerkkit ja kasvillisuus. Tutkimuksessamme käytetään FGI:n, Aalto-yliopiston ja Turun yliopiston itse kehittämiä mobiilikeilauslaitteita. Näiden laitteiden kehittämisessä ryhmämme ovat maailman huipputasoa. Mittauslaitteisto pystytään asentamaan tarpeen mukaan eri alustoille, kuten esimerkiksi autoon, mönkijään tai veneeseen.

Liikkuvilla laserkeilauslaitteilla kerättyjen pistepilvien automaattiseen käsittelyyn kehitettyjä menetelmiä löytyy mm. rakennusten julkisivujen, tienpintojen, tunneleiden ja rautateiden rakenteiden tunnistamiseen sekä pylväiden, valaisimien ja puiden automaattiseen paikantamiseen (esim. Manandhar & Shibasaki 2002; Jochem ym. 2011; Jaakkola ym. 2008; Puente ym. 2014; Lehtomäki ym. 2010; Rutzinger ym. 2011; Yang ym. 2012; Arastounia ym. 2013; Wu ym. 2013). Keller & Sternberg (2013) esittelivät sisätiloissa tehtyjä mobiilikartoituksia, joita voidaan hyödyntää myös tunneleissa.

Liikkuvan kartoituksen aineistoja käytetään yhä enemmän 3D-kaupunkimalleihin (esim. Zhu ym. 2011). Pistepilvet parantavat mahdollisuuksia päivittää kartta- ja navigaatiotietoja (Hyyppä ym. 2009; Hwang ym. 2013) ja mallintaa ympäristöä hyvin yksityiskohtaisesti. Kansainvälisessä vertailututkimuksessa Kaartinen ym. (2012) tekivät liikkuvien laserkeilausjärjestelmien tarkkuusvertailun kaupunkiympäristössä. Tutkimuksen mukaan kaikki laitteistot kykenivät tuottamaan aineistoa tutkimuksen testiympäristössä alle 3,5 cm:n korkeustarkkuudella 35 metrin etäisyyteen saakka. Paras järjestelmä kykeni 2,5 cm:n sijaintitarkkuuteen itä-pohjoissuunnassa jopa 45 metrin etäisyydeltä. Tienpinnassa pyrimme nostamaan tarkkuuden millimetri-luokkaan ja ympäristön osalta 1-2 senttimetriin.

Suuri osa väyläympäristöistä sijaitsee urbaanien alueiden ulkopuolella. Luonnonympäristöissä mobiililaserkeilausaineistoja on hyödynnetty mm. puiden, rannikkoalueiden ja lumen pinnan kartoituksessa sekä geomorfologisissa tutkimuksissa. Liikkuvan kartoituksen käytöstä kasvillisuuden biomassamuutosten kartoituksesta ovat raportoineet Hyyppä ym. (2009) ja Lin ym. (2010). Puttonen ym. (2011) esittelivät ensimmäisen tutkimuksen, jossa MLS-aineistoja ja hyperspektimittauksia käytettiin puulajien luokitteluun. Lin ym. (2012) tutkivat MLS-aineistojen soveltuvuutta puiden kasvun määrittämiseen. Wang ym. (2013) esittelivät menetelmän, jossa MLS-aineistoja hyödynnetään vuoristoteiden leventämisen suunnitteluun. Lumen pinnan profiloimista ja karkeuden määrittämisestä ovat tutkineet Kaasalainen ym. (2011) ja Kukko ym. (2013). Zhong ym. (2011) tutkivat myös MLS-aineistojen käyttöä erilaisten pintojen karkeuksien määrittämiseen. MLS-aineistojen käyttöä lumen pinnan korkeuden mittaamiseen on esitellyt Jaakkola ym. (2014).

Jokiverkostoa ja vesiväyliä kartoitetaan yhä enemmän mobiileilla kartoitussensoreilla ml. laserkeilain, kaikuluotain ja näiden yhdistelmillä. Rannikkoympäristöjä ovat tutkineet mm. Barber & Mills (2007) sekä Bitenc ym. (2011). Alho ym. (2009) demonstroivat mobiilin laserkeilausjärjestelmän jokiympäristön tarkkaan 3D-mittaamiseen. Tämän lisäksi Flener ym. (2015) on kehittänyt mobiilia virtausolosuhteiden mittaussuunnitelmaa. Näillä lähestymistavoilla saadaan tietoa uomaverkoston geometriasta ja virtausolosuhteista. Näitä aineistoja käytetään edelleen hydrodynaamisten mallien lähtöaineistona. Hydrodynaamisten mallien on todettu tarjoavan tehokkaan työkalun jokiverkoston virtausolosuhteiden ja mahdollisen tai koetun tulva-alueen laajuuden selvittämisessä (esim. Apel ym. 2009). Aiemmat tutkimukset ovat kuitenkin nostaneet esiin lukuisia tulvakartoitukseen liittyviä epävarmuustekijöitä. Useat tutkimukset ovat osoittaneet, että saatavilla olevan, aluetta kuvaavan korkeusmallin tarkkuus on suurin yksittäinen tulvariskikartoituksen luotettavuutta määrittävä tekijä (Koivumäki ym. 2010; Fewtrell ym. 2011). Siten tulvatutkimuksen lähtöaineistojen, etenkin korkeusmallien, tarkkuuden ja yksityiskohtaisuuden parantaminen on ensisijaisen tärkeää luotettavamman ja tarkemman tulvakartoituksen mahdollistamiseksi. Kaupunkialueet kehittyvät nopeasti, mutta niiden kartoittaminen perinteisin menetelmin on kallista. Tämä on suuri ongelma etenkin nopeasti kehittyvissä maissa (esim. Musakwa & Niekerk 2014). Siten myös tulvariskien ja varoitusjärjestelmien pitäminen ajantasaisena nykytekniikalla on yleensä mahdotonta. Ilmastonmuutos tulee todennäköisesti lisäämään tulvien yleisyyttä ja aiheuttamaan jatkossa tulvatilanteita myös alueilla, joilla tulvat eivät ole aikaisemmin olleet ongelma (esim. Hirabayashi ym. 2013). Nopean ja tarkan kartoituksen tarve korostuu tällöin entisestään.

Metsät

Ruotsissa ja Norjassa sekä Keski-Euroopan maissa ja myös Kanadassa metsien kaukokartoitukseen perustuvat 3D-ekosysteemit ovat osin varsin kehittyneitä. Suomi otti kuitenkin ilmalaserkeilaukseen perustuvan metsien inventoinnin operatiiviseen käyttöön ensimmäisenä maana vuonna 2008. Tähän johti mm. FGI:n ja Itä-Suomen yliopiston yhteinen laserkeilaustutkimus, joka palkittiin taksaattoreiden ensimmäisellä innovaatiopalkinnolla 2010. Suomen kansallinen laserkeilaus, josta vastaa Maanmittauslaitos (FGI:n teknologiasiirto), on kopioitu myös Ruotsiin, ja siellä on koko maasta tehty 3D-ilmalaserpistepilvi vuoden 2014 loppuun mennessä. Vastaavat kansalliset pistepilvet mahdollistavat jopa yksittäisten puiden tulkinnan (Hyypä ym. 1999). Suunnitelma seuraavan sukupolven inventoinnista on tehty yhdessä eurooppalaisen metsäteollisuuden kanssa ja se mahdollistaa jopa yksittäisten puiden tunnistamiseen perustuvat tekniikat (Holopainen ym. 2014). Laserkeilauksen käytöstä metsien mittaamiseen on tehty tilannekatsaukset, mm. Hyypä ym. 2008, Koch 2010, ja Liang ym. 2016.

Nykyään metsätyökoneella tallennetaan puustotiedot puunkaadon yhteydessä (esim. Holmgren ym. 2012; Melkas 2013). Kun metsätyökoneeseen yhdistetään laserkeilaustekniikkaa, voidaan puustoa mitata puita koskettamatta. Lasermittaus voidaan myös integroida osaksi metsätyökoneen ohjausjärjestelmää, kuten Ponsse Oy, Argone Oy ja Metsäteho Oy ovat jo prototyyppissään toteuttaneetkin (Melkas ym. 2014). Metsätyökoneiden käyttämä teknologia perustuu maalaserkeilaukseen. Ensimmäinen kaupallinen maalaserkeilain esiteltiin vuonna 1998, ja ensimmäiset menetelmät niiden käytöstä puustotietojen arviointiin julkaistiin 2000-luvun alkupuolella (Erikson & Karin, 2003; Lovell ym. 2003; Simonse ym. 2003; Watt ym. 2003; Aschoff & Spiecker 2004; Haala ym. 2004; Hopkinson ym. 2004; Thies & Spiecker 2004). Maastolaserkeilausta on käytetty puiden perustietojen, kuten puun sijainti ja rinnankorkeusläpimitta, määrittämiseen metsäkoealoilla (Maas ym. 2008; Brolly & Kiraly 2009; Vastaranta ym. 2009; Murphy ym. 2010; Liang ym. 2011; Lovell ym. 2011; Trochta ym. 2013). Sittemmin maalaserkeilauksen on osoitettu pystyvän myös perinteisin mittauksin vaikeasti määritettävien puutietojen mittaukseen, kuten rungon tilavuus ja biomassan komponentit (Yu ym. 2013; Kankare ym. 2013; Liang ym. 2014; Astrup ym. 2014). Maalaserkeilauksella voidaan toteuttaa myös aikasarja-analyysjä koska koko metsäkoeala on dokumentoitavissa toistuvasti (Liang ym. 2012; Srinivasan ym. 2014; Mengesha ym. 2015).

4. Hankkeen tuoma lisäarvo ongelmien ratkaisuun

Maanmittauslaitoksen Paikkatietokeskuksessa (FGI, ent. Geodeettinen laitos) ja Aalto-yliopistossa kehitetyt henkilökohtaisen kartoituksen ratkaisut toimivat tilanteissa, joissa maasto on ajoneuvomittaukselle kulkukelvotonta tai tila ei riitä ajoneuvomittaukseen esim. kasvillisuuden tiheyden tai katujen kapeuden takia (kts. Kuva 3). Kannettavaa mittaamenetelmää sovelletaan myös sisätilamallinnuksen tutkimuksessa. Tutkimuksen painopiste suuntautuu 3D-mallien automaattiseen ajantasaistukseen ja rakennetun ympäristön virtuaalimalleihin, automaattisiin ajoneuvoihin sekä puettaviin mittausjärjestelmiin.

Hankkeen **“Älykkäät 3D kaupungit” -osiossa** tulevaisuuden käytännönsovelluksia kaupunkilaisille tulevat olemaan esim. virtuaalikaupungit. Kaupunkimallit tuottavat lisäarvoa niitä hyödyntävien sovellusten kautta. Näitä sovelluksia voivat kehittää yritykset, yliopistot, tutkimuslaitokset, kansalaisjärjestöt ja yksittäiset kansalaiset. Kaupunkimalleja hyödyntävillä sovelluksilla on keskeinen rooli tulevaisuuden älykkäiden kaupunkien synnyttämisessä. Eryityisesti **keskitymme 3D-internetteknologiaa hyödyntävien, selaimessa toimivien sovellusten ja palveluiden kehittämiseen ja olemassa olevien avointen data-aineistojen tehokkaaseen hyödyntämiseen kaupunkien ja rakennusten sisätilojen mallintamisessa** huomioiden myös turvallisuusnäkökohdan ja loppukäyttäjät.

Hankkeen **“Digitaalinen väylä”**-osiossa **tavoitteenamme on kehittää erilaisista kulkuväylistä kerättävän informaation sensori- ja kartoitusteknologiaa ja siihen liittyviä sovelluksia lisäten samalla suomalaisten yritysten toimintamahdollisuuksia näillä alueilla.** Pääpaino on tie- ja liikenneympäristöissä, voimalinjoissa, vesiväylissä ja rautateissä. Tavoitteisiin päästään hyödyntämällä laser- ja kuvasensoreiden kehitystä eri mittaustekniikoissa ja kohteen automaattisessa tunnistuksessa. Paikannuksessa keskitytään erityisesti satelliittipaikannusta avustaviin sensoreihin sekä aineistojen jälkikäsitteilymenetelmiin, joilla pyritään parantamaan geometrista tarkkuutta, kun ollaan paikannussatelliittien ulottumattomissa kuten tunneleissa.



Kuva 3. Hankeryhmän kehittämiä mobiililaserkeilausjärjestelmiä.

Hankkeen **“Metsien 3D-digitalisointi”** -osiossa **tavoitteena on tuottaa reaaliaikainen tietopohja koko puunhankinnan logistiikkaketjun optimoimiseksi kustannustehokkaaksi** alkaen ajokoneen optimaalisesta kuormasuunnittelusta metsäkuviolla ja päättyen puutavararekkojen maaston korkeuserot huomioonottavaan reittisuunnitteluun. Hankkeessa tutkittavaa taimikon puiden paikannusta ja luokittelua tarvitaan, jotta koneellisesta taimikonhoidosta saadaan kannattavaa. Puuraaka-aine-erien laatupohjaista ohjausta tarvitaan, jotta erilaisten tuotteiden valmistukseen saadaan optimaalinen ainespuu. Harvennusten laatua parannetaan opastamalla kuljettajaa reaaliaikaisen puukartan avulla sopivan puiden valinnassa, tavoitteena olevan harvennustiheyden saavuttamiseksi. Samalla saadaan päivitettyä metsätietojärjestelmän puustotiedot ajan tasalle aina koneellisen hakkuun yhteydessä. Automatisoimalla helppoissa olosuhteissa harvennuksilla hakkuukoneen toimintaa puukarttatiedon avulla kuljettajalle vapautuu aikaa valita puut harkitummin. Puunkorjuussa uusien pistepilviä tuottavien sensoreiden merkitys on tärkeää optimoitaessa puunhankinnan laatu ja arvo. Tarvitaan mm. ilmalaserkeilauksen ja harvesterin mittaamien pistepilvitietojen reaaliaikainen yhdistäminen harvesterityön tehostamiseksi. Niinpä uusia 3D-mittaustekniikoita kehittävä hanke mahdollistaa laserkeilauksen ja metsäkonetutkimuksen integroitumista ja kehitystä, koska kyky mitata olennaisia asioita on keskeistä.

Hankkeen **“Kansainväliset vertailututkimukset”** -osiossa **tutkitaan uusien kaukokartoitustekniikoiden ja -menetelmien suorituskykyä laajan kansainvälisen yliopisto- ja tutkimuslaitosverkoston yhteistyönä.** Hankeryhmä on koordinoinut useita tämän tyyppisiä vertailututkimuksia joissa osallistujia on ollut lähes 20 eri maasta. Vertailututkimusten tulokset antavat arvokasta palautetta tekniikkojen kehittäjille ja puolueetonta tietoa kaikille alan toimijoille.

5. Hankkeen menetelmät ongelmien ratkaisuun

Keskeistä COMBAT-hankkeessa on, että **kaukokartoitustutkijat, rakennetun ympäristön tutkijat ja sekä koneautomaatio- ja robotiikkatutkijat kehittävät yhdessä 3D-ekosysteemiä**. Aikaisemmin nämä ryhmät toimivat suurelta osin toisistaan erillisinä, mikä johtuu osaksi toimintatapojen erilaisuudesta. Hankkeen käyttämät tietojohtamis- ja vuorovaikutusmenetelmät tarkentuvat hankkeen edetessä kansallisen (yli 40 sidosryhmää) ja kansainvälisen (10 yliopistoa) sidosryhmien kanssa.

Kaupungit

Terveellisen ja toimivan rakennuskannan edellytyksenä on rakennusten elinkaaren huomiointi ylläpidossa ja korjausrakentamisessa. Tutkimuksen tavoitteena on luoda rakennuksesta 4D-malli, jossa yhdistyvät rakennukseen integroitujen sensoreiden tuottama tieto, huoltohistoria dokumentaatioineen sekä rakennuksen geometrian tarkka malli. Siirtämällä tämä 4D-malli pilveen, rakennusta pystytään tarkastelemaan toimivana kokonaisuutena ja ylläpitämään ajan tasalla olevaa tilannekuvaa ja huoltohistoriaa rakennuksesta. Pilvipohjaista mallia voidaan hyödyntää rakennetun ympäristön päätöksenteossa rakentamisen tarpeisiin.

Sovellusten kehittämisen tukemiseksi julkaisemme valittujen pilottialueiden malleja. Käytämme julkaisemisessa verkossa toimivaa avointa alustaa, jonka päälle rakennetaan kaupunkimalleja hyödyntäviä sovelluksia. Tutkimme kaupunkimallin ja todellisen kaupungin välistä vuorovaikutusta, joka syntyy, kun kaupunkimalli kytketään sensoriverkkoihin, jotka tuottavat tietoa reaali maailmasta. Lisäksi kaupunkimalli voidaan kytkeä erilaisiin kaupungin ohjausjärjestelmiin, jolloin vuorovaikutuksesta tulee kaksisuuntainen. Tutkimuksessa hyödynnetään HCI (Human Computer Interaction) tutkimuksen menetelmiä ja perinnettä.

Digitaalinen väylä

Tavoitteenamme on kehittää erilaisista kulkuväylistä kerättävän informaation sensori- ja kartoitusteknologiaa ja niihin liittyviä sovelluksia lisäten samalla suomalaisten yritysten toimintamahdollisuuksia näillä alueilla. Pääpaino tulee olemaan tieympäristöissä, voimalinjoissa, vesiväylissä ja rautateissä.

Hankkeessa vertaillaan ja kehitetään sensori- ja kartoitusteknologian algoritmeja, menetelmiä ja sovelluksia erilaisista väylistä ja niiden ympäristöstä kerättävään informaatioon (kaupunkiympäristö ja luonnonympäristö). Tavoitteena on kehittää kulkuväyliä kartoitukseen automatisoituja ratkaisuja ja tutkia nykyisten mittausjärjestelmien suorituskykyä ja sovelluskohteita. Samalla tutkitaan myös ajoneuvojen reaaliaikaista paikannusta ja itseohjautuvien ajoneuvojen hyödynnettävyyttä väyläympäristöistä tarvittavan aineiston keräyksessä. Kehitämme myös väyläympäristöjen liikenne- ja valaistussimulaatioita sekä automatisoituja menetelmiä älykkäiden tietyökoneiden tarpeisiin.

Metsät

Tässä hankkeessa kaukokartoituksella tuotetaan metsäinventointiin ja -suunnitteluun tieto, jota voidaan hyödyntää myös etukäteistietona puoliautonomisten metsäkoneiden yhteydessä. Hanke vie metsätalouden kehitystä kohti todellista täsmämetsätaloutta, jossa kaukokartoituksen ja konemittausten tuottamat tiedot optimaalisesti täydentävät toisiaan. Yhdistettynä maaperä-, sää ja muihin paikkatietoaineistoihin ne mahdollistavat kestävä ja luontoarvot huomioon ottavan kustannustehokkaan ja metsähoidollisesti optimaalisen metsätalouden Suomessa, sopivien kone- ja palvelukonseptien kautta myytyinä muuallakin maailmassa.

6. Vuorovaikutuksen toteutus Combat-hankkeessa

Hankkeen vuorovaikutus rakennetaan tietojohdantamiseen perustuvan 'Knowledge Management Frame for Dynamic Science Communication' -mallin pohjalta. Vuorovaikutuksella edistetään tieteellisiä, yhteiskunnallisia ja taloudellisia päämääriä: levitetään tietoa, luodaan dialogia eri osapuolten välille sekä luodaan fyysisiä ja digitaalisia alustoja innovatiiviselle kehittämiselle. Vuorovaikutussuunnitelma huomioi tiedon eri ulottuvuudet tavoitteenaan jakaa ja kehittää dokumentoitua tietoa (explicit), kokemuksellista tietoa (tacit) ja uusia mahdollisuuksia synnyttävää tulevaisuustietoa (potential). Vuorovaikutus ulottuu omaan konsortioon, koko tutkimusohjelmaan, sidosryhmäverkostoihin ja suureen yleisöön. Vastaavaa tietojohdantamisen soveltamista monialaiseen huippututkimukseen ei ole tehty vielä muualla maailmassa.

Taulukko 1. Combat-konsortiohankkeen vuorovaikutusmalli ja esimerkkejä toteutuskeinoista

Platform & Purpose Knowledge Dimensions	Physical			Digital			ORIENTATION
	Academic	Societal	Economic	Academic	Societal	Economic	
Explicit Knowledge • Dokumentointi • Raportointi • Tiedottaminen	Artikkelit Esitykset Kirjat	Uutiset Tiedotteet Lehti-artikkelit Kampanjat	Tiedon ja teknologian siirto Demot	Open science Tieteelliset foorumit Mooc	Webbisivut Blogit Twitter YouTube FB	Uutiskirjeet Videouutiset Demot	PAST
	<i>faktat</i>	<i>tarinat</i>	<i>kuvat</i>	<i>faktat</i>	<i>tarinat</i>	<i>kuvat</i>	
Tacit Knowledge • Dialogi • Kommunikaatio • Co-creation	Opetus Kokoukset Seminaarit Konferenssit Työpajat	Yleisö-tapahtumat Näytökset Demot	Yritysyhteistyö Projektit Prototyypit Benchmarkit Testaukset	Skype Lync Digitaaliset yhteistyöalustat (mm. <i>Fingertip</i>)	Pelillistäminen (<i>Serious games</i>) Virtuaalialustat (mm. <i>Second life, Meshmoon</i>)	Projektit Prototyypit Benchmarkit Testaukset Tuotekehitys	PRESENT
Potential Knowledge • Heikot signaalit • Innovointi • Ennakointi	Skenaario-työpajat Living labs Innovaatio-leirit	Yhteistyö edelläkävijäryhmien ja mielipidevaikuttajien kanssa	TKI-toiminta Hackathonit Venture Capital Start ups Spinn offs	Innovaatioalustat (mm. <i>Orchidea</i>) Digi-Delfoi	Verkkoavoriihi (mm. <i>Fountain Park</i>)	Venture Capital Digitaaliset business-konseptit	FUTURE

Pirjo Ståhne 2015

7. Lähteet

- Alho, P., Kukko, A., Hyyppä, H., Kaartinen, H., Hyyppä, J. & Jaakkola, A. (2009). Application of boat-based laser scanning for river survey. *Earth Surf. Process. Landforms*, 34: 1831–1838.
- Apel, H., Aronica, G.T., Kreibich, H. & Thieken, A.H. (2009). Flood risk analyses – how detailed do we need to be? *Nat Hazards*, 49: 79–98.
- Aschoff, T. & Spiecker, H. (2004). Algorithms for the automatic detection of trees in laser scanner data. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36, 71–74.
- Astrup, R., Ducey, M.J., Granhus, A., Ritter, T. & von Lüpke, N. (2014). Approaches for estimating stand-level volume using terrestrial laser scanning in a single-scan mode. *Canadian Journal of Forest Research* 44, 666–676.
- Barber, D. M., & Mills, J. P. (2007). Vehicle based waveform laser scanning in a coastal environment. In *Proceedings of the 5th International Symposium on Mobile Mapping Technology*, Padua, Italy (Vol. 2931).
- Bitenc, M., Lindenbergh, R., Khoshelham, K., & Van Waarden, A. P. (2011). Evaluation of a LiDAR land-based mobile mapping system for monitoring sandy coasts. *Remote Sensing*, 3(7), 1472-1491.
- Brolly, G. & Kiraly, G. (2009). Algorithms for stem mapping by means of terrestrial laser scanning. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica* 5, 119–130.
- Elberinka, S. O., Khoshelham, K., Arastouniab, M., & Benitoc, D. D. (2013). Rail track detection and modelling in mobile laser scanner data. *ISPRS Ann. Photogram. Remote Sens. Spatial Inform. Sci.*, II (5–W2), 223-228.
- Erikson, M. & Karin, V. (2003). Finding tree-stems in laser range images of young mixed stands to perform selective cleaning, in: *Proceedings of the ScandLaser Scientific Workshop on Airborne Laser Scanning of Forest*, 244–250.
- Fewtrell, T.J., Duncan, A., Sampson, C.C., Neal, J.C. & Bates, P.D. (2011). Benchmarking urban flood models of varying complexity and scale using high resolution terrestrial LiDAR data. *Physics and Chemistry of the Earth*, 36: 281-291.
- Flenner, C., Wang, Y., Laamanen, L., Kasvi, E., Vesakoski, J. M., & Alho, P. (2015). Empirical Modeling of Spatial 3D Flow Characteristics Using a Remote-Controlled ADCP System: Monitoring a Spring Flood. *Water*, 7(1), 217-247.
- Haala, N., Reulke, R., Thies, M. & Aschoff, T. (2004). Combination of terrestrial laser scanning with high resolution panoramic images for

- investigations in forest applications and tree species recognition. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 34, 4 s.
- Hirabayashi, Y., Mahendran, R., Koirala, S., Konoshima, L., Yamazaki, D., Watanabe, S., Kim, H. & Kanae, S. (2013). Global flood risk under climate change. *Nature Climate Change*, 3: 816-821.
- Hollands, R. G. (2008). Will the real smart city please stand up? Intelligent, progressive or entrepreneurial?. *City*, 12(3), 303-320.
- Holopainen, M., Vastaranta, M., & Hyypä, J. (2014). Outlook for the next generation's precision forestry in Finland. *Forests*, 5(7), 1682-1694.
- Hopkinson, C., Chasmer, L., Young-Pow, C. & Treitz, P. (2004). Assessing forest metrics with a ground-based scanning lidar. *Canadian Journal of Forest Research* 34, 573-583.
- Hwang, J., Yun, H., Jeong, T., Suh, Y., & Huang, H. (2013). Frequent unscheduled updates of the national base map using the land-based mobile mapping system. *Remote Sensing*, 5(5), 2513-2533.
- Hyypä, J., Hyypä, H., Leckie, D., Gougeon, F., Yu, X., & Maltamo, M. (2008). Review of methods of small-footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests. *International Journal of Remote Sensing*, 29(5), 1339-1366.
- Hyypä, J., Holopainen, M., Vastaranta, M. & Puttonen, E. (2009). Yksittäisten puiden mittaus ja muutosten seuranta laserkeilauksella *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2009: 361-365.
- Hyypä, J., Jaakkola, A., Chen, Y., & Kukko, A. (2013). Unconventional LIDAR mapping from air, terrestrial and mobile. In *Proceedings of the Photogrammetric Week*, 205-214.
- Jaakkola, A., Hyypä, J., Hyypä, H., & Kukko, A. (2008). Retrieval algorithms for road surface modelling using laser-based mobile mapping. *Sensors*, 8(9), 5238-5249.
- Jaakkola, A., Hyypä, J., & Puttonen, E. (2014). Measurement of Snow Depth Using a Low-Cost Mobile Laser Scanner. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 11(3), 587-591.
- Jochem, A., Höfle, B., & Rutzinger, M. (2011). Extraction of vertical walls from mobile laser scanning data for solar potential assessment. *Remote sensing*, 3(4), 650-667.
- Kaartinen, H., Hyypä, J., Kukko, A., Jaakkola, A. & Hyypä, H. (2012). Benchmarking the Performance of Mobile Laser Scanning Systems Using a Permanent Test Field. *Sensors*, 12, 12814-12835.
- Kaasalainen, S., Kaartinen, H., Kukko, A., Anttila, K., & Krooks, A. (2011). Brief communication" Application of mobile laser scanning in snow cover profiling". *The Cryosphere*, 5(1), 135-138.
- Kankare, V., Holopainen, M., Vastaranta, M., Puttonen, E., Yu, X., Hyypä, J., Vaaja, M., Hyypä, H. & Alho, P. (2013). Individual tree biomass estimation using terrestrial laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 75, 64-75.
- Keller, F., & Sternberg, H. (2013). Multi-sensor platform for indoor mobile mapping: system calibration and using a total station for indoor applications. *Remote Sensing*, 5(11), 5805-5824.
- Koch, B., 2010 Status and future of laser scanning, synthetic aperture radar and hyperspectral remote sensing data for forest biomass assessment. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65 (6), 581-590.
- Koivumäki, L., Alho, P., Lotsari, E., Käyhkö, J., Saari, A., & Hyypä, H. (2010). Uncertainties in flood risk mapping: a case study on estimating building damages for a river flood in Finland. *Journal of flood risk management*, 3(2), 166-183.
- Kolbe T.H., Gröger, G. & Plümer, L. (2005). *CityGML: Interoperable access to 3D city models. Geo-information for Disaster Management*, Springer, 883-899. <http://www.opengeospatial.org/standards/citygml>
- Kukko, A., Anttila, K., Manninen, T., Kaasalainen, S., & Kaartinen, H. (2013). Snow surface roughness from mobile laser scanning data. *Cold Regions Science and Technology*, 96, 23-35.
- Lehtomäki, M., Jaakkola, A., Hyypä, J., Kukko, A. & Kaartinen, H. (2010). Detection of Vertical Pole-Like Objects in a Road Environment Using Vehicle-Based Laser Scanning Data. *Remote Sensing*, 2, 641-664.
- Liang, X., Litkey, P., Hyypä, J., Kaartinen, H., Kukko, A. & Holopainen, M. (2011). Automatic plot-wise tree location mapping using single-scan terrestrial laser scanning. *The photogrammetric journal of Finland* 22, 37-48.
- Liang, X., Hyypä, J., Kaartinen, H., Holopainen, M., & Melkas, T. (2012). Detecting changes in forest structure over time with bi-temporal terrestrial laser scanning data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 1(3), 242-255.
- Liang, X., Kankare, V., Yu, X., Hyypä, J. & Holopainen, M. (2014). Automated Stem Curve Measurement Using Terrestrial Laser Scanning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 52, 1739 - 1748.
- Liang, X., Kankare, V., Hyypä, J., Wang, Y., Kukko, A., Haggren, H., Yu, X., Kaartinen, H., Jaakkola, A., Guan, F., Holopainen, M. & Vastaranta, M. (2016). Terrestrial laser scanning in forest inventories. Submitted to *Forests*.
- Lin, Y., Jaakkola, A., Hyypä, J., & Kaartinen, H. (2010). From TLS to VLS: Biomass estimation at individual tree level. *Remote Sensing*, 2(8), 1864-1879.
- Lin, Y., Hyypä, J., Kukko, A., Jaakkola, A., & Kaartinen, H. (2012). Tree height growth measurement with single-scan airborne, static terrestrial and mobile laser scanning. *Sensors*, 12(9), 12798-12813.
- Lovell, J.L., Jupp, D.L.B., Culvenor, D.S. & Coops, N.C. (2003). Using airborne and ground-based ranging lidar to measure canopy structure in Australian forests. *Canadian Journal of Remote Sensing* 29, 607-622.
- Lovell, J.L., Jupp, D.L.B., Newnham, G.J. & Culvenor, D.S. (2011). Measuring tree stem diameters using intensity profiles from ground-based scanning lidar from a fixed viewpoint. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 66, 46-55.
- Maas, H.G., Bienert, A., Scheller, S. & Keane, E. (2008). Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial laser scanner data. *International Journal of Remote Sensing* 29, 1579-1593.
- Manandhar, D., & Shibasaki, R. (2002). Auto-extraction of urban features from vehicle-borne laser data. *INTERNATIONAL ARCHIVES OF PHOTOGRAMMETRY REMOTE SENSING AND SPATIAL INFORMATION SCIENCES*, 34(4), 650-655.
- Melkas, T., Miettinen, M., Hämäläinen, J. & Einola, K. (2014). Puukarttajärjestelmä hakkuun tehostamisessa. *Metsäteho Oy Raportti* 230, 20 s.
- Mengesha, T., Hawkins, M. & Nieuwenhuis, M. (2015). Validation of terrestrial laser scanning data using conventional forest inventory methods. *European Journal of Forest Research* 134, 211-222.
- Murphy, G.E., Acuna, M.A. & Dumbrell, I. (2010). Tree value and log product yield determination in radiata pine (*Pinus radiata*) plantations in Australia: comparisons of terrestrial laser scanning with a forest inventory system and manual measurements. *Canadian Journal of Forest Research* 40, 2223-2233.
- Musakwa, W. & Niekerk, A. (2014). Earth Observation for Sustainable Urban Planning in Developing Countries: Needs, Trends, and Future Directions. *Journal of Planning Literature*, 30: 149-160.
- Puente, I., Solla, M., González-Jorge, H., & Arias, P. (2013). Validation of mobile LiDAR surveying for measuring pavement layer thicknesses and volumes. *NDT & E International*, 60, 70-76.
- Puttonen, E., Jaakkola, A., Litkey, P., & Hyypä, J. (2011). Tree classification with fused mobile laser scanning and hyperspectral data. *Sensors*, 11(5), 5158-5182.
- Rajala, P.T., Kääriäinen, H., Laitinen, O., Niemelä, T., Väkevää, J., Pajujoja, H. & Hämäläinen, J. (2015). Tehokas puuhuolto 2025. *Metsäteho Oy*.
- Rutzinger, M., Pratihast, A.K., Oude Elberink, S.J. & Vosselman, G. (2011). Tree Modelling from Mobile Laser Scanning Data-Sets. *The Photogrammetric Record*, 26, 361-372.
- Schaffers, H., Komninos, N., Pallot, M., Trousse, B., Nilsson, M., & Oliveira, A. (2011). Smart Cities and the Future Internet: Towards Cooperation Frameworks for Open Innovation. *Future Internet Assembly*, 6656, 431-446.
- Simonse, M., Aschoff, T., Spiecker, H. & Thies, M. (2003). Automatic determination of forest inventory parameters using terrestrial laserscanning, in: *Proceedings of the ScandLaser Scientific Workshop on Airborne Laser Scanning of Forests*, 252-258.
- Srinivasan, S., Popescu, S.C., Eriksson, M., Sheridan, R.D. & Ku, N.-W. (2014). Multi-temporal terrestrial laser scanning for modeling tree biomass change. *Forest Ecology and Management* 318, 304-317.
- Su, K., Li, J., & Fu, H. (2011). Smart city and the applications. In *Electronics, Communications and Control (ICECC), 2011 International Conference on* (pp. 1028-1031). IEEE.

- Thies, M. & Spiecker, H. (2004). Evaluation and future prospects of terrestrial laser scanning for standardized forest inventories. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36, 192–197.
- Trochta, J., Král, K., Janík, D. & Adam, D. (2013). Arrangement of terrestrial laser scanner positions for area-wide stem mapping of natural forests. *Canadian Journal of Forest Research* 43, 355–363.
- Vastaranta, M., Melkas, T., Holopainen, M., Kaartinen, H., Hyyppä, J. & Hyyppä, H. (2009). Laser-based field measurements in tree-level forest data acquisition. *Photogramm. J. Finl* 21, 51–61.
- Wang, J., González-Jorge, H., Lindenbergh, R., Arias-Sánchez, P., & Menenti, M. (2013). Automatic estimation of excavation volume from laser mobile mapping data for mountain road widening. *Remote Sensing*, 5(9), 4629-4651.
- Watt, P.J., Donoghue, D.N.M. & Dunford, R.W. (2003). Forest parameter extraction using terrestrial laser scanning, in: *Proceeding of the ScandLaser Scientific Workshop on Airborne Laser Scanning of Forests*, 2–4.
- Wu, M., Yu, B., Yue, W., Shu, S., Tan, W., Hu, C., Huang, Y., Wu, J. & Liu, H. (2013). A Voxel-Based Method for Automated Identification and Morphological Parameters Estimation of Individual Street Trees from Mobile Laser Scanning Data. *Remote Sensing*, 5, 584-611.
- Yang, B., Wei, Z., Li, Q. & Li, J. (2012). Automated Extraction of Street-Scene Objects from Mobile Lidar Point Clouds. *Int. J. Remote Sensing*, 33, 5839-5861.
- Yu, X., Liang, X., Hyyppä, J., Kankare, V., Vastaranta, M. & Holopainen, M. (2013). Stem biomass estimation based on stem reconstruction from terrestrial laser scanning point clouds. *Remote Sensing Letters* 4, 344–353.
- Zhong, R., Huang, J., Gong, H., Su, W., Li, Q., & Qin, M. (2011). Measuring surface roughness for retrieval of soil moisture based on mobile laser scanning. *Sensor Letters*, 9(3), 990-996.
- Zhu, L., Hyyppä, J., Kukko, A., Kaartinen, H. & Chen, R. (2011). Photorealistic Building Reconstruction from Mobile Laser Scanning Data. *Remote Sensing*, 3, 1406-1426.