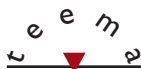


Markus Holopainen, Mikko Vastaranta ja Juha Hyyppä

Yksityiskohtaisen metsävaratiedon tuottaminen – kohti täsmämetsätaloutta?



Johdanto

Koostimme Metsätieteen aikakauskirjan erikoisnumeroon 4/2009 metsien laserkeilaukseen liittyviä tutkimustuloksia otsikolla lasermittauksilla kohti ”täsmämetsätaloutta”. Tuolloin viisi vuotta sitten metsäalan organisaatiot olivat rakentamassa uuden sukupolven metsävaratietojärjestelmiä, joiden lähtökohtana oli rasteritason aluepohjainen laserkeilausinventointi. Nykyisin uudet järjestelmät ovat pääosin operatiivisessa käytössä, esimerkkinä Suomen Metsäkeskuksen hallinnoima yksityismetsien metsävaratieto. Samaan aikaan Maanmittauslaitos (MML) on edistänyt laserkeilaukseen perustuvan valtakunnallisen korkeusmallin tuotantoa. Nykyisin suurin osa Suomen pinta-alasta on laserkeilattu joko metsätalouden sovelluksiin tai korkeusmallituotantoon. Näiltä osin viisi vuotta sitten esittämämme visio on toteutunut ja huomattavia kustannussäästöjä on saatu aikaan. Toisaalta täsmämetsätalouden keskeinen ajatus on, että lasermittauksilla voidaan päästä kiinni puutason tietoon, jonka avulla olisi mahdollista tuottaa lisäarvoa operatiiviseen metsätalouteen. Tältä osin visiomme ei ole toteutunut. Esitämme tässä artikkelissa ehdotuksen seuraavan sukupolven metsävaratiedon tuottamismenetelmästä, joka toteuttaisi täsmämetsätalouden ja ”Forest Big Data” -hankkeen tavoitteet. Viimeksi mainittua hanketta on selostettu tämän teeman Hämäläinen ym. artikkelissa.

Puiden mittaaminen lento- ja maastolaserkeilauksella

Metsien lentolaserkeilauksessa (tai ilmalaserkeilauksessa, *Airborne laser scanning*, ALS) on kaksi pääteknikkaa puustotietojen tuottamiseen: yksinpuintulkinta (*Individual tree detection*, ITD) ja aluepohjainen menetelmä (*Area-based approach*, ABA). Puu- tai puustotiedot tuotetaan joko arvioimalla puiden fysikaalisia ominaisuuksia 3D-pistepilvistä tai hyödyntämällä ennustettavien tunnusten ja pistepilvistä laskettujen piirteiden tilastollisia riippuvuus-suhteita. Aluepohjainen inventointimenetelmä on laserkeilausaineiston osalta huomattavasti halvempaa kuin yksinpuintulkinta, joka vaatii korkeampaa pulssitiheyttä. Toisaalta maastoreferenssin tarve on yksinpuintulkinnassa pienempi kuin aluepohjaisessa menetelmässä.

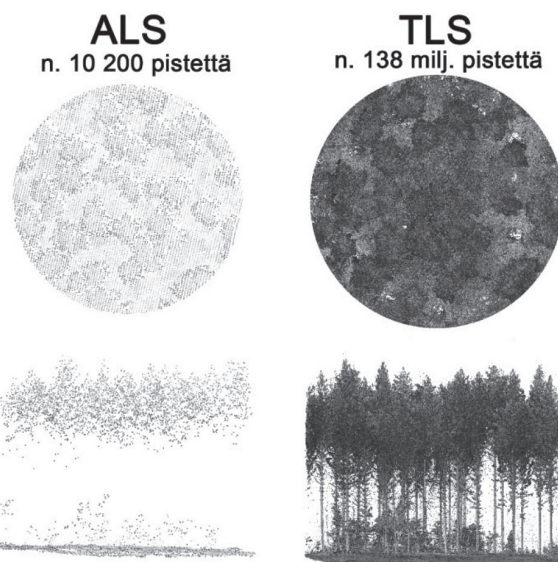
Puiden laserkeilausta voidaan tehdä myös maastossa. Maastolaserkeilauksessa (tai maalaserkeilauksessa, *Terrestrial laser scanning*, TLS) mitataan kohteiden kolmiulotteiset koordinaatit suunnattua laseretäisyysmittausta käyttäen. Maastolaserkeilaimella on mahdollista tuottaa tiheä kolmiulotteinen pistepilvi ympäröivästä puustosta. Mittaukseen kuuluva aika riippuu haluttavasta pistetiheydestä ja mitausalasta. Vain keilaimelle suoraan näkyviä kohteita voidaan mitata, joten puuston tiheys, peitteisyys ja mitausgeometria vaikuttavat voimakkaasti aineiston käyttökelpoisuuteen.



Kuva 1. Esimerkki maastolaserkeilaus(TLS)-aineistosta.

Maasto- ja lentolaserkeilaus eroavat toisistaan mittausergeometrian, kattavuuden ja pistetiheyden suhteen. Lentolaserkeilaus mittaa esimerkiksi 1000 m levyisen kaistan lähes kohtisuoraan ylhäältä alas ja maastolaser pienen paikallisen alueen lähes vaakasuoraan. Lentolaserkeilauksessa pistetiheys on hyvin tasainen, koska kaikki kohteet ovat miltei samalla etäisyydellä; puiden korkeuserosta ja maanpinnan topografiasta johtuvat muutokset ovat pieniä suhteessa lentokorkeuteen. Lentolaserkeilaus mittaa ennen kaikkea puuston pituuteen, tiheyteen ja pituus- ja tiheysrakenteeseen liittyviä piirteitä. Maastolaserkeilauksessa pistetiheys vaihtelee voimakkaasti, ja mittaus kuvaa puuston horisontaalirakennetta: runkojen leveyttä, latvusten leveyttä ja aluskasvillisuutta. Inventoinnin näkökulmasta olisikin optimaalista yhdistää maastolaserkeilaus ja lentolaserkeilaus.

Maastolaserkeilaus voidaan toteuttaa operatiivisesti joko kolmijalkamittauksena (TLS) tai liikkuvalla alustalla (MLS). Liikkuva alusta voi olla esimerkiksi auto, moottorikelkka, mönkijä, reppu tai hakkuukone. Liikkuva alusta mahdollistaa tasaisemman pistejakauman, mutta teknologisenä ongelmana on tarkka paikannus metsässä. MLS voidaan toteuttaa joko välillä pysähtyen ja keilaten (*stop-and-go*) tai jatkuvasti liikkeestä. ”Stop-and-go” -malli tuottaa samanlaista aineistoa kuin perinteinen, kolmijalalle asetettu TLS. Etuna menetelmässä on se, että näin saadaan tarkennettua puiden kartoitusta ja mit-



Kuva 2. ALS- eli lentolaserkeilauksen ja TLS- eli maastolaserkeilauksen aineistojen vertailu.

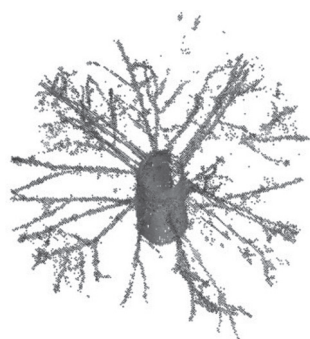
tausta (yhdestä keilauspisteestä näkymättömät puut). Lennokin käyttö laserkeilauksessa voidaan katsoa kuuluvan joko lentolaserkeilaukseen tai liikkuvaan maastolaserkeilaukseen.

Tärkeimmät puustotunnukset, kuten läpimitta, pystytään mittaamaan TLS:n avulla vähintään yhtä tarkasti kuin perinteisillä mittavälineillä. TLS-mittaus tuottaa lisäksi puiden koordinaatit (puukartan), joita on mahdollista käyttää esimerkiksi ALS-aineiston referenssinä. Erityisen mielenkiintoisia mahdollisuuksia TLS tarjoaa puiden runkokäyrän, latvustunnusten ja jopa yksittäisten oksien mittaamiseen. Näitä tunnuksia on vaikea, jopa lähes mahdoton mitata perinteisillä mittavälineillä kaatamatta puuta.

Jo vuosia, tai oikeastaan vuosikymmeniä, on puhuttu, kuinka metsäteollisuuden varastot siirtyvät yhä enemmän pystypuustoon. Tällöin korostuu metsä- ja leimikkosuunnittelutiedon tarkkuuden merkitys. Metsävarojen inventoinnin ja metsäsuunnittelun näkökulmasta keskeistä on runkolukusarjan (kuvion/leimikon läpimitta-/pituusjakauman) mittaus- tai ennustusmenetelmien kehittäminen, sillä puutavaralajien (tukki-, kuitu-, energiapuu) tilavuudet määritetään runkolukusarjan perusteella. Tällä hetkellä käytössä oleva aluepohjainen laserkeilaus- (ja ilmakuva-) tulkinta ja teoreettisiin



Kuva 3. Metsänmittaaja (reppulaserkeilain) työssään. Prof. Masato Katoh oppilaineen ihmettelee.



Kuva 4. Maastolaserkeilaus mahdollistaa puun yksityiskohtaisen tarkastelun jopa oksatasolla.

läpimittajakaumiin perustuva laskenta ei tuota riittävän tarkkaa runkolukusarjaa leimikkosuunnittelun (puunkorjuun) näkökulmasta. Tämä johtuu puulajiositteisten metsikkötunnusten ja runkolukusarjan tilastollisen ennustamisen epävarmuudesta. Ainakin järeiden puustojen osalta laserkeilaukseen perustuva yksinpuintulkinta yhdistettynä TLS-, MLS- ja hakkuukonemittauksiin voisi mahdollistaa runkolukusarjan arvokkaimman osan (järeimpien puiden) entistä tarkemman määrittämisen ja sitä kautta yksityiskohtaisen leimikkosuunnittelun.

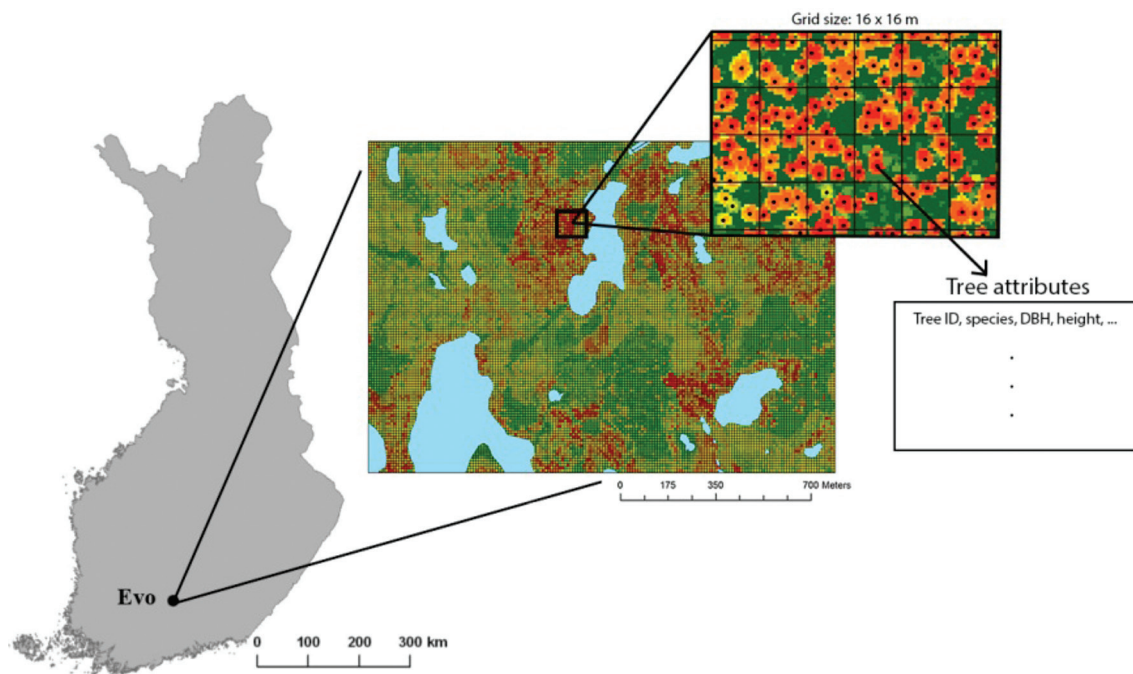
Seuraavan sukupolven metsävaratietojärjestelmä

Suomalaisissa metsäorganisaatioissa on viime vuosina otettu kiihtyvällä tahdilla käyttöön laserkeilaukseen, ilmakeiä ja maastokoeloihin perustuvia aluepohjaisia metsävaratiedon keruujärjestelmiä. Kyseisissä järjestelmissä inventointi-/laskentayksikkönä on rasterisolun tai kaukokartoituspiirteittäin yhtenäinen segmentti, jota voidaan sanoa myös alakuvioksi. Rasterisolun koko voi olla maastossa esimerkiksi 16×16 m, jolloin se vastaa melko tarkasti maastoreferenssinä käytettävien koelajojen pinta-alaa.

Aluepohjaisen laserkeilausinventoinnin etuna verrattuna perinteiseen kuvioittaiseen metsäsuunnitteluinventointiin on paitsi alemmat inventointikustannukset myös se, että näin on mahdollista saada tietoa metsäsuunnittelukuvioiden sisäisestä hajonnasta. Tämä puolestaan mahdollistaa useita käytännön lisäarvomahdollisuuksia, koska nyt on mahdollista kartoittaa esimerkiksi laajojen kuvioiden sisältä löytyviä hakkuukohteita. Rasteripohjainen lähestymistapa on myös erinomainen lähtökohta muutostulkintaan ja metsävaratiedon päivittämiseen, koska rasterisolun koko, rajat ja sijainti eivät muutu ajan kuluessa.

Metsä- ja leimikkosuunnittelun lähtökohtana käytetään yleensä kuvion puuston läpimittajakaumaa kuvaavaa runkolukusarjaa, joka voidaan tuottaa aluepohjaisella menetelmällä hyödyntämällä teoreettisia malleja sekä maastossa mitattujen referenssikoelajojen runkolukusarjoja. Kyseisen runkolukusarjan tarkkuus riittää esimerkiksi metsäsuunnittelun lähtökohdaksi. Puunkorjuun suunnittelun ja logistiikan näkökulmasta entistä tarkemmilla runkolukusarjoilla olisi kuitenkin runsaasti kysyntää. Runkolukusarja on puukaupan lähtökohta, olipa hinnoittelun perusteena puutavaralajit tai kokonaiset rungot. Tarkkojen tilavuuksien lisäksi tulevaisuudessa ollaan todennäköisesti kaiken aikaa kiinnostuneempia yksittäisten runkojen laatuominaisuuksista. Näin ollen visiomme on, että tulevaisuuden metsävaratietojärjestelmä sisältää myös puutason tiedon tuottamis- ja hyödyntämismahdollisuuden.

Visiomme mukaan (kuva 5) metsävaratiedon perustuote tulee edelleen olemaan mahdollisimman ajantasainen puusto- ja metsikkötunnukset sisältävä



Kuva 5. Hilatason inventointi ja runkolukusarjan tarkentaminen puukohtaisella inventoinnilla.

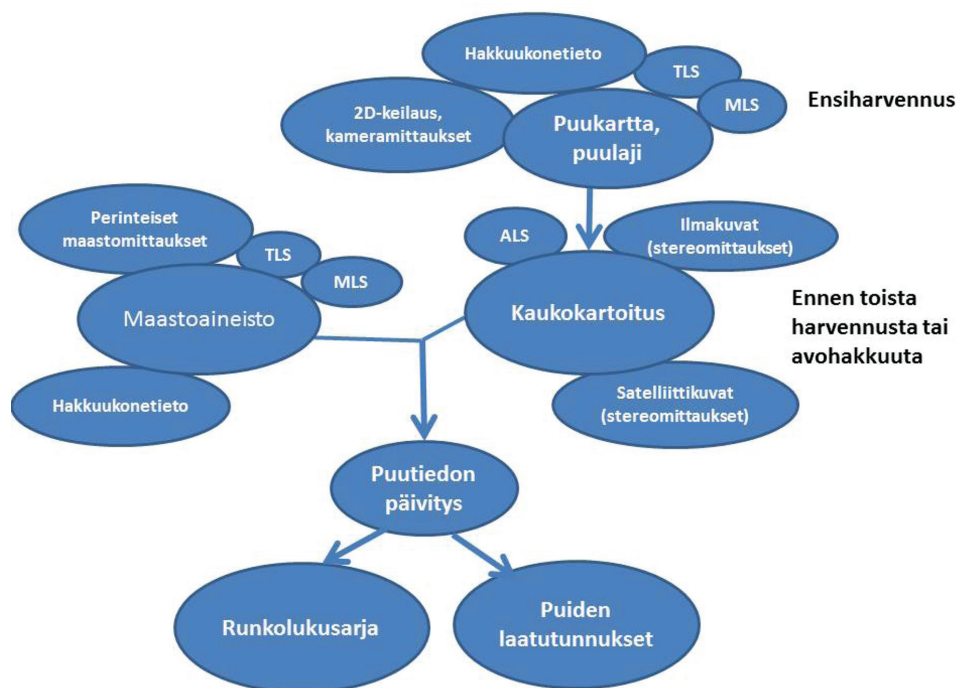
kartta-/tietokanta, jonka resoluutio on 10–20 m. Rasterikarttaa päivitetään useampiaikaisilla laserkeilaus-, ilmakei- tai satelliittikuva-aineistoilla sekä kasvumalleilla. Aineiston luotettavuuden ja tarkkuuden ohella on panostettava sen ajantasaisuuteen, sillä jo muutaman vuoden vanha tieto voi olla monessa metsätalouden sovelluksessa tai lisäarvopalvelussa liian vanha. Rasterikarttaa tarkennetaan tarpeellisilta osilta puutasolle käyttämällä monilähteistä ja -aikaista kaukokartoitus ja maastomittausaineistoa (kuva 6). Puutason tieto tallennetaan tietokantaan, jolloin sitä pikkuhiljaa kertyy laajemmilta alueilta.

Visionne puustotietokannan tuottamisesta ja päivittämisestä on esitetty kuvassa 6, joka on myös ”Forest Big Data” -hankkeen tutkimuksellinen lähtökohta Helsingin yliopiston ja Geodeettisen laitoksen osalta. Visionne lähtökohtana on, että metsävaratiedon käyttökohteet riippuvat kohteen (rasterisolun, segmentin, kuvion) kehitysluokasta. Taimikoissa ja kasvatusmetsissä metsävaratiedolle on erilaisia tarpeita kuin uudistuskypsissä metsissä. Visionne mukaan taimikoissa ja ensiharvennussivaiheen kuvioilla tullaan todennäköisesti toimeen

ajantasaisella rasteritiedolla. Sen sijaan viimeistään uudistuskypsistä metsistä tarvitaan myös puutason tietoa.

Monilähteisen yksinpuintulkinnan (MS-STI) lähtökohtana on maastossa tapahtuvien mittausten (hakkuukone) ja laserkeilauksen (TLS, MLS) yhdistäminen kaukokartoitustietoon (ALS, ilmakei, hyperspektriaineistot, satelliittikuvat). Lentolaserkeilaukseen perustuvan yksinpuintulkinnan kaksi merkittävintä ongelmakohtaa ovat puiden kartoitus ja puulajitulkinta. MS-STI:ssä nämä ongelmat ratkaistaan siten, että puukartta ja puulajitunnistus tehdään ennen päätehakkuuta maastolaserkeilaukseen/valokuvaan perustuvilla menetelmillä. Mikäli maastolaserkeilain/kamera on sijoitettu hakkuukoneeseen, puukartat (sis. puulajin) voidaan tuottaa esimerkiksi viimeisen harvennuksen yhteydessä, jonka jälkeen puukarttoja päivitetään aina päätehakkuuseen saakka joko kaukokartoitusmenetelmillä tai kasvumalleilla.

Useampiaikaisilla lentolaserkeilauksilla, kenties myös ilmakeivapintamalleilla, pystytään mittaamaan yksittäisten puiden pituuskasvua hyvällä tarkkuu-



Kuva 6. Monilähteinen puutason inventointi (*Multisource single tree inventory, MS-STI*).

della. Näin ollen on todennäköistä, että pituuskasvun päivityksessä päästään huomattavasti tarkempaan tulokseen kuin nykyisillä puutason kasvumalleilla. Puiden ja puustojen kasvu on keskeinen tunnus metsäsuunnittelun simulointilaskennassa. Toisaalta kasvu on myös tärkeä osa metsän taloudellisen arvon määrittämisestä, joten aihepiiri sisältää mielenkiintoisen uuden lisäarvomahdollisuuden. Puutason tilavuuden päivitys voidaan tehdä joko kasvumallien kautta tai keräämällä samalta ajankohdalta referenssiaineistoa. Päivitettyjä puukarttoja voidaan puolestaan käyttää rasteritason metsävaratiedon päivittämiseen.

Monilähteinen puutason inventointi on esitetty kuvassa 6. Tässä MS-STI-menetelmässä ALS-mittaustietoa hankitaan noin kymmenen vuoden välein (koko maa), ilmakuvaus tehdään 2–3 vuoden välein ja satelliittikuviin perustuvaa 3D-tietoa (esim. SAR-radargrammetria) saadaan viikoittain. Maastolaserkeilain (+kenties kamera) sijoitetaan hakkuukoneeseen.

On kuitenkin huomioitava, että vielä toistaiseksi MS-STI-vision ongelmana on maastossa mitatun

(hakkuukone, MLS) ja kaukokartoitustiedon automaattinen yhdistäminen puutasolla. Puukartat pystytään tekemään jo nykyisin muutamien kymmenien senttien paikannustarkkuudella paikallisessa koordinaatistossa. Hakkuukoneen paikannustarkkuus ei kuitenkaan vielä nykyisin riitä puukartan siirtämiseen ulkoiseen koordinaatistoon siten, että oikeat puut varmasti löytyvät automaattisesti myös kaukokartoitusaineistoista. Tätä ongelmaa tutkitaan ”Forest Big Data”-hankkeen Metsätehon osuudessa.

Lähitulevaisuuden keskeisiä tutkimusteemoja ovat runkolukusarjan ja laatutunnusten tuottaminen vaihtelevissa puustoissa ALS-, TLS-, MLS- ja MS-STI-menetelmillä. Lisäksi sekä aluepohjaisen (rasteritaso) että puutason tiedon päivittämisen tarkkuus ja kustannustehokkuus erilaisilla 3D-kaukokartoitusaineistoilla (ALS vs. ilmakuva-pintamallit vs. SAR-radargrammetria/SAR-interferometria) on mielenkiintoinen tutkimusaihe.

Metsävarojen inventointitieto sisältää aina epävarmuutta olipa menetelmä mikä tahansa. Näkemysmme mukaan tulevaisuuden metsävaratieto koostuu tarkkuudeltaan hyvinkin eritasoisesta tie-

dosta. Näin ollen on tärkeää, että tietoon pystytään liittämään (esim. inventointirasterin soluun) myös tiedon epävarmuutta, esimerkiksi luottamusvälejä, kuvaavia tunnuslukuja.

Päätelmät

Viime vuosina on tehty runsaasti tutkimustyötä, jotta yksittäisen puun tasolla tapahtuvan tulkinnan ongelmia voitaisiin ratkaista. Esimerkkinä voidaan mainita aaltomuotoon perustuva lentolaserkeilaus, jolla pyritään parantamaan puulajin sekä puuston vertikaalirakenteen tulkintaa. Maastolaserkeilauksen osalta on puolestaan kehitetty automaattisia algoritmeja puiden kartoitukseen ja puiden ominaisuuksien mittaamiseen. Niin lento- kuin maastolaserkeilaustutkimuksissa on pystytty osoittamaan, että yksittäisen puun tasolla tapahtuva tulkinta onnistuu optimiolosuhteissa (riittävän harva ja järeä puusto) yksittäisillä leimikoilla hyvin. Seuraava suuri tutkimusongelma tulee olemaan vastaavien testien tekeminen vaihtelevissa puustoissa, jolloin päästään kiinni menetelmien mahdollisuuksiin ja rajoituksiin operatiivisen leimikko- ja metsäsuunnittelun näkökulmasta. Samalla olisi pystyttävä ratkaisemaan puukarttojen paikannusongelma, eli kuinka paikallisesti tarkat puukartat pystytään siirtämään ulkoiseen koordinaatistoon riittävällä tarkkuudella. Kaiken kaikkiaan keskeinen kysymys tulevaisuudessa tulee kuitenkin olemaan, mikä on puutason tiedon lisäarvo verrattuna aluetason (rasteri, segmentti) tietoon. Jos yksityiskohtaisemmasta tiedosta on selkeää hyötyä saatavissa, teknologia sen tuottamiseen on todennäköisesti lähivuosina olemassa.

Kaiken aikaa tarkentuva inventointitieto tulee myös muuttamaan mittauksen, otannan ja mallin-

nuksen välistä suhdetta. Laserkeilaus mahdollistaa puun pituuden, runkomuodon, oksien ja latvuksen entistä tarkemman kustannustehokkaan mittauksen. Tätä tietoa pitäisi pystyä hyödyntämään esimerkiksi puiden biomassa-, kasvu- ja laatumalleissa niin Suomessa kuin maailmalla.

Kirjallisuutta

- Holopainen, M., Vastaranta, M. & Hyypä, J. 2014. Outlook for the next generation's precision forestry in Finland. *Forests* 2014, 5(7): 1682–1694. doi:10.3390/f5071682
- Kaartinen, H., Hyypä, J., Yu, X., Vastaranta, M., Hyypä, H., Kukko, A., Holopainen, M., Heipke, C., Hirschugl, M., Morsdorf, F., Naesset, E., Pitkänen, J., Popescu, S., Solberg, S., Bernd, M. & Wu, J. 2012. An international comparison of individual tree detection and extraction using airborne laser scanning. *Remote Sensing* 4(4): 950–974.
- 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(2013): 64–75.
- Liang, X., Kankare, V., Yu, X., Hyypä, J. & Holopainen, M. 2014. Automatic stem curve measurement using terrestrial laser scanning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing (TGRS)* 52(3): 1739–1748.
- Vastaranta, M., Saarinen, N., Kankare, V., Holopainen, M., Kaartinen, H., Hyypä, J. & Hyypä, H. 2014. Multisource single-tree inventory in the prediction of tree quality variables and logging recoveries. *Remote Sensing* 6(4): 3475–3491. doi:10.3390/rs6043475.

■ Prof. Markus Holopainen & MMT Mikko Vastaranta, HY, Metsätieteiden laitos;
Prof. Juha Hyypä, Geodeettinen laitos
Sähköposti markus.holopainen@helsinki.fi