

Laserkeilauksen metsätaloudelliset sovellusmahdollisuudet

Matti Maltamo ja Juho Pitkänen

Joensuun yliopisto, Metsätieteellinen tiedekunta
PL 111, 80101 Joensuu

Tiivistelmä: Laserkeilaus mahdollistaa yksittäisten puiden tunnistamisen, mikäli käytetty pulssintoistotaajuus on riittävän korkea. Tällainen kaukokartoitusaineisto, jossa puista tiedetään pituus ja sijainti, omaa laajat metsätaloudelliset hyödyntämismahdollisuudet. Perinteisesti laserkeilausta on käytetty metsävaratietojen tuottamiseen kuviotasolla. Muita mahdollisia sovelluskohteita ovat mm. metsävarojen suuralueinventoinnit, muutostulkinta, tärkeiden elinympäristöjen kartoittaminen sekä puuston rakenteen arviointi, visualisointi, käsittelytarpeen selvittäminen sekä kehityksen ennustaminen.

Avainsanat: yksinpuittainen laserkeilaus, metsävaratieto, muutostulkinta, monimuotoisuus.

1 Johdanto

Metsävarojen inventointia tehdään Suomessa pääpiirteittäin kahdella eri tasolla. Valtakunnan metsien inventointi on otospohjaista suuralueinventointia, jossa maastokoealojen ja mahdollisten kaukokartoitusaineistojen avulla lasketaan tuloksia lähtökohtaisesti metsäkeskuksittain (maakunnittain) (esim. Tomppo 1993). Kuvioittaisessa arvioinnissa puolestaan tarkasteltavana oleva alue jaetaan puustoltaan homogeenisiin kuvioihin, joilla tehdään pääsääntöisesti silmävaraisesti puustoarvioita maastossa. Kuvioittaisen arvioinnin tietosisältö toimii metsäsuunnittelun lähtöaineistona yksityismetsätaloudessa ja sitä tehdään vuosittain 0,7–1,5 miljoonaa hehtaaria (Oksanen-Peltola 1999). Lisäksi myös Metsähallitus ja metsäyhtiöt käyttävät menetelmää maa-alueillaan eli kuvioittainen arviointi kattaa periaatteessa koko maan.

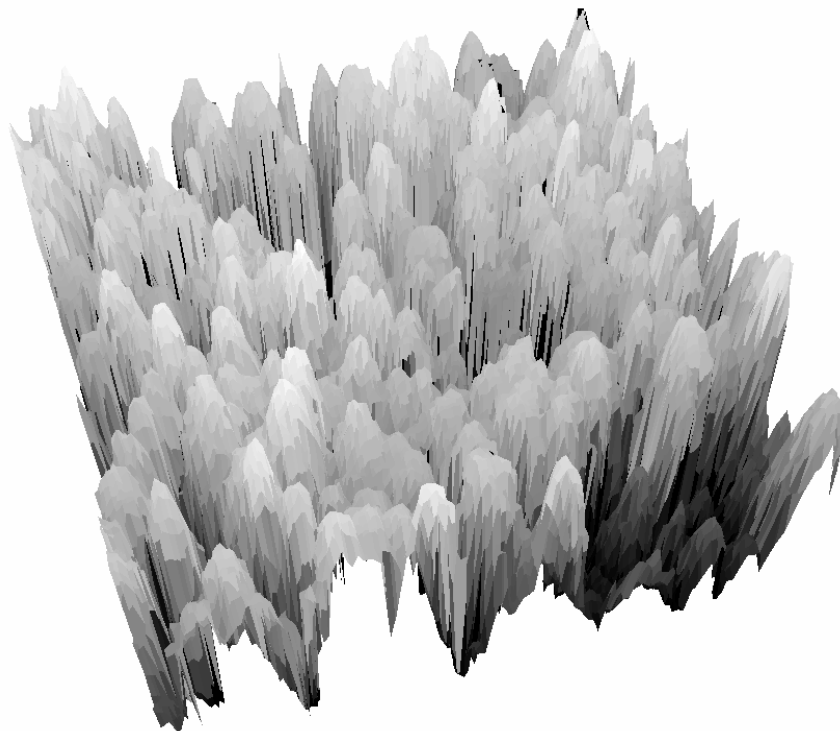
Erityisesti kuvioittaisessa arvioinnissa pidetään ongelmana maastotöiden kalleutta sekä toisaalta myös mittausten subjektiivisuutta ja epätarkkuutta. Kustannusten vähentämiseksi onkin erilaisten kaukokartoitusaineistojen tulkinnalla yritetty tuottaa kuviokohtaisia puustoestimaatteja (esim. Anttila 2002, Anttila ja Lehikoinen 2002, Hyvönen 2002). Käytettyjä aineistoja ovat olleet mm. erilaiset satelliitti- ja ilmakuvat, mutta tulosten tarkkuus ei toistaiseksi ole yleensä ollut halutulla tasolla. Tämä on johtunut mm. käytettyjen kuvamateriaalien liian alhaisesta resoluutiosta sekä sävyarvojen saturoitumisesta puuston latvuston sulkeutumisen jälkeen. Lisäksi kaukokartoitusmateriaalit ovat yleensä tuottaneet tietoa, joka ei ole ollut yhteensopivaa yksinpuittaisten puutunnusmallien kanssa. Suuremmille metsäalueille on myös esim. Landsat-TM satelliittikuvilla saatu lupaavia tuloksia (Tokola ja Heikkilä 1997).

Lupaavimmat kaukokartoitussovellukset liittyvät yksittäisten puiden tulkintaan. Korkean resoluution ilmakuvilta voidaan löytää yksittäisiä puita (esim. Dralle ja Rudemo

1996, Pitkänen 2001) ja tuottaa niille esimerkiksi segmentoimalla latvuksen koko (Anttila ja Lehtikoinen 2002, Culvenor 2002). Puun dimensioiden ennustamiseksi tarvitaan kuitenkin tällöin malleja, joista erityisesti puun rinnankorkeusläpimitan ja latvusalan (läpimitan) välisen mallin soveltaminen on ongelmallista. Mikäli käytössä on useampia ilmakuvia samasta kohdasta, voidaan digitaalisen fotogrammetrian avulla laskea yksittäisille puille pituusestimaatti, jolloin päästään suoraan kiinni puun dimensionaalisiin tunnuksiin (Korpela 2000).

Vaihtoehto digitaaliselle fotogrammetrialle puuston koon arvioinnissa on aktiivisen kaukokartoituksen eli tutkakuvauksen hyödyntäminen. Ensimmäiset profiloivan lasertutkan metsäsovellukset tehtiin 1980-luvulla (esim. Nelson ym. 1988), mutta 1990-luvulla siirryttiin käyttämään laser-keilaukseen perustuvia menetelmiä (Nilsson 1996, Næsset 1997, Hyyppä ja Inkinen 1999). Tällöin on mahdollista tarkastella mm. heijastuneiden kaikujen jakaumaa ja ennustaa siitä lasketuilla prosenttipisteillä puustotunnuksia. Mikäli laserin pulssintoistotaajuus on riittävän korkea (5–10 per m²) voidaan myös yksittäiset puut erottaa (Hyyppä ja Inkinen 1999). Edelleen hyödyntämällä hahmontunnistusmenetelmiä saadaan yksittäisille puille sijainti, pituus ja latvuksen koko. Laserkeilauksen hyödyntämistä metsätaloudellisissa sovelluksissa on tutkittu erityisesti Pohjoismaissa ja Pohjois-Amerikassa.

Tässä kirjoituksessa tarkastellaan laserkeilauksen käyttömahdollisuuksia niin jo olemassa olevissa kuin myös lähitulevaisuudessa mahdollisissa metsätaloudellisissa sovelluksissa. Pääpaino on yksinpuittaiseen laserkuvan tulkintaan pohjautuvassa metsävaratietojen hankinnassa, mutta myös eräitä ekologisiin sovelluksiin ja monimuotoisuuteen liittyviä näkökulmia tarkastellaan.



Kuva 1. Puuston kolmiulotteinen pituusmalli (Mustonen 2002).

2 Metsävaratietojen tuottaminen

Lähtökohtana puustotietojen tuottamiselle on laserkeilauksella saadun pisteparvidatan analysointi yleensä erilaisten pintamallien avulla. Boreaalisella kasvillisuusvyöhykkeellä heijastuu tiheässäkin metsässä n. 30 % pisteistä maasta (Vuokila 1980). Näiden maasta heijastuneiden pisteiden avulla voidaan laatia maaston korkeusmalli, kun taas puiden latvoista ja muusta kasvillisuudesta heijastuneet pisteet muodostavat latvuston pintamallin. Näiden kahden mallin erotus on puolestaan puuston pituusmalli, joka on 3-ulotteinen esitys alueen puuston pituudesta (Kuva 1).

Analysoimalla pituusmallia voidaan erottaa yksittäiset puut, mikäli pulssintoistotaajuus on riittävä (Hyyppä ja Inkinen 1999). Puiden mahdollisia sijaintipaikkoja ovat pituusmallista haettavat paikalliset maksimit, joiden määrää joudutaan usein karsimaan esim. suodatuksen tai minimietäisyyden avulla. Yksinpuittaisten pituusestimaattien keskivirhe on useissa tutkimuksissa ollut alle metrin ja puulajeista havupuiden pituus on ollut tarkemmin ennustettavissa kuin lehtipuiden. Pituusestimaatit ovat yleensä lieviä aliarvioita, sillä laserpulssit eivät välttämättä osu aivan puun latvaan. Käytetyt puiden tunnistusmenetelmät tai puun latvuksen segmentointimenetelmät on kehitetty usein numeerisia ilmakuvia varten eivätkä ne siten välttämättä pysty hyödyntämään laserkeilauksen pituusinformaatiota tehokkaasti (Hyyppä ym. 2001).

Kun puu on tunnistettu, saadaan sille siis pituusmallista pituus ja segmentoinnin avulla myös latvusala. Näiden tietojen perusteella ennustetaan puulle läpimitta ja edelleen yleisillä tilavuusfunktioilla tilavuus. Alueen pinta-alatietojen perusteella voidaan sitten yleistää kuvio-, hehtaari- ja aluekohtaisia tuloksia. Koska läpimitan ennustamisessa on käytävissä myös puun pituus, saadaan läpimitta ennustettua huomattavasti paremmin kuin pelkän latvusalan avulla. Lisäksi jos alueelta on käytössä vanhaa inventointitietoa, voidaan sitä hyödyntää kuvioinnissa, puulajitunnistuksessa ja puutunnusmallien kalibroinnissa. Kuvioinnissa laserkeilausta voidaan puolestaan hyödyntää ainakin aputietona vierekkäisten kuvioiden puuston pituuserojen perusteella, mutta pelkkään laserkeilausinformaatioon perustuva kuviointi ei liene ainakaan toistaiseksi mahdollista.

Edellä esitetty lähestymistapa on perusratkaisu puustotunnusten laskentaan esimerkiksi yksittäisille kuvioille. Tällöin laserkeilausta voidaan tiedontuottajana verrata kuvioittaiseen arviointiin. Koska puita tarkastellaan yksittäin, tämä soveltuu hyvin yhteen erilaisten puutunnusmallien käytön kanssa. Puuston tilavuuden ennustetarkkuudeksi on saatu 10–25 % riippuen siitä onko myös harha otettu huomioon vai ei (Hyyppä ja Inkinen 1999, Maltamo ym. 2003a). Luotettavuusluvut ovat verrattavissa kuvioittaisen arvioinnin tarkkuuden tutkimuksiin, joissa vastaavaksi virheeksi on saatu 10–40 % (esim. Laasasenaho ja Päivinen 1986, Poso 1983, Pussinen 1992).

Ongelmia laserkeilausperusteisessa lähestymistavassa aiheuttavat erityisesti löytämättömät puut, joiden takia tulokset ovat yleensä aliarvioita, ja puulajin tunnistus ja iän arviointi. Lisäksi toimenpide-ehdotusten (metsänhoitotyöt ja hakkuut) tuottaminen on vaikeaa, kuten kaikissa muissakin järjestelmissä, missä kuviolla ei käydä maastossa. Puulajitunnistuksessa laserdataalta saatiin äskettäin lupaavia tuloksia männyn ja kuusen erottamisesta menetelmällä, jossa puun latvuksesta heijastuneiden pisteiden avulla päätellään puulaji pisteparven hahmon ja pisteiden intensiteetin perusteella (Persson ym. 2003). Myös Suomessa kehitetään puulajin tunnistusta latvusprofiilien avulla (Pyysalo ja Hyyppä 2002). Puulajin tunnistuksen mahdollisuuksia voidaan parantaa myös käyttämällä ilmakuvaa laseraineiston lisäksi.

Puiden löytämiselle ongelmia aiheuttavat lähellä toisiaan kasvavat puut sekä toisaalta vallitsevan latvuskerroksen alapuoliset puut. Näiden ongelmakohteiden määrä vaihtelee erilaisissa metsissä, ja tutkimustulosten mukaan keskimäärin 40–90 % puista on löydetty (Persson ym. 2002, Maltamo ym. 2003b). Vallittuja puita voidaan ennustaa teoreettisilla

todennäköisyysjakaumilla, mikä parantaa ennustamistarkkuutta, mutta ongelmana on menetelmän käyttökelpoisuus erilaisissa metsissä (Maltamo ym. 2003a)

Periaatteessa laserkeilauksen tuottaman puuston tilavuusestimaatin tarkkuutta voitaisiin edelleen parantaa estimoimalla osalle tunnistetuista puista myös latvusrajan estimaatti. Tällöin myös puuston laadun kuvaus tarkentuisi. Koska laserkeilauksessa käytettävissä on tunnistettujen puiden jokseenkin tarkka pituus, on luultavaa, että myös tarkan puutavaralajirakenteen ja jopa sahaustuotteiden ennuste on tarkempi kuin esimerkiksi pelkkiin keskitunnuksiin perustuvan kuvioittaisen arvioinnin. Tämä kuitenkin edellyttää, että laserkeilauksen tuottama kokonaispuustoestimaatti ei ole huomattava aliarvio ja että puulajit saadaan tunnistettua.

Laserkeilaus tuottaa myös erinomaista aineistoa puuston visualisointiin. Puuston visualisoinnilla on tärkeä merkitys metsäsuunnittelussa esimerkiksi metsänomistajan neuvonnassa. Aihepiiriä onkin tutkittu mm. Ruotsissa (Persson ym. 2003). Jo pelkkä kolmiulotteinen puuston pituusmalli tuottaa realistisen metsänkuvauksen (Kuva 1), jota voidaan visualisointimenetelmillä edelleen parantaa.

Norjassa laserkeilauksella tuotetaan puustotunnuksia erilaisella lähestymistavalla kuin Suomessa. Käytetty pulssintoistotaajuus on huomattavasti alhaisempi ja tällöin tarkastellaan heijastuneiden kaikujen korkeus- ja intensiteettijakaumaa, joiden prosenttipisteistä ennustetaan regressiomalleilla puustotunnuksia, kuten keskipituutta ja tilavuutta (esim. Næsset 2002). Menetelmä vaatiikin aluekohtaisesti laserkeilauksen lisäksi satelliitti-paikannetun maastokoeala-aineiston. Saadut tulokset ovat olleet tarkkuudeltaan hyviä, esimerkiksi puuston tilavuuden ennustevirhe on ollut 10–20 %. Norjalaisten sovelluksilla ei kuitenkaan päästä yksinpuittaiseen tarkasteluun muutoin kuin erillisten ennustemallien avulla.

Norjassa on jo operatiivisessa käytössä laserkeilaukseen perustuvia metsäninventointisovelluksia, kun taas Suomessa ja muuallakin maailmassa menetelmä on yleensä ollut vasta tutkimuskäytössä. Jos menetelmää tarkastellaan Suomen olosuhteissa otantalähtöisiin sovelluksiin, niin laserkeilauksella voitaisiin mitata kaistoja, joiden informaatio yleistettäisiin esimerkiksi ilma- tai satelliittikuvien sävyarvojen perusteella koko tutkimusalueelle käyttämällä ei-parametrista lähimmän naapurin menetelmää (Holopainen ja Hyypä 2003). Tämä tietysti edellyttäisi sekä ilmakeilaus- että laserkeilausaineiston olemassaoloa tutkimusalueelta. Toisaalta voitaisiin ajatella, että keilaamalla koko Suomi, saataisiin tarkkaa yksinpuittaista metsävaratietoa moniin tarkoituksiin. Esimerkiksi kuvio-käsitteen tarkoitus voitaisiin tällöin miettiä uudelleen. Tällainen lähestymistapa suuralueittaiseen metsävaratietojen tuottamiseen ei liene kuitenkaan lähitulevaisuudessa näköpiirissä.

3 Metsävarojen seuranta ja kehityksen ennustaminen

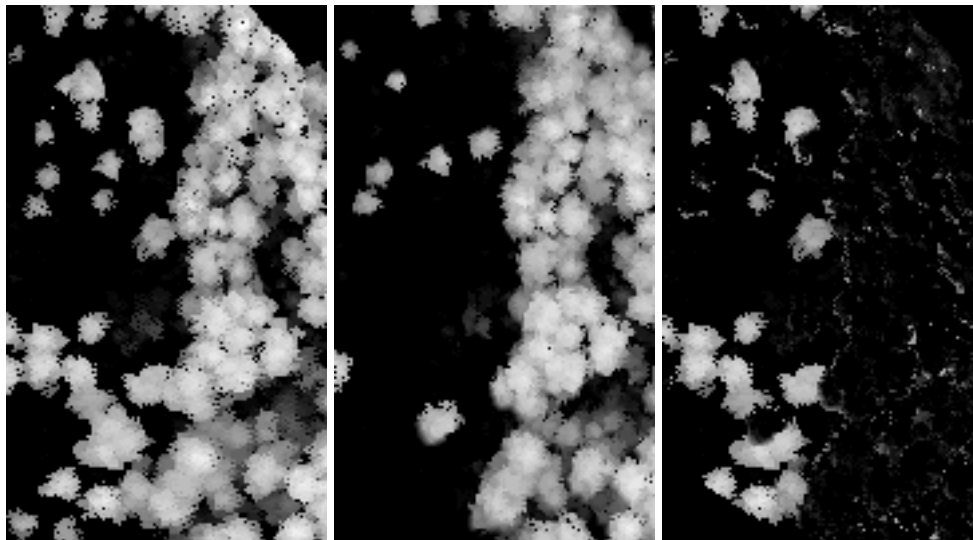
Laserkeilaustutkimukset ovat toistaiseksi lähes täysin keskittyneet vain yhden ajankohdan aineistoihin. Yun ym. (2003) työssä tarkasteltiin kahden keilauksen eroja, kun kuvausajankohtien ero oli kaksi kasvukautta. Metsikön, jopa yksittäisen puun pituuskasvua pystyttiin arvioimaan luotettavasti erotuskuvalta, vaikka kasvujakso oli erittäin lyhyt. Lisäksi menetelmällä voitiin havaita kaadettuja puuryhmiä, yksittäisiä kaatuneita puita ja jopa voimalinjan tieltä katkaistuja suuria oksia (Kuva 2).

Metsätaloudellisissa sovelluksissa laserkeilaus tuntuisi soveltuvan erinomaisesti muutostulkintaan erilaisilla mittakaavoilla, vaikkakaan esimerkiksi harvennusten tunnistamisesta ei toistaiseksi ole tutkimustuloksia. Lisäksi menetelmää voitaisiin hyödyntää kestokoealojen tapaan toistuvissa metsäninventoinneissa.

Keskeinen osa metsäsuunnittelua on metsän tulevan kehityksen ennustaminen, yleensä viiden vuoden jaksoissa. Peräkkäiset laserkeilausaineistot voisivat tällöin toimia ei-

parametrisena kasvunyleistysaineistona joko puu-, kuvio- tai jopa laajemmalla tasolla. Vastaavia tutkimuksia on maastoaineistojen perusteella jo tehty (Sironen ym. 2003). Tällöin voidaan kasvun alueellinen suuri vaihtelu ottaa tehokkaasti huomioon, mikä yleensä on kasvumalleissa ongelmana. Toisaalta vaikka käytettävissä olisi ainoastaan puuston nykytilan kuvaus laserkeilaukseen perustuen, on tällä lähestymistavalla omat etunsa kuvioittaiseen arviointiin verrattuna. Koska puiden sijainnit ainakin vallitsevan latvuserroksen osalta tiedetään, voidaan puiden välistä kilpailua kuvata pituuteen perustuvilla kilpailuindekseillä. Tällöin voidaan tulevan kehityksen kuvaamisessa soveltaa ns. spatiaalisia kasvumalleja. Näihin tarvittava puiden kartoitus maastomittauksilla on erittäin työlästä eikä sovellukaan käytännön metsäinventointiin. Lisäksi maastomittaukset tuottavat yleensä tietoa vain puiden läpimitoista, kun taas pituus on puiden välisen kilpailun kannalta olennaisempi tunnus. Kilpailun kuvaamisen lisäksi puiden välisten etäisyyksien tunteminen helpottaa metsikön tulevan harvennustarpeen ja ajankohdan optimaalisessa määrityksessä. Puiden sijaintitietojen laajempi käyttö kuitenkin edellyttää, että myös lähekkäiset ja puuryhmissä olevat puut saadaan paremmin tunnistettua.

Nykyisin on tavoitteena päästä noin kymmenen vuoden välein toistettavista kalliista maastoinventoinneista kuviotietojen ylläpitoon, jolloin kasvu päivitetään kasvumalleilla ja tehdyt toimenpiteet päivitetään tietokantaan. Tietojen ylläpito vaatii ajoittain kevyemmän tarkistusinventoinnin poikkeavien kasvujen, tuhojen ja kirjausvirheiden löytämiseksi. Laseraineisto sopii tällaiseen käyttöön hyvin, koska laserilta huonosti saatavat tunnuksot, kuten maapohjan tiedot, puulajisuhteet ja puuston ikä, ovat jo tiedossa.



Kuva 2. Vasemmalla vuoden 1998 laserkuva, keskellä vuoden 2000 laserkuva ja oikealla näiden erotuskuva, josta näkyy kaadetut puut (Yu ym. 2003).

4. Metsäekologiset ja luonnon monimuotoisuuden liittyvät tutkimukset

Koska maanpinnan ja latvan lisäksi osa laserpulseista heijastuu latvuston sisältä, voidaan laseraineistoa käyttää myös latvuston vertikaalisen rakenteen ja esimerkiksi lehtipinta-alaindeksin (LAI) selvittämiseen. Magnussenin ja Boudewynin (1998) mukaan laserpulssien kumulatiivinen korkeusjakauma onkin verrannollinen kumulatiiviseen lehtipinta-alanjakaumaan. Tämä avaa laajat mahdollisuudet monenlaisiin ekologisiin tutkimuksiin. Laserkeilausaineiston hyödyntäminen metsäekologisiin sovelluksiin on kuitenkin vasta alussa eikä tutkimuksia aihepiiristä ole toistaiseksi kovin paljon. Laserpulssien lisäksi voidaan

tarkastella laserprofiileja (esim. Hyyppä ym. 2000), jotka myös voivat tarjota paljon tietoa niin latvustosta kuin sen alapuoleltakin

Laserpulssien heijastumisen perusteella voidaan selvittää myös puuston jakautumista eri latvuseroksiin eli esimerkiksi onko puusto yksi- vai useampijaksoinen. Tietoa jaksoisuudesta voidaan käyttää hyväksi esimerkiksi, kun puustotietoja täydennetään jakaumamalleilla. Lisäksi jaksoisuus on tärkeä tunnus luonnon monimuotoisuuden kannalta.

Useissa tutkimuksissa on selvitetty laserkeilauksen avulla eri eliölajien habitaatteja (Hill ym. 2003, Sato ym. 2003). Tällöin laserkeilauksen avulla voidaan ensinnäkin laatia pintamalleja usein erittäin hankalissa olosuhteissa. Laserkeilauksesta saadaan myös tietoa habitaatin puuston rakennetunnuksista. Suomessa laserkeilausta voitaisiin käyttää esimerkiksi mahdollisten arvokkaiden elinympäristöjen tunnistamiseen, minkä jälkeen näiden kohteiden paikkansapitävyys voitaisiin tarkastaa maastossa.

5 Lopuksi

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin laserkeilauksen käytettävyyttä metsätaloudellisissa ja -tieteellisissä sovelluksissa. Vaikka mahdollisuudet näyttävätkin erinomaisilta, on soveltaminen toistaiseksi ollut varsin vähäistä rajoittuen tutkimuksellisiin puustotietojen tuottamiseen. Laserkeilauksen käyttöön Suomen olosuhteissa liittyykin tiettyjä rajoituksia, jotka hidastavat menetelmän entistä laajempaa käyttöönottoa lähitulevaisuudessa.

Laserkeilauksen hinta koetaan varsin korkeaksi verrattuna muihin kaukokartoitusmenetelmiin. Lisäksi aineistoa ei ole rutiininomaisesti saatavilla kuten esimerkiksi ilmakuvia. Hinnan alenemiseen lähitulevaisuudessa vaikuttanee mm. laitteistokehitys sekä menetelmän entistä suurempi hyödyntäminen metsätalouden ulkopuolisissa sovelluksissa. Mahdollinen optimistinen vertailukohta voisi olla matkapuhelinten runsas hinnanlasku ja yleistyminen 1990-luvulla.

Suomessa on pitkä ja vahva traditio maastotöiden tekemiseen – toisin kuin esimerkiksi Norjassa. Erityisesti yksityismetsätaloudessa onkin metsäsuunnittelussa periaatteena "jokaisella kuviolla on maastossa käytävä" eikä tällaisia asenteita helposti muuteta. Edelliseen liittyen metsäsuunnittelussa jopa puustotietojen tarkkuutta tärkeämpänä tunnuksena pidetään toimenpide-ehdotusten oikeellisuutta tai ainakin selvästi virheellisten ehdotusten välttämistä. Kaukokartoituspohjaisilla menetelmillä tällaisten ehdotusten tuottaminen on vaikeaa, sillä käytettävissä ei välttämättä ole eikä edes voi olla tietoa esim. maapohjasta, heinittymisestä, tuhoista, soistumisesta ym. ilmiöistä. Varsinaisten toimenpide-ehdotusten lisäksi myös toimenpiteiden kiireellisyys on tärkeä tunnus, jonka arviointi ilman maastossa käymistä on vaikeaa. Laserkeilauksen hyödyntämiseen liittyy myös työvoimapoliittisia sekä metsänomistajan tietosuojaan liittyviä kysymyksiä.

Metsää kuvaavat mallit ovat puolestaan ensisijaisesti perustuneet puuston tai yksittäisten puiden läpimittatunnuksiin. Laserkeilauksen yhteydessä ensisijainen puutunnus onkin pituus, jolloin periaatteessa koko mallikokoelma pitää suunnitella ja laatia uudelleen. Tätä hankaloittaa sopivien aineistojen – kaikista puista mitattu pituus – puute ja jälleen kerran pitkä traditio tehdä asiat kuten ne on ennenkin tehty.

Edellä mainituista seikoista huolimatta laserkeilauksen hyödyntäminen Suomen metsätaloudessa yleistyy laitteisto- ja hintakehityksen, tulosten tarkkuuden edelleen parantumisen sekä esimerkiksi pitkittäisaineistojen saamisen myötä. Tutkimuksellisen panostuksen lisäksi tarvitaan myös kaupallisia ohjelmistoja, joilla prosessoida dataa ja laskea haluttuja tunnuksia. Metsävaratietojen tuottamisen lisäksi menetelmää tullaan varmasti hyödyntämään myös muilla metsätieteen aloilla, kunhan metsätieteilijät ja käytännön metsätaloudessa työskentelevät henkilöt yleensä löytävät menetelmän ja oppivat sitä hyödyntämään.

Lähdeluettelo

- Anttila, P. (2002). Updating stand level inventory data applying growth models and visual interpretation of aerial photographs. *Silva Fennica* 36, s. 549–560.
- Anttila, P. & Lehtikoinen, M. (2002). Kuvioittaisten puustotunnusten estimointi ilmakuvilta puoliautomaattisella latvusten segmentoinnilla. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/3002, s. 381–389.
- Culvenor, D.S. (2002). TIDA: an algorithm for the delineation of tree crowns in high spatial resolution remotely sensed imagery. *Computers & Geosciences* 28 (1), s. 33–44.
- Dralle, K. & Rudemo, M. (1996). Stem number estimation by kernel smoothing in aerial photos. *Canadian Journal of Forest Research* 26, s. 1228–1236.
- Hill, R.A., Hinsley, S.A., Bellamy, P.E. & Balzter, H. (2003). Ecological applications of airborne laser scanner data: Woodland bird habitat monitoring. Teoksessa: Hyypä, J., Næsset, E., Olsson, H., Granqvist Pahlen T. & Reese, H. (toim.). Proceedings of the workshop Scandlaser scientific workshop on airborne laser scanning of forests. September 3 & 4, 2003 Umeå, Sweden. Working paper 112 2003. Swedish University of Agricultural Sciences Department of Forest Resource Management and Geomatics. s. 78–87.
- Holopainen, M. & Hyypä, J. (2003). Possibilities with laser scanning in practical forestry. Teoksessa: Hyypä, J., Næsset, E., Olsson, H., Granqvist Pahlen T. & Reese, H. (toim.). Proceedings of the workshop Scandlaser scientific workshop on airborne laser scanning of forests. September 3 & 4, 2003 Umeå, Sweden. Working paper 112 2003. Swedish University of Agricultural Sciences Department of Forest Resource Management and Geomatics. s. 264–273.
- Hyvönen, P. (2002). Kuvioittaisten puustotunnusten ja toimenpide-ehdotusten estimointi k-lähimmän naapurin menetelmällä Landsat TM-satelliittikuvan, vanhan inventointitiedon ja kuviotason tukiaineiston avulla. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/3002, s. 363–379.
- Hyypä, J. & Inkinen, M. (1999). Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner. *The Photogrammetric Journal of Finland* 16, s. 27–42.
- Hyypä, J., Pyysalo, U., Hyypä, H. & Samberg, A. (2000). Elevation accuracy of laser scanning-derived digital terrain and target models in forest environment. 20th EARSEL Symposium and Workshops Dresden, Germany, 14–17 June, 2000. 9 s.
- Hyypä, J., Kelle, O., Lehtikoinen, M. & Inkinen, M. (2001). A segmentation-based method to retrieve stem volume estimates from 3-dimensional tree height models produced by laser scanner. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing* 39, s. 969–975.
- Korpela, I. (2000). 3-d matching of tree tops using digitized panchromatic aerial photos. A thesis submitted in fulfillment of the requirements for the degree Licenciate in Agriculture and Forestry. University of Helsinki. 91 s.
- Laasasenaho, J. & Päivinen R. (1986). Kuvioittaisen arvioinnin tarkistamisesta. *Folia Forestalia* 664. 19 s.
- Magnussen, S. & Boudewyn, P. (1998). Derivations of stand heights from airborne laser scanner data with canopy-based quantile estimators. *Canadian Journal of Forest Research* 28, s. 1016–1031.
- Maltamo, M., Eerikäinen K., Pitkänen, J. Hyypä, J. & Vehmas, M. (2003a). Combination of single tree laser scanning and theoretical distribution functions in the estimation of plot volume and number of stems. Teoksessa: Hyypä, J., Næsset, E., Olsson, H., Granqvist Pahlen T. & Reese, H. (toim.). Proceedings of the workshop Scandlaser scientific workshop on airborne laser scanning of forests. September 3 & 4, 2003 Umeå, Sweden. Working paper 112 2003. Swedish University of Agricultural Sciences Department of Forest Resource Management and Geomatics. s. 197–210.
- Maltamo, M., Mustonen, K., Hyypä, J., Pitkänen, J. & Yu, X. (2003b). The accuracy of single-tree based laser scanning. *Käsikirjoitus*.

- Mustonen, K. (2002). Tilajärjestyksen ja puuston pituuden määrittäminen laserkeilainkuvilta. Metsäsuunnittelun ja –ekonomian pro gradu. Joensuun yliopisto. 54 s.
- Nelson, R., Krabill, W. & Tonelli J. (1988). Estimating forest biomass and volume using airborne laser data. *Remote Sensing of Environment* 24, s. 247–267.
- Nilsson, M. (1996). Estimation of tree heights and stand volume using an airborne LIDAR system. *Remote Sensing of Environment* 50, s. 1–7.
- Næsset, E. (1997). Estimating timber volume of forest stands using airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment* 51, s. 246–253.
- Næsset, E. (2002). Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. *Remote Sensing of Environment* 80, s. 88–99.
- Oksanen-Peltola, L. (1999). Johdanto. Teoksessa: Heikinheimo, M. (toim.) 1999. Metsäsuunnittelun tietohuolto. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 741. 105 s.
- Persson, Å., Holmgren, J. & Söderman, U. (2002). Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner. *Photogrammetric engineering & Remote Sensing* 68, s. 925–932.
- Persson, Å, Holmgren, J. & Söderman, U. (2003). Detection, measurements, and species classification of individual trees for forest inventory and visualization. Teoksessa: Hyypä, J., Næsset, E., Olsson, H, Granqvist Pahlen T. (toim.). Proceedings of the workshop Scandlaser scientific workshop on airborne laser scanning of forests. September 3 & 4, 2003 Umeå, Sweden. Working paper 112 2003. Swedish University of Agricultural Sciences Department of Forest Resource Management and Geomatics. s. 222–233.
- Pitkänen, J. (2001). Individual tree detection in digital aerial images by combining locally adaptive binarization and local maximal methods. *Canadian Journal of Forest Research* 31, s. 832–844.
- Poso, S. (1983). Kuvioittaisen arvioimismenetelmän perusteita. *Silva Fennica* 17, s. 313–349.
- Pussinen, A. (1992). Ilmakuvat ja Landsat TM-satelliittikuva välialueiden kuvioittaisessa arvoinnissa. Metsätalouden suunnittelun syventävien opintojen tutkielma. Joensuun yliopisto. 48 s.
- Pyysalo, U. & Hyypä, H. (2002). Reconstructing tree crowns from laser scanner data for feature extraction. ISPRS Commission III, Symposium 2002, September 9–13, 2002, Graz, Austria. Proceedings of IAPRS, Vol. XXXIV, part 3B, 4 s.
- Sato, K., Hirata, y., Sakai, A. & Kuramoto, S. (2003). Wood mice and stand structure using helicopter-borne laser scanner. Teoksessa: Hyypä, J., Næsset, E., Olsson, H, Granqvist Pahlen T. & Reese, H. (toim.). Proceedings of the workshop Scandlaser scientific workshop on airborne laser scanning of forests. September 3 & 4, 2003 Umeå, Sweden. Working paper 112 2003. Swedish University of Agricultural Sciences Department of Forest Resource Management and Geomatics. s. 88–96.
- Sironen, S., Kangas, A., Maltamo, M & Kangas, J. (2003) Estimating individual tree growth with non-parametric methods. *Canadian Journal of Forest Research* 33, s. 444–449.
- Tokola, T. & Heikkilä, J. (1997). A priori site quality information in satellite image based forest inventory. *Silva Fennica* 31, s. 67–78.
- Tomppo, E. (1993). Multi-source National Forest Inventory of Finland. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 444, s. 52–60.
- Vuokila, Y. (1980). Metsänkasvatuksen perusteet ja menetelmät. WSOY. 246 s.
- Yu, X.W., Hyypä, J., Rönholm, P., Kaartinen, H., Maltamo, M & Hyypä, H. (2003). Detection of harvested trees and estimation of forest growth using laser scanning. Teoksessa: Hyypä, J., Næsset, E., Olsson, H, Granqvist Pahlen T. & Reese, H. (toim.). Proceedings of the workshop Scandlaser scientific workshop on airborne laser scanning of forests. September 3 & 4, 2003 Umeå, Sweden. Working paper 112 2003. Swedish University of Agricultural Sciences Department of Forest Resource Management and Geomatics. s. 114–123.