

Markus Holopainen

Metsien kaukokartoitus – digitalisaatiota, täsmämetsätaloutta ja 4D-geoinfomatiikkaa

Holopainen M. (2019). Metsien kaukokartoitus – digitalisaatiota, täsmämetsätaloutta ja 4D-geoinfomatiikkaa. Metsätieteen aikakauskirja 2019-10214. Tieteen tori. 7 s. <https://doi.org/10.14214/ma.10214>

Yhteystiedot Helsingin yliopisto, Metsätieteiden osasto, Helsinki

Sähköposti markus.holopainen@helsinki.fi

Hyväksytty 20.6.2019

Digitalisaatio ja metsävarojen hallinta

Digitalisaatio ja siihen liittyvät suurten tietoaaineistojen käsittely, automaatio, robotiikka ja tekoälyn kehittäminen ovat mullistamassa yhteiskunnan toimintatapoja kaikilla tasoilla. Digitalisaatio ei kuitenkaan ole mikään uusi ilmiö. Metsävarojen hallintaan liittyvä, paikkatiedon ja kaukokartoituksen hyödyntämisessä tapahtunut kehitys on hyvä esimerkki digitalisaation eri vaiheista.

Metsäorganisaatiot olivat 1990-luvulla kehityksen kärjessä, kun koettiin digitalisaation ensimmäinen vaihe: kartta-aineistot ja ilmakuvat digitoitiin, satelliittikuvia alettiin hyödyntää operatiivisesti ja paikkatietojärjestelmät otettiin käyttöön. Vuosituhannen vaihe oli kaukokartoitusmenetelmien kehittymisen ja tutkimisen aikaa: esimerkkeinä lentolaserkeilaus, jonka avulla voidaan tuottaa kohteesta kolmiulotteisia (3D) pistepilviä, korkean resoluution satelliittikuvaus ja monien, kapeiden aallonpituusalueiden samanaikainen käyttö, eli hyperspektrikuvaus. 2010-luvulla tekniikat on viety käytäntöön: on koettu digitalisaation toinen vaihe. Pohjoismaissa suurimpana kehitysloikkana on ollut pääosin laserkeilaukseen perustava metsävarojen inventointimenetelmä, joka on otettu käyttöön kaikissa metsäorganisaatioissa. Viime vuosina ovat kehittyneet myös maastossa tehtävät lasermittaukset sekä lennokkikuvaus. Lisäksi 3D-pistepilviä on nykyisin mahdollista tuottaa myös muista aineistoista ja eri menetelmin kuin laserkeilauksen avulla, kuten fotogrammetrisesti joko ilma- tai satelliittikuvilta tai SAR-tutkakuvien avulla.

Uudet teknologiat ovat mahdollistaneet 3D-mittauksiin perustuvan täsmämetsätalouden kehittämisen. Tätä aihepiiriä on tarkasteltu aiemmin Metsätieteen aikakauskirjan numeroissa [4/2009](#) ja [4/2014](#). Täsmämetsätaloudella tarkoitetaan paitsi teknologioiden kehittämistä, ennen kaikkea entistä tarkempaan tietoon liittyvien lisäarvomahdollisuuksien tuottamista. Metsäsunnittelun ja puunkorjuun tehostaminen, metsän arvonmäärityksen kehittäminen ja sähköisen puukaupan aloittaminen ovat esimerkkejä jo olemassa olevista, täsmämetsätalouden mahdollistamista ja metsävaratietoon liittyvistä lisäarvon tuottamismenetelmistä. Tämä kaikki on kuitenkin vasta alkua:

Suomessa ja muissa Pohjoismaissa ollaan tilanteessa, jossa maanlaajuisten lentolaserkeilausten ensimmäinen kierros ollaan saamassa päätökseen ja toinen kierros on alkumassa. Lento- ja maastolaserkeilaukseen perustuvat aikasarjat, eli 4D-tieto, mahdollistaa puita ja metsiä kuvaavien mallien tarkentamisen niin Suomessa kuin kansainvälisesti. Lisäksi muutostulkintatietoa hyödynnetään metsävaratiedon päivittämisessä sekä 4D-geoinformatiikan alaan kuuluvissa analyyseissa, jotka ovat keskiössä esimerkiksi metsätuhojen riskimallinnuksessa.

Täsmämetsätalouteen perustuva tietojohdaminen – digitalisaation kolmas vaihe

Suomen talous on riippuvainen metsäteollisuudesta, joka on viime vuosina kiitettävästi investoinut myös kotimaahan. Uusia isoja tehdashankkeita on suunnitteilla, joten paine hakkuiden lisäämiseen on olemassa. Toisaalta hakkuiden lisääminen voi olla ristiriidassa ilmastotavoitteiden toteuttamisen sekä monimuotoisuuden vähenemisen pysäyttämisen kanssa. Yksi keskeinen ratkaisu tähän metsävarojen käytön ongelmaan on yksityiskohtaisen 3D-/4D-kaukokartoitustiedon hyödyntäminen monitavoitteisen metsäsuunnittelun kaikilla osa-alueilla. Tarkka puustotieto yhdistettynä entistä tarkempaan monimuotoisuuden kuvaukseen mahdollistaa myös ilmastokestävän metsätalouden. Suomi voidaan nähdä laboratoriona, jossa kaukokartoituksen ja metsävarojen hallinnan menetelmiä kehitetään myös globaaleja sovelluksia silmällä pitäen.

On kuitenkin muistettava, että jo nykyisin Suomessa on yksi maailman tarkimmista metsävaratiedoista. Jotta kaukokartoitukseen liittyvät tutkimusnovaatiot siirtyisivät käytäntöön, kehityksen keskiössä ovat nykyiset metsävaratiedon suurtuottajat, kuten Luonnonvarakeskus (Luke), Suomen Metsäkeskus (SMK), Metsähallitus ja suuria metsäomaisuuksia hallinnoivat yritykset. Esimerkiksi näissä organisaatioissa metsävaratiedon mahdollisimman tarkka päivittäminen ja tietoon liittyvä päätöksenteko on jo nykyisin tärkeää. Tulevaisuudessa tietojohdamisen rooli tulee korostumaan entisestään. Hakkuiden vaikutus hiilitaseeseen on hyvä esimerkki monimutkaisesta ongelmasta, jonka yksinkertaisella esittämisellä luulisi olevan merkitystä ilmastokestävää metsätaloutta edistettäessä.

Lukuisat tutkimukset ja käytännön metsäorganisaatiot ovat todistaneet, että kaukokartoituksen avulla voidaan tehokkaasti tuottaa melko tarkkaa tietoa metsävaroista. Nykyistä tarkemmalla tiedolla ei kuitenkaan ole itseisarvoa, vaan kysymys kuuluu, saadaanko tiedon kautta lisäarvoa Suomen kansantalouteen, metsänomistajille, puuta jalostavalle teollisuudelle tai vaikkapa globaalien ympäristöhaasteiden, kuten monimuotoisuuden vähenemisen ja ilmastonmuutoksen torjuntaan. Keskityn seuraavaksi tähän kysymykseen visioimalla 3D-/4D-kaukokartoituksen mahdollistamia täsmämetsätalouden sovelluksia, joilla voisi olla tulevaisuudessa merkitystä puunkorjuun tehostamisen, monimuotoisuuden seurannan sekä ilmastokestävän metsätalouden näkökulmista.

Tulevaisuuden 3D-pistepilvet ja puunkorjuun tehostaminen

Laserkeilaukseen ja fotogrammetriaan perustuvat 3D-pistepilvet tulevat mullistamaan rakennetun ympäristön sekä luonnonvarojen kartoituksen lähitulevaisuudessa. Keskeisenä ajurina tässä kehityksessä on itseohjautuvien robottiautojen massatuotannon käynnistäminen. Ensi vaiheessa kyseessä ovat kuljettajaa avustavat järjestelmät. Laserkeilaimet ja kamerat ovat robottiauton keskeisiä sensoreita. Massatuotannon ansiosta 3D-pistepilviä tuottavien keilainten hinta tulee putoamaan murto-osaan nykyisestä. Tämä tulee avaamaan markkinat myös luonnonvarojen kartoitukseen liittyville sovelluksille. Tulevaisuudessa autot, lennokit ja hakkuukoneet tulevat tuot-

tamaan 3D-pistepilvidataa, jota voidaan käyttää metsävaratiedon päivityksen lähtöaineistona yhdessä lentokoneesta ja satelliiteista tehtävien mittauksen kanssa. Samalla karttojen päivittäminen voidaan muuttaa reaaliaikaiseksi. Esimerkiksi autot voivat päivittää tiestövaurioita heti, kun sensori niitä havaitsee. Hakkuukoneessa oleva laserkeilain voi tuottaa tarkkaa tietoa esimerkiksi harvennushakkuulla leimikolle jäävästä puustosta. Lisäksi tietoa voidaan hyödyntää puutasolla tehtävien kaukokartoitustulkintojen lähtöaineistona. Hakkuukoneen lisävarusteena olevalla lennolla voitaisiin kartoittaa hakattavaa leimikkoa etukäteen ja tarkentaa tietoa puutavaralajeista katkonnan optimointia varten. Hakkuukonedataa voidaan käyttää myös yksittäisen puun tasolla tehtävän metsävaratiedon päivityksen lähtöaineistona. Toisin sanoen esimerkiksi viimeisimmän hakkuun puukarttaa voidaan laskennallisesti päivittää puutasolla seuraavaan hakkuuseen, jolloin leimikon käyttö voidaan optimoida ja niin metsänomistaja kuin puunostaja hyötyvät.

Keskeisiä haasteita tässä visiossa ovat hakkuukoneen kouran paikannustarkkuus, joka ei vielä nykyisin ole riittävä tarkkojen puukohtaisten karttojen tuotantoon, sekä suurten tietoa-aineistojen, eli 3D-pistepilvien automaattinen käsittely jopa reaaliaikaisesti. Teknologia näiden ongelmien ratkaisuun on kuitenkin olemassa. Suurimpana pullonkaulana lieneekin se, että entistä tarkemmalle tiedolle ei ole selkeää markkinaa tai sen tuottamiselle ansaintamallia. Laserkeilainten ja kameroiden asentaminen hakkuukoneeseen ei ole ilmaista. Toisin sanoen niin hakkuukonevalmistajien kuin koneyrityksien tulisi saada osansa mahdollisesta hyödyistä. Lisäarvoa pitäisi tuottaa myös metsänomistajalle ja lopputuotteita valmistavalle teollisuudelle. Lisäarvomahdollisuudet ovat kuitenkin niin suuret, että todennäköisesti lähivuosina 3D-mittauksiin perustuvia puunkorjuumenetelmiä tullaan näkemään myös käytännössä.

Metsien terveydentilan ja monimuotoisuuden mittaukset

Valtakunnan metsien inventointi (VMI) tuottaa tietoa metsien terveydentilasta ja monimuotoisuuden liittyvistä tunnuksista sekä niiden muutoksista valtakunnan tasolla. Kyse on kuitenkin koealotantaan perustuvista mittauksista. Monimuotoisuuden ja metsien terveydentilan kartoittaminen pienalueilla vaatii tuekseen kaukokartoitustietoa. Myrsky- ja lumituhot pystytään kartoittamaan hyvällä tarkkuudella jopa puutasolla useampia-ikäisistä 3D-muutostulkintakuvista. Hyönteistuhojen kartoitus on haastavampaa, koska tuhot eivät välttämättä tuota muutoksia puiden geometriaan tai pituuteen. Hyönteistuhojen osalta joudutaankin laserkeilauksen lisäksi käyttämään spektritietoa, jota voidaan saada joko ilmakuvista, spektrometriaineistoista tai monikanavaisesta laserkeilauksesta. Hyönteistuhojen osalta olisi erityisen mielenkiintoista, jos pystyttäisiin kehittämään kaukokartoitukseen perustuvia ennakkovaroitusmenetelmiä mahdollisimman aikaisessa vaiheessa tuhojen alkaessa. Tällöin metsänhoidon keinoilla voisi olla vielä mahdollista vaikuttaa tuhojen laajuuteen.

Metsätuho aiheuttaa puissa stressiä, joka vaikuttaa puun kasvuun ja lehvästön kosteuteen. Uusimpien tutkimusten mukaan monikanavaisella laserkeilauksella on mahdollista mitata puiden lehvästöjen kosteutta hyvällä tarkkuudella laboratorio-olosuhteissa sekä kohtuullisella tarkkuudella myös metsässä. Seuraavaksi menetelmän avaamia mahdollisuuksia testataan laajemmilla alueilla.

Lajitason monimuotoisuuden suora mittaaminen kaukokartoituksen avulla on ainakin laajempien alueiden osalta yleensä mahdotonta. Sen sijaan kaukokartoitusta voidaan hyödyntää maisematason monimuotoisuuden kartoitukseen sekä monimuotoisuuden kannalta tärkeiden puuston rakenneominaisuuksien määrittämisen. Yksi keskeinen monimuotoisuuden tunnus on lahoppuuston määrä, jonka kartoittamiseen ja seurantaan ollaan parhaillaan kehittämässä useampi-ikäisiin 3D-aineistoihin perustuvia menetelmiä. Yksi mahdollinen menetelmä on sama kuin hakuiden tai myrskytuhojen kartoituksessa, eli 3D-muutostulkintakuvilta etsitään puita, jotka ovat tarkastelujakson aikana kaatuneet. Jos kyse on suojelualueesta, kaatuneet puut ovat maastossa,

eli niistä on tulossa lahopuita. Menetelmän avulla saadaan estimaatti myös lahopuiden koosta ja kokonaisuudesta, esimerkiksi hehtaarikohtaisesti. Lahopuuinventointia voidaan tehdä uusilla teknologioilla myös maastossa; ensimmäisessä aiheeseen liittyvässä tutkimuksessa kehitettiin maastolaserkeilaukseen perustuva maapuiden kartoitusmenetelmä, jonka todettiin toimivan melko tarkasti. Jatkossa menetelmää sovelletaan laajempien alueiden kartoitukseen sopiville alustoille, eli reppukeilaukseen ja lennokkikuvaukseen. Maastolaserkeilauksella tuotettua tietoa voidaan käyttää referenssinä esimerkiksi lentolaserkeilaukselle.

3D/4D-kaukokartoitus ja ilmastokestävä metsätalous

Ilmastokestävää metsätaloutta on vaikea toteuttaa, ellei hiilitaselaskelmien lähtökohtana oleva metsävaratieto ole riittävän tarkkaa. Tiedon tarkkuudessa on jopa Suomessa kehitettävää. On myös huomioitava, että Suomen tilanne on kuitenkin harvinaisen hyvä. Suuressa osassa maailman maita ei ole vakiintuneita tapoja seurata valtakunnallisesti metsävarojen kehitystä. Seuraavaksi esittelen, mitä mahdollisuuksia 3D/4D-kaukokartoitus avaa hiilitaseinventointien näkökulmasta.

Kaukokartoitusta, eli lähinnä 2D-satelliittikuvausta, käytetään nykyisin hiilitaseinventoinneissa maailmanlaajuisesti. Satelliittikuvat ovat tehokas, ja usein ainoa mahdollinen, tapa kartoittaa nopeasti erittäin laajojen alueiden maankäyttöä, ja esimerkiksi metsäpinta-alan muutoksia. Haasteena etenkin kehittymättömissä maissa, kuten tropiikissa, on maastoreferenssin puute. Tämä ongelma voidaan osittain poistaa hyödyntämällä kartoituksessa fyysikaalisen kaukokartoituksen menetelmiä. Toinen haaste on, että käytössä ei yleensä ole 3D-aineistoja. Toisin sanoen puuston pituustieto on hyvin epätarkkaa. Tällöin puuston biomassaennusteissa ja biomassan muutostulkinnassa etenkin sulkeutuneissa metsissä, joita sademetsät lähes aina ovat, on erittäin suurta epävarmuutta. 3D-menetelmiä tulisikin hyödyntää mahdollisuuksien mukaan myös laajojen alueiden puustobiomassan muutosten seurannassa. Tämä voidaan tehdä esimerkiksi hyödyntämällä lentokoneesta tai lennokista mitattua laserkeilausta maastoreferenssin korvaajana. Laserkeilausta voidaan käyttää myös otantatyökaluna, eli tehdään esimerkiksi laserkeilaukseen perustuva ”kaista-inventointi”. Useampivaiheisen otannan kautta yksityiskohtaista kaukokartoitustietoa voidaan hyödyntää karkeampiresoluutioisen satelliittikuvauksen referenssinä.

Lentolaserkeilaus on tarkimmillaan puuston kokonaistilavuuden tai -biomassan mittauksessa ja estimoinnissa. Tulevaisuudessa Suomesta ja muista Pohjoismaista on saatavilla useampiaikaisia laserkeilausaineistoja. Tällöin puustobiomassassa tapahtuvat muutokset voidaan kartoittaa hyvällä tarkkuudella suoraan kaukokartoitusaineistoon perustuen.

Toinen keskeinen haaste on puuta ja puustoa kuvaavat mallit – malleissa on Suomessakin kehittämisen varaa; puiden runkomuodot eivät välttämättä enää vastaa aineistoja, joiden avulla mallit on aikanaan laadittu. Lisäksi uudet metsänhoitomenetelmät voivat johtaa sellaiseen metsien kehitykseen, jota olemassa olevat mallit eivät kuvaa tarkasti. Puun rungon, oksien ja lehvästön muotoa ja määrää voidaan mitata tarkasti maastolaserkeilauksen avulla. Esimerkiksi puiden runkokäyrät voidaan mitata automaattisesti maastolaserkeilauspistepilvistä huomattavasti tarkemmin kuin perinteisin maastomittauksin. Maastolaserkeilaukseen perustuva puiden tilavuus- ja biomassamallien tekeminen avaa uusia näkymiä niin Suomessa kuin kansainvälisesti: perinteisesti puutason mallit ovat vaatineet laajan laadinta-aineiston kaadettuja ja tarkasti analysoituja puita. Tulevaisuudessa maastolaserkeilaus voi toimia mallien laadinta-aineistona.

Kasvumallit ovat keskiössä niin hiilitasetta kuin puuntuotantoa korostavassa metsätaloudessa ja sen suunnittelussa. Kasvumallien epävarmuus on kuitenkin suurta. Maasto- ja lentolaserkeilaukseen perustuvat aikasarjat avaavat uuden maailman kasvumallien kehittämiseksi ja esimerkiksi mallien paikalliselle kalibroinnille.

Puun laadun mittaus ja kartoitus

Puun jalostusarvon lisääminen tulisi olla keskeinen tavoitteemme. Jalostusarvon lisäämisen kautta on mahdollista parantaa metsätalouden taloudellisen kestävyuden lisäksi myös ekologista kestävyyttä, kun entistä parempaan taloudelliseen tulokseen päästään pienemmillä hakkuualoilla, jolloin suojeltujen metsien osuutta voisi olla mahdollista kasvattaa.

Yksi keskeinen pullonkaula lopputuotteiden jalostusarvon nostolle on se, että toistaiseksi puun laatua ei ole pystytty mittaamaan pystyjuista tehokkaasti. Puihin tai puustoihin liittyviä laatutunnuksia ei nykyisessä metsävaratiedossa vielä ole. Puun laadun mittaaminen maasto- ja lentolaserkeilaukseen perustuen on mahdollista. Viime aikojen tutkimusten perusteella maastolaserkeilauksella voidaan mitata hyvällä tarkkuudella tukkien järeytunnuksia, oksien kokoa ja jakaumaa sekä kohtuullisella tarkkuudella lenkoutta. Maastolaserkeilausta on mahdollista käyttää lentolaserkeilauksen referenssinä ja saada näin laatutietoa laajemmille alueille. Lentolaserkeilauksesta on mahdollista tuottaa myös perinteisen aluepohjaisen inventoinnin ja mallinnuksen puitteissa hyvällä tarkkuudella useita laatutunnuksia, kuten puiden latvusraja. Lisäksi tutkimuksissa on todettu, että yhdistämällä laajojen alueiden avointa lentolaserkeilausdataa tehtaiden röntgendataan, voidaan tehdä laatuluokituskartta, joilla voidaan tuottaa karkeaa laatuluokituskarttaa vaikka koko Suomen alueelle.

Uudet kaukokartoitusaineistot

Uudet laserkeilausaineistot ja -menetelmät mahdollistavat entistä tarkemmat ja tehokkaammat mittaukset: monikanavainen laserkeilaus on avannut mahdollisuuksia spektritiedon tuottamiseen myös laserkeilauksen avulla. Lisäksi parhaillaan kuumana tutkimusaiheena oleva yksittäisen fotonin (single-photon) mittaustekniikka mahdollistaa suuremmat pulssitiheydet ja keilaamisen entistä korkeammalta, jolloin keilauskustannuksia pystytään edelleen painamaan alaspäin. 3D-pistepilvien tuottaminen maastolaserkeilaimella, reppukeilaimella, hakkuukoneista tai lennokeista on siirtymässä tutkimuksista käytäntöön. Samalla kun uudet teknologiat mahdollistavat jopa neulastasolla tehtävät mittaukset, kehitetään entistä tarkempia menetelmiä myös laajojen alueiden metsien inventointia ja kartoitusta varten. Lähitulevaisuuden uusia potentiaalisia 3D-menetelmiä laajojen alueiden sovelluksiin ovat laserkeilauksen ja optisten satelliittikuvien yhdistelmät, 3D-tiedon tuottaminen suoraan optisiin satelliittikuviin perustuen sekä tutkasatelliittikuvien stereomittaukset, eli radargrammetria ja interferometria. Erityistä mielenkiintoa tällä hetkellä on myös satelliittipohjaisiin lasermittauksiin, joita voitaisiin käyttää esimerkiksi puustobiomassan kartoitukseen ja seurantaan globaalisti. Esimerkkeinä satelliittilaserohjelmista ovat NASA:n GEDI (Global ecosystem dynamics investigation) ja ICESat2 (Ice, cloud and land elevation satellite), joiden puitteissa on laukaistu ensimmäiset lasersatelliitit. GEDI:n osalta ongelmana tosin on, että satelliitti ei tuota aineistoa korkeille leveysasteille, joten sen hyödyntäminen esimerkiksi Suomessa ei ole mahdollista. Lisäksi on huomioitava, että lasersatelliitit tuottavat hyvin harvapäiväistä 3D-tietoa. Esimerkiksi ICESat2 tuottaa noin yhden korkeushavainnon hehtaaria kohden.

3D-kaukokartoituksen kehityksestä huolimatta ei pidä unohtaa perinteistä optista 2D-satelliittikuvausta, jonka etuna 3D-kaukokartoitukseen verrattuna on yleensä globaali kattavuus, parempi spektritiedon hyödyntämismahdollisuus sekä ennen kaikkea hyvä temporaalinen eli ajallinen resoluutio. Viime vuosien merkittävimpänä operatiivisen toiminnan kehitysloikkana voidaan pitää Euroopan avaruusjärjestön (ESA) keskiresoluution Sentinel-satelliittien laukaisua (Sentinel-1 ja -2), joiden suurimpana etuna on niiden hyvä ajallinen resoluutio. Sentinel-kuvia voidaan saada suotuisissa olosuhteissa jopa muutamien päivien välein. Kuvat ovat ilmaisia, joten ne ovat erinomainen lähtökohta laajojen alueiden seurantasovelluksiin. Lisäksi keskiresoluution

(spatiaalinen resoluutio n. 5–30 m, esimerkiksi Landsat) satelliittikuva-aikasarjoja on nykyisin saatavilla ilmaiseksi vähintään 20 vuoden ajanjaksolta, joten ne antavat erinomaisen mahdollisuuden esimerkiksi laajojen metsäalueiden muutostulkintaan tuona aikana.

Kaukokartoitusaineistojen analyysimenetelmien kehittäminen: tilastolliset ja fysikaaliset menetelmät kaukokartoitustiedon tulkinnassa

Metsien kaukokartoitukseen perustuva inventointi on jaettu perinteisesti tilastolliseen ja fysikaaliseen kaukokartoitukseen. Tilastolliset menetelmät lähtevät liikkeelle maastoreferenssin (yleensä maastokoealat) ja kaukokartoituspiirteiden (esimerkiksi satelliittikuvan pikselin sävyarvo) välisen riippuvuussuhteen mallintamisesta. Esimerkiksi Suomessa kaukokartoitukseen perustuvan metsävarojen inventoinnin päämenetelmä on tilastollinen k:n lähimmän naapurin (k-*nn*) menetelmä, jota hyödynnetään niin VMI-monilähdeinventoinnissa kuin SMK:n metsävaratiedon tuottamisessa. Fysikaalinen kaukokartoitus puolestaan perustuu biofysikaalisiin muuttujiin, eli metsän tapauksessa latvuston, oksien, neulaston ja pohjakerroksen rakenteeseen ja optisiin ominaisuuksiin. Lehtialaindeksi ja latvuspeitto ovat käytännön kartoituksissa hyödynnettyjä tunnuksia, jotka on johdettu näistä ominaisuuksista. Fysikaalisen kaukokartoituksen keskeinen etu tilastolliseen verrattuna on, että fysikaalisia heijastusmalleja voidaan hyödyntää laajemmin mallin laadinta-alueen ulkopuolelle, koska mallit ovat periaatteessa yleispäteviä. Sen sijaan tilastolliset mallit ovat yleensä melko paikallisia, mikä tarkoittaa runsasta maastoreferenssin tarvetta.

Kaukokartoitustutkimuksessa fysikaalinen ja tilastollinen mallinnus ovat lähestyneet toisiaan. Fysikaalista kaukokartoitusta on viime vuosina kehitetty niin satelliittikuvatulkintaan, hyperspektriaineistoille kuin laserkeilaukseen liittyen. Tällä hetkellä erityisen kuuma tutkimusaihe on metsäkasvillisuutta kuvaavien spektrikirjastojen luominen. Kirjastoja voitaisiin tulevaisuudessa hyödyntää satelliitti-hyperspektriaineistojen tulkinnassa globaalisti. Toinen mielenkiintoinen aihepiiri fysikaalisen mallinnuksen saralla on fluoresenssiin perustuva kaukokartoitus, jossa hyperspektriaineistosta haetaan tietyllä kapealla aallonpituuskanavalla havaittavaa fluoresenssi-ilmiötä, joka puolestaan korreloi puuston terveydentilan ja kasvun kanssa. Nämä tutkimusaiheet liittyvät hyperspektrisatelliitteihin, joita ollaan lähivuosina laukaisemassa: italialainen PRISMA (2019), saksalainen EnMAP (2020) ja Euroopan avaruusjärjestön (ESA) FLEX (2022).

Lopuksi

Visioimme [Metsätieteen aikakauskirjassa 4/2014](#) monilähteisen yksinpuintulkintamenetelmän, jonka avulla voitaisiin tulevaisuudessa päästä ainakin järeämissä puusto-ositteissa puutason metsävaratietoon ja sen seurantaan. Visioimme vaatima teknologia alkaa pikkuhiljaa olla olemassa. Jatkossa kyse on siitä, nähdäänkö lisäarvomahdollisuudet riittäviksi, jotta teknologia siirtyisi tutkimuksista käytäntöön. Toki myös tutkimusta edelleen kaivataan. Puulajikohtaisen runkolukusarjan mittaaminen tai estimointi on ollut ja on edelleen keskeinen kaukokartoitustulkinnan haaste. Puulajin ja etenkin nuorten puusto-ositteiden estimointitarkkuutta pitäisi pystyä edelleen parantamaan. Yksittäisistä tulevaisuuden tutkimusaiheista nostaisin keskiöön puiden ja puustojen kasvun mittaamisen ja mallintaminen kaukokartoitusajaksarjoilta. Puun laatu, tiheys, kasvupaikan puuntuotoskyky, metsän arvo, hiilensidonta- ja hiililasemallit, monimuotoisuus ja metsäsuunnittelulaskenta kaipaavat lähtökohdakseen nykyistä parempaa puiden kasvuun liittyvää ymmärrystä. Laserkeilaukseen perustuvat 4D-ajaksarjat avaavat uusia näkökulmia ja mahdollisuuksia ymmärryksen lisäämiseksi.



Professori Markus Holopainen puhumassa Suomen Metsätieteellisen Seuran 110-vuotisjuhlaseminaarissa 10.5.2019. Kuva: Pekka Nygren.

Kirjoitus perustuu Suomen Metsätieteellisen Seuran 110-vuotisjuhlaseminaarissa 10.5.2019 pidettyyn esitelmään.

Kirjallisuutta

- Hovi A., Lindberg E., Lang M., Arumäe T., Peuhkurinen J., Sirparanta S., Pyankov S., Rautainen M. (2019). Seasonal dynamics of albedo across European boreal forests: analysis of MODIS albedo and structural metrics from airborne LiDAR. *Remote Sensing of Environment* 224: 365–381. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.001>.
- Junttila S. (2019). Utilizing multispectral lidar in the detection of declined trees. *Dissertationes Forestales* 277. <https://doi.org/10.14214/df.277>.
- Kantola T. (2019). Forest health monitoring in transition: evaluating insect-induced disturbance in forest landscapes at varying spatial scales. *Dissertationes Forestales* 278. <https://doi.org/10.14214/df.278>.
- White J.C. (2019). Improving capacity for large-area monitoring of forest disturbance and recovery. *Dissertationes Forestales* 272. <https://doi.org/10.14214/df.272>.