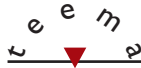


Timo Melkas ja Arto Visala

Hakkuukoneella kerätyn mittaustiedon hyödyntäminen



Laserkeilauksen ja hakkuukonemittausten yhdistämisellä tarkkaa puukohtaista tietoa

Metsävarojen inventoinnissa ollaan siirtymässä yhä yksityiskohtaisempaan tiedonkeruuseen.

Laserkeilaus, laserkeilaukseen perustuva yksinpuintulkinta, yksinpuintulkinta ilmakuvilta sekä hakkuukoneella kerättävä konenäköön ja laserteknologiaan perustuva runkotieto mahdollistavat metsien kartoituksen yksittäisen puun tarkkuudella. Tässä kirjoituksessa käydään läpi laserkeilauksella ja hakkuukoneella kerätyn mittaustiedon yhdistämis- ja hyödyntämismahdollisuuksia sekä tulevaisuuden hakkuukonemittauksen kehitysnäkymiä.

Laserkeilausmenetelmät voidaan jakaa aluepohjaisiin ja yksittäisten puiden tulkintaan perustuviin menetelmiin. Menetelmien avulla voidaan tuottaa puuston tilavuustieto koelalle tai halutulle kuviolle tai kuvion osalle puulajeittain sekä puutavaralajeittain. Yksittäisten puiden tulkinnessa puun tilavuus voidaan määrittää laseraineistosta mitatun puun pituuden ja latvuksen leveyden avulla. Koelakohtaiset tiedot saadaan summaamalla yksittäisten puiden tilavuudet. Aluepohjaisessa menetelmässä metsikkötunnukset koelatasolle arvioidaan puolestaan opetusaineiston avulla ja yksittäisen puun tilavuutta ei saada.

Laserkeilauksen etuna on, että puuston pituusjakauma saadaan varsin luotettavasti, kun taas ilmakuvilta tapahtuvassa yksinpuintulkinnassa vain pää- ja lisävaltapuut on mahdollista kartoittaa. Alue-

pohjainen laserkeilausinventointi vaatii toimiakseen laajan tarkasti mitatun koeala-aineiston. Inventointimenetelmänä yksinpuintulkinta vaatii maastoaineistoa huomattavasti vähemmän, vain laserilta tai ilmakuvilta tehtyjen mittausten kalibrointiin. Molempien inventointimenetelmien maastomittaukset on tehtävä tarkasti paikannetuilta maastokoeloilta. Vaihtoehtoina ovat perinteiset paljon resursseja vaativat maastomittaukset tai uusien laser- ja digitaalitekniikkaan perustuvien puoliautomaattisten tai automaattisten mittalaitteiden kehittäminen ja hyödyntäminen.

Teollisuuden jouhean puuhuollon kannalta on tärkeää kehittää menetelmiä, joiden avulla leimikon puustotiedot voidaan mitata tarkasti ja kustannustehokkaasti. Tällöin kerran mitattua tietoa runkojen ominaisuuksista voidaan hyödyntää läpi koko logistiikkaketjun. Tietojen tallennus tapahtuu etätunnisteteknologian avulla logistiikkaketjun eri vaiheissa, jolloin pystytään seuraamaan esim. hakkuukoneen rungosta katkaisemien pölliin matkaa tuotantolaitokselle ja siitä edelleen saheiden matkaa asiakkaalle.

Metsävaratietoja voidaan päivittää puun tuotannon toimenpiteiden yhteydessä. Metsikön uudistamisen yhteydessä voidaan tallentaa metsävaratietokantaan istutettavien taimien sijainti, istutustiheys, puulaji ja mahdollisesti muita uudistusalaan kuvaavia tietoja. Taimikon hoidon, ensiharvennuksen ja myöhempien harvennuksien yhteydessä hyödynnetään ennakkotietoa puiden sijainnista. Hakkuun yhteydessä kerät-

tävää tietoa puiden ominaisuuksista voidaan käyttää mm. runkojen valinnassa ja runkojen laatuapteerauksessa.

Tällä hetkellä kiinnostus kohdistuu varsinkin erilaisten maastolasereiden, laser- ja digitaalitekniikkaan perustuvien mittalaitteiden, kuten laserkameran, sekä hakkuukoneeseen asennettavien konenäköön sekä lasertekniikkaan perustuvien antureiden ja mittalaitteiden kehittämiseen. Käytännön sovellukset vaativat mittauksen automatisointia niin, että puustotunnukset voidaan määrittää maastolaserkeilauksella syntyvästä pisteparvesta. Tällöin maastolaserkeilain voidaan asentaa esim. hakkuukoneeseen ja tiedon keruu voidaan automatisoida.

Kolmiulotteista pisteparvea tuottavien maastolaserkeilaimien osalta tulokset ovat olleet lupaavia, mutta ongelmana on vielä, että mittaukset täytyy osittain tehdä käsityönä. Maastolaserkeilaimien käyttöä rajoittaa myös niiden kalleus, mistä johtuen käytäntöön suuntautuvissa hankkeissa on vielä tois- taiseksi keskitytty yhteen tai useampaan kaksikulotteista aineistoa tuottavaan hinnaltaan huokeampaan laserkeilaimeseen.

Hakkuukone metsävaratiedon kerääjänä

Markkinahakkuiden puusta valtaosa, 75 %, mitataan hakkuukoneen mittalaitteella. Yksityismetsien pystykaupoissa osuus on 95 % ja hankintahakkuissa noin neljännes. Hakkuukone kaataa, karsii ja apteeraa rungot haluttuihin läpimitta- ja pituusosittaisiin. Jokaisesta kaadetusta rungosta on mahdollista tallentaa hakkuukoneen tiedonsiirto- ja ohjausjärjestelmään rungon läpimitat 10 cm välein, rungon käyttöosan pituus, viimeisen katkaisukohdan latvaläpimitta sekä runko- ja puulaji. Tiedot tehdyistä puutavaralajeista läpimitta-, pituus- ja tilavuustietoineen tallentuvat myös järjestelmään. Läpimitan mittaus tapahtuu puun runkoa myötäileviin karsintateriin tai syöttörulliin liitettyjen antureiden avulla. Pituus mitataan yleensä runkoa vasten pyörivän mittarullan avulla.

Hakkuukoneen mittalaite mittaa käsiteltävän rungon läpimittaa ja pituutta jatkuvasti karsinnan ja katkonnan aikana. Mittalaitteen toimivuutta ja tarkkuutta seurataan kalibrointi- ja tarkistusmittauksin. Pituusmittauksessa mittaerojen keskihajonnan

on todettu vaihtelevan hakkuukoneittain 1–4 cm:iin ja läpimitan mittauksessa 3–6 mm:iin. Pieni keskihajonta läpimitan ja pituuden mittauksessa kuvaavat mittalaitteen korkea mittaustarkkuuspotentiaalia. Mittaustarkkuuteen vaikuttaa myös oleellisesti kalibroinnin onnistuminen. Prosentin systemaattinen virhe pituusmittauksessa, johtaa 1 % :n tilavuusvirheeseen, kun taas vastaava virhe läpimitan mittauksessa, johtaa 2 % tilavuusvirheeseen. Huolellisesti kalibroidulla mittalaitteella saavutetaan menetelmällä 1–2 %:n eräkohtainen mittaustarkkuus.

Mittaustarkkuuden ohella hakkuukonemittauksen eduksi voidaan katsoa se, että mittaus tapahtuu reaaliaikaisesti, ja että mittaustuloksiin on mahdollista liittää sijaintitieto hakkuukoneissa olevien satelliittipaikannuslaitteiden avulla. Nykyisin Suomessa lähes kaikki hakkuukoneet on varustettu kartta- ja paikannusjärjestelmin, joiden avulla hakkuukoneen sijainti voidaan määrittää muutaman (2–3) metrin tarkkuudella.

Tällä hetkellä hakkuukoneella tuotettua tietoa hyödynnetään mm. hakkukoneen sijainnin määrittämiseen leimikolla sekä hakkuun edistymisen seurantaan, leimikolla sijaitsevan puutavaran sijainnin ja ajouratiedon tallentamiseen sekä näiden tietojen hyödyntämiseen kuormatraktorin ajoneuvosovelluksessa. Nykyjärjestelmät mahdollistavat myös poistumatietojen tallentamisen sekä erilaisten apteerauksissa hyödynnettävien runkopankkien keräämisen. Myös mittaustodistus tehdään hakkuukoneen tuotantotiedostojen perusteella.

Hakkuukoneella kerätyn metsävaratiedon (poistumatieto) hyödyntämisen kannalta olennaista on se, kuinka hyvin hakkuukoneella kerättyyn tietoon kattavasta puustosta on mahdollista liittää sijaintitieto. Satelliittipaikannuslaitteiden paikannustarkkuus peitteisessä maastossa on nykyisillä hakkuukoneissa olevilla paikannuslaitteilla riittävän tarkkaa keräämään tietoa kuviotason metsäsuunnitteluun. Mikäli halutaan yksityiskohtaisempaa, puu- tai koealatasen sijaintitietoa voitaisiin hakkuukoneet varustaa satelliittivastaanottimin, jotka pystyvät ottamaan vastaan VRS-korjausta (Virtual Reference Station) tai muita tarkentavia signaaleja. VRS-korjauksessa hyödynnetään maankattavaa virtuaalitusiasemaverkkoa, jonka avulla voidaan laskea vastaanottimen sijainti alle metrin tarkkuudella joko reaaliaikaisesti tai jälkikorjausta käyttäen. Koska tarkempien korjaussignaalien

käytössä on Suomessa ongelmia maataloudenkin automaattijolaitteiden yhteydessä katvealueilla, esimerkiksi metsänreunassa, voi tarkemman paikannuksen toimivuudessa olla puutteita liikkuvien metsäkoneidenkin yhteydessä. Paikannustekniikka kuitenkin kehitty nopeasti. Kun GPS-paikannus (Global Positioning System) pystytään yhdistämään EU:n Galileo- ja Venäjän Glonass paikannukseen, liikkuvan paikannuksen varmuus ja tarkkuus paranevat myös Suomen metsissä.

Laserkeilausaineistojen ja maastoaineistojen yhdistämisessä korostuu sekä koealamittausten tarkkuus ja tehokkuus, että koealojen paikannuksen tarkkuus. Yksittäisen hakkuukoneella tai maastokoealalta mitatun puun löytäminen ja tunnistaminen laser- tai ilmakuvulta vaatii, että koealan keskipisteen tulee olla paikannettu riittävällä tarkkuudella. Riittävä tarkkuus koealan sijainnille on laser- ja ilmakuvamateriaalia käytettäessä noin metrin luokkaa. Mikäli tunnetaan puiden suhteellinen sijainti toisiinsa nähden, onnistuu yhdistäminen koealan paikannusvirheen ollessa suurempikin. Tähän hakkuukoneella tuotettu runkotieto ja sen perusteella muodostettu koeala- ja kuviotieto luovat aivan uusia mahdollisuuksia.

Leimikon puustotiedot ajan tasalle hakkuun yhteydessä

Metsäsuunnittelu- ja metsävaratietojen päivitys on useiden vuosikymmenten ajan perustunut ilmauviin ja maastomittauksiin. Metsikkökuvioiden puustotiedot on kartoitettu 10 vuoden välein tehtävin maastoinventoinnein kuvioittaisena arviointina ja puuston kasvu on laskettu kasvumallien avulla. Tietojen jatkuvaa ajantasaistusta on hyödynnetty varsinkin metsäteollisuusyrityksissä päivittämällä tehdyt toimenpiteet metsävaratietokantoihin.

Metsäsuunnittelussa ollaan ottamassa käyttöön aluepohjaiseen laserkeilauksen ja ilmakuviin perustuvaa uuden sukupolven suunnittelujärjestelmää. Menetelmä vaatii tuekseen tarkkaa, paikkaan sidottua koealatietaa. Hakkuukoneiden tuottamaa tietoa metsikön rakenteesta ja puuston ominaisuuksista on hyödynnetty metsäsuunnittelussa ja metsävaratietojen päivityksessä varsin vähän. Myös erilaisten runkopankkien, joiden avulla pyritään optimoimaan

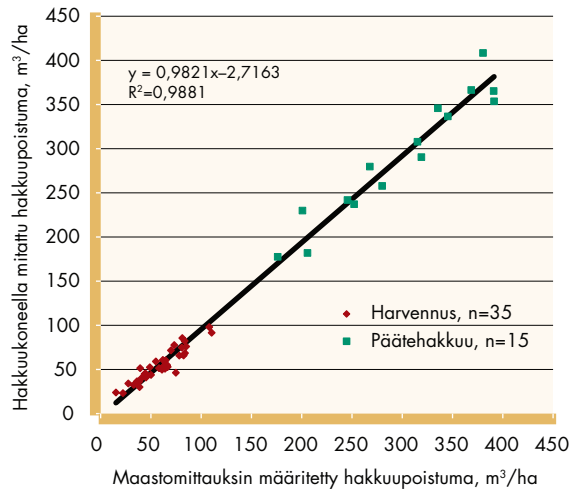
leimikolta saatavaa puutavarasaantoa, hyödyntäminen on jäänyt vähäiseksi.

Hakkuukoneilla voidaan kerätä tarkkaa kuvio- ja leimikkotason tietoa hakatusta puustosta. Tiedot tallentuvat rungoittain, mikä mahdollistaa puustotietojen laskennan yksittäisille halutun kokoisille koealoille tai leimikon osalle. Edellytyksenä koealojen muodostamiselle on, että hakkuukone pystyy tuottamaan puukartan leimikon puustosta. Mikäli yksityiskohtaista puukarttaa ei ole käytettävissä, voidaan poistumatietoa hyödyntää kuviotasolla.

Kuviotietojen päivitys hakkuukoneella voi perustua joko hakkuukoneen tiedonsiirto- ja ohjausjärjestelmän tuottamaan runkokohtaiseen tietoon poistettujen puiden läpimitta-, pituus- ja tilavuustiedoista tai hakkuun yhteydessä konenäön ja laserteknologian avulla tuotettuun puustokarttaan tai näiden yhdistelmään. Molemmilla menetelmillä on mahdollista määrittää poistettujen puiden runkolukusarja sekä leimikolta poistettujen puiden tilavuus. Konenäköön ja laserskannukseen perustuvat SLAM-algoritmit (Simultaneous Localization And Mapping) mahdollistavat puustokartan muodostamisen sekä hakkuuta edeltäneestä tilanteesta tietyin varauksin että hakkuun jälkeisestä jäljelle jäävästä puustosta. Hakkuun yhteydessä alikasvos tallaantuu ja alaoksat karsiutuvat, mikä parantaa puiden runkojen näkyvyyttä ja siten kartoitustulosta jo hakatun kuvion puolelta.

Hyödynnettäessä hakkuukoneella kerättyä koeala- tai kuviotason poistumatietoa leimikon puustotietojen ajantasaistuksessa voidaan poistumatieto yhdistää laserkeilauksella tuotettuun kuviotietoon myös kuviotasolla ja näin päivittää kuvion hakkuun jälkeiset puustotiedot ajan tasalle. Edellytyksenä on, että puuston kasvu otetaan huomioon, mikäli laserkeilauksesta on kulunut aikaa.

Hakkuukoneella kerätyn poistumatiedon hyödynnettävyyttä testattiin 50:llä harvennus- ja päättehakuuleimikoilta kerätyllä koealalla ($r=10$ m). Koealoille määritettiin puustotunnukset (tilavuus, pohjapinta-ala, pituus, läpimitta) laserkeilauksella ennen hakkuuta. Menetelmänä käytettiin sekä aluepohjaista k:n lähimmän naapurin menetelmää että yksittäisten puiden tunnistukseen perustuvaa menetelmää. Koealatietojen päivitys tapahtui vähentämällä laserkeilauksella arvioidusta koealan puuston tilavuudesta hakkuukoneella mitattu hak-



Kuva 1. Hakkuukoneella mitatun hakkuupoistuman ja maastomittauksin määritetyn hakkuupoistuman (m^3/ha), välinen korrelaatio harvennus- ja päätehakuissa. Hakkuukoneen mittaustietoihin on mallien avulla lisätty latvan tilavuus.

kuupoistuma. Tuloksia verrattiin koaloilta tehtyihin maastomittauksiin ennen ja jälkeen hakkuun.

Tutkimuksessa todettiin, että hakkuukoneella kerätyn poistumatiedon ja maastoreferenssitiedon välinen korrelaatio on hyvä (kuva 1). Hakkuupoistuma vaihteli koalasta riippuen, ollen harvennushakuissa keskimäärin $57,5 \text{ m}^3/\text{ha}$ hakkuukoneella ja $55,2 \text{ m}^3/\text{ha}$ maastomittausten perusteella ja päätehakuissa vastaavasti $302,8 \text{ m}^3/\text{ha}$ ja $292,1 \text{ m}^3/\text{ha}$. Koalatasolla poistuman tilavuuden hehtaarikohmainen keskivirhe oli harvennushakuissa $10 \text{ m}^3/\text{ha}$ (17 %) ja päätehakuissa $20 \text{ m}^3/\text{ha}$ (7 %). Päätehakuissa virhe vastaa yhden tukkipuun tilavuutta ($0,63 \text{ m}^3$) kymmenen metrin säteisellä koalalla.

Tilavuusarvioiden luotettavuutta tutkimuksessa tarkasteltiin avohakkuuleimikoista ($n = 15$) kerätyllä aineistolla. Hakkuukoneella mitatun hakkuupoistuman todettiin antavan noin 5 % aliarvion puuston kokonaistilavuudesta koalalla. Tämä on varsin loogista ottaen huomioon sen, että hakkuukone mittaa vain mitta- ja laatuvaatimuksiltaan täyttävän ainespuun. Laserkeilauksen aluepohjainen menetelmä antoi noin 3 %:n yliarvion puuston tilavuudesta ja yksittäisten puiden tulkintaan perustuva menetelmä noin 6,5 % aliarvion puuston tilavuudesta. Laser-

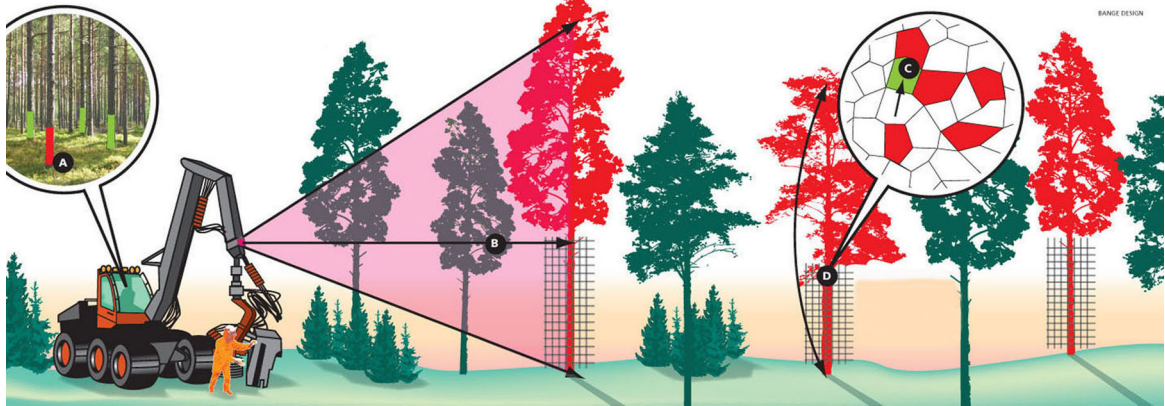
keilauksella määritetyn leimikon tilavuusestimaatin tarkkuus (RMSE) oli 20 % luokkaa.

Hakkuukoneen tuottamaan poistumatietoon ja laserkeilauksen perustuvan päivitysmenetelmän tarkkuus riippuu olennaisesti laserkeilausmenetelmän tarkkuudesta. Tähän vaikuttavat puolestaan laserkeilauksen ajankohta, laserkeilauksessa käytetty pulssitiheys ja laskentamenetelmä sekä millainen opetusaineisto (maastokoealat) inventoitavalla alueella on käytettävissä. Menetelmän luotettavuutta voidaan parantaa kehittämällä ja tarkentamalla laserkeilauksen menetelmiä aluepohjaisista menetelmistä yhä tarkempiin yksittäisten puiden tunnistamiseen perustuviin menetelmiin. Tällöin tietojen yhdistämisessä voidaan siirtyä koala- ja kuviotasolta yksittäisten puiden tasolle etsimällä laserkeilausaineistosta ja hakkuukoneella kartoitetusta aineistosta vastinpuut. Tiedot on mahdollista yhdistää puiden sijaintitietojen avulla. Puiden pituus voitaisiin tällöin mitata esim. laserkeilausaineistosta tai käyttää hakkuukoneen mittalaitteen mittaaman rungon käyttöosan pituutta. Vastaavasti tilavuus sekä läpimittatiedot saataisiin hakkuukoneen tuottamasta tarkasta runkokohtaisesta mittaustiedosta. Tietoja voidaan hyödyntää sekä kuviotietojen päivytyksessä että kaukokartoituksessa tarvittavien maastokoealojen muodostamisessa. Tietojen yhdistämisen etuina on, että menetelmä mahdollistaisi osittain kalliista maastomittauksista luopumisen, kun menetelmien kalibrointiin tarvittavat tiedot puiden pituudesta saadaan suoraan laserkeilausaineistosta ja rungoittainen tilavuus mitattuna hakkuukoneelta. Mittaustiedon keruu tapahtuu hakkuiden yhteydessä, joten menetelmä olisi kustannustehokas, mittausta tapahtuisi reaaliajassa ja tiedot on mahdollista viedä suoraan yhtiöiden metsäsuunnittelujärjestelmiin.

Hakkuukoneen tuottaman tiedon hyödyntäminen lähikuljetuksessa ja leimikon kuviorajojen päivytyksessä

Nykyiset hakkuukoneissa olevat kartta- ja paikannusjärjestelmät mahdollistavat hakkuukoneen ajourien tallentamisen järjestelmään. Myös puutaralajien sijainti leimikolla sekä varastopaikat on mahdollista tallentaa ja siirtää leimikkokarttana ajokoneelle. Tietoja voidaan hyödyntää mm. lähikul-

Forestrix- ja metrix-projekteissa tehostetaan metsähakkuukoneiden käyttöä aistinjärjestelmien ja automaation yhteispuolilla.



Kuva 2. Laserkeilaimen, konenäön ja paikannuksen yhteiskäyttö puiden mittauksessa ja koneen ohjauksessa. A. Hakkuukoneen konenäkö kuvaa puita, joiden piirteitä tutkimalla järjestelmä etsii oikeat puulajit. B. Yhdistämällä konenäön kuvaamaa mittausaineistoa hakkuukoneen laserskannerin paikka- ja läpimittauksiin saadaan muodostettua paikkakohtainen puukartta. C. Paikkakohtaiset puutiedot yhdistetään gps:n avulla varsinaisiin karttakoordinaatteihin. Tulevaisuudessa kuljettaja voi valita kaadettavat puut karttanäytöltä. D. Myöhemmässä vaiheessa vielä pystyssä oleva puu voidaan mitata, puu katkoa optimaaliseksi polleiksi ja samalla kerätä puun laatutiedot tietokantaan. Kuva: © Tekniikka ja talous 9.9.2008, Bange Design, Peter Bange.

jetuksen suunnittelussa. Nykyisten hakkuukoneiden satelliittipaikannuslaitteiden tarkkuus on kuitenkin vain muutaman metrin luokkaa. Virhe ilmenee hankalana, ajan mukaan muuttavana, bias-tyyppisenä virheenä, joka vielä vaeltaa puolelta toiselle.

Kuvioiden rajat on perinteisesti määritetty ilmakuvilta. Mikäli hakkuun yhteydessä voidaan tuottaa puukartta leimikosta, on myös kuvioiden rajat helposti määritettävissä ja päivitettävissä paikkatieto-ohjelmien avulla. Leimikon pinta-ala pystytään määrittämään myös pelkän hakkuukoneen sijaintitiedon perusteella varsin luotettavasti. Pinta-alatietoa tarvitaan etenkin kuvioilla tehtävien toimenpiteiden, kuten esim. metsänviljelypinta-alan ja muiden metsänhoitotoimenpiteiden työmäärien laskennassa.

Mittausteknologian kehittäminen ja automatisointi hakkuukoneessa

Tulevaisuudessa hakkuukonemittauksessa tavoitteena on siirtyä puuta koskemattomaan mittaukseen. Keskeisenä tavoitteena hakkuukonemittauksen kehittämisessä on, että jo puun kaatovaiheesta alkaen

mitattaisiin nykyistä tarkemmin rungon pituus- ja läpimittatietoja ja laatutunnuksia, joita hyödynnettäisiin katkonnan ohjauksessa ja pölkkyjakaumien hallinnassa asiakastarpeita vastaavien pituus-, läpimitta- ja laatuyhdistelmien saavuttamiseksi. Tällöin hakkuukoneella kertaalleen tuotettuja pölkkykohtaisia tietoja voitaisiin hyödyntää myös läpi koko logistisen hankintaketjun ja lisätä erityisesti puuraaka-aineen laatutietoa yhdistämällä mittaus tietoon hakkuukohdetta koskevaa muuta tietoa, kuten esim. tietoa puiden alkuperästä, iästä, luston paksuudesta ja helposti havaittavista laatuominaisuuksista. Kehitteillä on myös menetelmiä rungon automaattiseen apteraukseen sekä hakkuukoneen puoliauomaattiseen ohjaukseen.

Metsäkoneen aistinjärjestelmä -hankkeessa (Forestrix 2005–2008) on kehitetty Teknillisen korkeakoulun ja Metsäntutkimuslaitoksen yhteistyönä laserskannaukseen, konenäköön, inertiamittauksiin sekä satelliittipaikannukseen perustuvaa metsäkoneen aistinjärjestelmää, jonka avulla voidaan määrittää puiden sijainti, läpimitta ja puulaji sekä muodostaa puukartta hakattavasta leimikosta. Hankkeessa on kehitetty laskentarutiinit puiden samanaikaiselle paikannukselle ja kartoitukselle (SLAM, Simulta-

neous Localization And Mapping). Hankkeessa kehitettyjä menetelmiä tullaan käyttämään kuljettajan opastamiseen, harvennusjäljen kuvaamiseen sekä myöhemmin koneen puoliautomaattiseen ohjaamiseen. Liikkeiden automatisointi edellyttää puomin instrumentointia, mitä kellään hakkuukonevalmistajalla ei ole vielä kaupallisesti tarjolla. Tavoitteena on luoda ensivaiheessa tukijärjestelmä, jonka avulla hakkuukoneen kuljettajan on helppo seurata mm. oikean harvennustiheyden saavuttamista (kuva 2). Menetelmä mahdollistaa jäljelle jäävän puuston kartoituksen. Hakatun alueen puustokartan avulla voidaan päivittää kuvion puustotiedot metsätietojärjestelmässä.

Hakkuukoneen mittaustekniikan kehittäminen -hankkeessa (Metrix 2007–2009) on puolestaan kehitetty Teknillisen korkeakoulun, Tampereen teknillisen yliopiston sekä VTT:n yhteistyönä konenäköön ja laserteknologiaan perustuvaa puun pituuden, läpimitan ja laadun mittausta tavoitteena puuta koskevat hakkuukonemittaus. Toisena keskeisenä tavoitteena Metrix-hankkeessa on kehittää hakkuukoneen mittausrjestelmä, joka mahdollistaa rungon automaattisen apteerauksen. Apteerauksen perustana on edelleen nykyinen tilastomatematiikka, mutta kun rungon muoto, viat sekä laatutekijät kyetään havainnoimaan, voidaan ne ottaa automaattisesti huomioon katkonnassa.

Hankkeessa on testattu mm. vaihtoehtoisia menetelmiä puun mittaamiseen puuta lähestyttäessä. Laserteknologiaa käytettäessä puu voidaan nopeimmillaan mitata 1–2 sekunnissa. Mittaustarkkuuden saavuttamiseksi tarvitaan kuitenkin useampi peräkkäinen mitta. Myös liikenäköön ja stereonäköön perustuvia menetelmiä puun mittaauksessa on testattu. Automaattisessa apteerauksessa on kyettävä mittaamaan ja laskemaan käsiteltävän puun runkomuoto sekä puun laatusuureita, kuten oksaisuus (oksien lukumäärä, paksuus, laatu, oksavyöhykkeiden rajat) sekä rungon vauriot (mutkat, lenkous, laho).

Kehitettävässä menetelmässä hakkuupäähän asennettavien kameroiden avulla saadaan tietoa käsiteltävän rungon ominaisuuksista ja laadusta. Rungon läpimitta voidaan määrittää konenäköön tai laserskannereihin perustuen lähestyttäessä runkoa ja tarkentaa rungon käsittelyn yhteydessä. Käsittelyn yhteydessä rungon läpimitan määrittäminen tapahtuu käsiteltävän pölyn tyvestä samassa yhteydessä kuin rungon laadun

(laho) määrittäminen. Pölyn pituuden laskenta perustuu rungon siirtymän määrittämiseen kuvasarjan perusteella. Myös puulajin automaattiseen tunnistamiseen sekä vuosilustojen, kuorettoman läpimitan ja laadun (laho, lyly) määrittämiseen on kehitetty menetelmiä mm. Tampereen teknillisessä yliopistossa.

Mittaustiedon hallinta ja tallennus

Hakkuukoneen mittaustietojen tallennus ja hallinta on nykyisin suurelta osin standardoitua. Hakkuukoneen tiedonsiirtostandardi (StanForD 2009) on määritellyt jo 20 vuoden ajan, missä muodossa ja mitä tietoja hakkuukoneen mittalaite tallentaa. Kehitystyö tiedonsiirron osalta on jatkuvaa. Tulevaisuudessa tavoitteena on XML-pohjainen (eXtensible Markup Language) metsäkoneiden tiedonsiirtostandardi, jonka avulla pyritään parantamaan metsäkoneiden ohjaus- ja mittausrjestelmien tietoteknistä avoimuutta ja yhteensopivuutta muiden osapuolien tietojärjestelmien ja sovellusten kanssa. Uudistuksella tavoitellaan myös sitä, että kynnys uusien käyttösovellusten tekemiseksi madaltuisi ja että koneyritykset voisivat olla tulevaisuudessa nykyistä riippumattomampia metsäyhtiöiden tietojärjestelmistä.

Toinen tärkeä näkökulma sen ohella, mitä tietoja tallennetaan, on miten ja mihin tiedot tallennetaan, jotta ne olisivat mahdollisimman helposti hyödynnettävissä läpi koko logistiikkaketjun. Nykyinen käytössä oleva teknologia tarjoaa mahdollisuuden mittaustietojen (tuotantotiedot) lähettämiseen yhtiön metsäjärjestelmään, mutta kertaalleen metsässä hakkuukoneella mitattuja puun tietoja ei hyödynnetä ja -lostusprosessissa, vaan jokainen tukki mitataan laatuokituksen yhteydessä sahalla uudestaan. Mikäli mittaustiedot ja laatu voitaisiin todeta ja tallentaa jo hakkuun yhteydessä jokaiseen tukkiin, säästyttäisiin tukkien uudelleen mittaaukselta.

Tähän ongelmaan on etsitty ratkaisua hakkuukoneen mittaustiedon hallintaan liittyvissä hankkeissa, joissa on selvitetty mitta- ja laatu-tiedon tallentamista etälukutekniikkaan perustuvien tunnistaiden avulla (RFID, Radio frequency identification). Tavoitteena hankkeissa on ollut selvittää RFID- ja muiden etälukutekniikoiden käyttöä mittaustiedon välityksessä sekä tutkia erilaisia kiinnitystekniikoita. Tulevaisuudessa tavoitteena on, että

etäluettavien tunnistajien avulla voidaan merkitä hakkuun yhteydessä tukit yksikäsitteisillä riittävän edullisilla tunnistajilla, jotka eivät häiritse puun jalostamisprosesseja. Ensimmäiset merkittävät puutavaralogistiikan RFID-sovellukset tällä alueella on toteutettu ajoneuvotunnistuksessa.

Teknologian tuomat mahdollisuudet ja hyödyt

Tulevaisuudessa hakkuukoneella kerättyä mittaustietoa on mahdollista hyödyntää metsävaratietojen päivityksessä metsäyhtiöiden järjestelmiin sekä metsänomistajan metsäsuunnitelmaan, metsikkökuvioittain tapahtuvaan poistumatiedon tallentamiseen (metsikön käsittelyhistoria, puuntuotos) sekä kuviorajojen päivitykseen hakkuukoneella tuotetun leimikon puukartan perusteella. Myös hakkuukoneella kerätyn aineiston hyödyntäminen kaukokartoituksessa ja laserkeilauksessa tulee lisääntymään, etenkin kaukokartoituksessa käytettävien opetuskoelajien ja referenssiaineistojen muodostaminen tulee helpottamaan hakkuukoneen tuottaman puukartan myötä. Mittausteknologian kehittyminen mahdollistaa myös kasvupaikkapotentialin määrittämisen hakkuukoneelta saatavan pituus- ja ikätiedon perusteella sekä lahon tunnistamisen kaatosahauksesta. Tallennusmenetelmien kehittyminen puolestaan mahdollistaa mittaustietojen hyödyntämisen laajalaisemmin logistiikkaketjun eri vaiheissa.

Uuden teknologian käyttöönotto ja leviäminen laajamittaiseen käyttöön voi viedä aikaa. Ensimmäiset prototyytit konenäköön ja laserkeilaukseen perustuvista hakkuukoneeseen asennettavista mittalaitteista ovat jo olemassa. Paljon tutkimusta on käynnissä myös maastolasereihin (TLS) liittyen. Toistaiseksi ne ovat olleet kuitenkin liian kalliita operatiivisen toimintaan. Kuitenkin on olemassa kehittyneitä algoritmeja, joiden avulla laserkeilaimen tuottamasta pisteparvesta voidaan määrittää inventoinnin kannalta oleelliset koelan tunnuksot nopeasti ja tehokkaasti. Esimerkiksi TKK:lla on kehitetty algoritmeja, joilla voidaan yhdistää useampia sopivasti päällekkäisiä 3D-skannauksia. Mittausta varten on kuitenkin mentävä erikseen maastoon. Nopeimmin käytäntöön vietävät sovellukset voidaankin nähdä liittyvän hakkuukoneiden aistinjärjestelmiin

ja automatisointiin. Näissä puustomittaukset saadaan hakkuutyön kylkiäisenä. Myös etäluettavien tunnistajien hyödyntäminen mittaustiedon välityksessä tulee yleistymään.

Kirjallisuus

- Miettinen, M., Öhman, M., Visala, A. & Forsman, P. 2007. Simultaneous localization and mapping for forest harvesters, in Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Rooma April 2007, 2007, s. 517–522.
- Rasinmäki, J. & Melkas, T. 2005. A method for estimating tree composition and volume using harvester data. *Scandinavian Journal of Forest Research* 20: 85–95.
- Melkas, T., Vastaranta, M. & Holopainen, M., 2008. Accuracy and efficiency of the laser camera. Teoksessa: Hill, R., Rossette, J. & Suárez, J. (toim.). 2008. *Silvilaser 2008 proceedings*, s. 315–324.
- Melkas, T., Vastaranta, M., Haapanen, R., Holopainen, M., Yu, X., Hyypä, J. & Hyypä H. 2009. Updating forest resource data by using ALS measurements and information collected with a harvester *Silvilaser 2009 proceedings*, s. 128–136. Texas A&M University, 14–16 October 2009.
- Öhman, M., Miettinen, M., Kannas, K., Jutila, J., Visala, A. & Forsman, P. 2008. Tree Measurement and Simultaneous Localization and Mapping System for Forest Harvesters. Teoksessa: Laugier, C. & Siegwart, R. (toim.). 2008. *Field and Service Robotics*. Springer, Berlin, s. 368–378.
- Österberg, P. 2009. Wood quality and geometry measurements based on cross section images. Väitöskirja. Tampereen teknillinen yliopisto. Julkaisu nro 807. ISBN 978-952-15-2151-5. 192 s.

■ MMM Timo Melkas, Metsäteho Oy; prof. Arto Visala, Automaatio- ja systeemitekniikan laitos, Teknillinen korkeakoulu. Sähköposti timo.melkas@metsateho.fi, arto.visala@tkk.fi