

Metsäkoneiden aistinjärjestelmä, puuston kartoittaminen ja puoliautomaattinen ohjaus – FORESTRIX

Jari Ala-Ilomäki, Jani Heikkilä, Jaakko Jutila, Jouni Pykäläinen ja Kalle Ylisirniö

Metlan työraportteja / Working Papers of the Finnish Forest Research Institute -sarjassa julkaistaan tutkimusten ennakkotuloksia ja ennakkotulosten luonteisia selvityksiä. Sarjassa voidaan julkaista myös esitelmiä ja kokouskoosteita yms.

Sarjassa ei käytetä tieteellistä tarkastusmenettelyä. Kirjoitukset luokitellaan Metlan julkaisuominnassa samaan ryhmään monisteiden kanssa.

Sarjan julkaisut ovat saatavissa pdf-muodossa sarjan Internet-sivuilta.

<http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/>
ISSN 1795-150X

Toimitus

PL 18
01301 Vantaa
puh. 010 2111
faksi 010 211 2101
sähköposti julkaisutoimitus@metla.fi

Julkaisija

Metsäntutkimuslaitos
PL 18
01301 Vantaa
puh. 010 2111
faksi 010 211 2101
sähköposti info@metla.fi
<http://www.metla.fi/>

Tekijät Ala-Ilomäki, Jari, Heikkilä, Jani, Pykäläinen, Jouni, Jutila, Jaakko & Ylisirniö, Kalle			
Nimeke Metsäkoneiden aistinjärjestelmä, puuston kartoittaminen ja puoliautomaattinen ohjaus - FORESTRIX			
Vuosi 2008	Sivumäärä 51	ISBN 978-951-40-2141-1 (PDF)	ISSN 1795-150X
Yksikkö / Tutkimusohjelma / Hankkeet Vantaan toimintayksikkö / 7193 Metsäkoneiden aistinjärjestelmä, puuston kartoittaminen ja puoliautomaattinen ohjaus			
Hyväksynyt Jari Varjo, Vantaan toimintayksikön johtaja, 5.12.2008			
Tiivistelmä FORESTRIX-hankkeessa tutkittiin metsäkoneiden keinokeinoista aistinvaraista ohjausta. Aiheeseen perehdyttiin rakentamalla mittausalusta laitteineen Honda-maastomönkijän alustalle. Mittauslaitteina toimivat paikantamis-, liike- ja lasermittalaitteet. Laitteilla pyrittiin selvittämään tietoja ajoneuvon paikasta ja ympärillä olevasta puustosta. Puustoa mitattiin tarkemmin sekä 2D- että 3D-lasertutkilla. Lasertutkilla saatiin luotua operatiivinen ajossa päivittyvä puukartta. Karttaa voidaan käyttää kuljettajan ohjaamiseen hakkuutyössä ja metsäkoneiden automaatiotason kehittämisessä. Lasertutkien ja paikannuksen tulokset vaihtelivat metsän vaikeuden mukaan. Helpoissa vähäoksaisissa mäntykohteissa operatiivinen puukartta toimi hyvin. Vaikeammassa kohteissa puuston oksaisuus oli suurin mittauksista heikentävä tekijä. Hankkeessa kokeiltiin myös konenäön mahdollisuuksia puiden läpimitan mittauksessa ja puukartan luomisessa. Tuloksena havaittiin, että monimuotoinen metsä ja puusto ovat vielä liian vaikea kohde konenäön hyödyntämiselle.			
Asiasanat aistinvaraisuus, laserskanneri, automaatio, paikannus, konenäkö, puukartta, kartoitus			
Julkaisun verkko-osoite http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2008/mwp102.htm			
Tämä julkaisu korvaa julkaisun			
Tämä julkaisu on korvattu julkaisulla			
Yhteydenotot Jari Ala-Ilomäki, PL 18, 01301 Vantaa. Sähköposti jari.ala-ilomaki@metla.fi			
Muita tietoja Kalle Ylisirniö. Sähköposti kalle.ylisirnio@metla.fi Julkaisun taitto: Maija Heino Kuvien käsittely: Essi Puranen ja Maija Heino			

Sisällys

1 Johdanto	7
1.1 Lähtökohta.....	7
1.2 Hankkeen kuvaus.....	8
1.2.1 Yhteistyökumppani ja rahoittajat	8
1.3 Hankkeen tavoitteet	8
2 Hankkeen alkuselvytys	9
2.1 Metsävaratiedon tuottaminen ja ylläpito yksityismetsien metsäsuunnittelussa	9
2.1.1 Tausta.....	9
2.1.2 Nykytilanne	9
2.1.3 Kehittämistarpeita.....	10
2.1.4 FORESTRIX-hanke ja metsäsuunnittelun kehittäminen.....	10
2.2 GPS:n käyttö puunkorjuussa	10
2.2.1 Taustaa	10
2.2.2 Metsäkoneiden GPS-laitteiden ominaisuudet.....	11
2.2.3 GPS-laitteiden nykyiset käyttötavat puunkorjuussa	11
2.2.4 GPS-laitteiden tutkittuja ja mahdollisia käyttötapoja puunkorjuussa.....	11
2.3 Laserskannaus puuston mittauksessa	12
2.4 Laserskannereiden ja konenäön mahdolliset metsäkonesovellukset	13
2.4.1 Taustaa	13
2.4.2 Laserskannauksen ja konenäön sovelluksia.....	13
2.4.3 Laserskannauksen ja konenäön mahdolliset metsäkonesovellukset.....	14
2.4.4 Anturit ja sensorifuusio	14
3 Tekninen aistinvaraisuus ja aistinvarainen paikannus	15
4 Puukartta	16
5 Aistinvaraisen mittausjärjestelmän hyödyntämismahdollisuuksia metsätaloudessa	17
6 Metsäkoneen puoli- ja täysautomaattinen ohjaus	19
7 Järjestelmälle asetettava tarkkuusvaatimus	20
8 Mittausmenetelmät ja -laitteisto	24
8.1 Yleistä.....	24
8.2 Laserskannaus.....	24
8.3 Kvantulkinta	26
8.4 Paikannus.....	26
8.4.1 Odometria.....	26
8.4.2 Inertiayksikkö	27
8.4.3 GPS-laitteet.....	28
8.5 Mittausalusta.....	29
9 Mittaustiedon kerääminen	30
9.1 Kokeet mönkijällä.....	30
9.2 Kokeet harvesterilla	30
10 Mittaustulokset ja niiden tarkastelu	31
10.1 2D-laser.....	31
10.1.1 Laserskannerin kuvan validointi.....	32
10.1.2 Reunapistemenetelmä.....	35
10.1.3 Pienimmän neliösumman menetelmä.....	36

10.2 3D-laser.....	37
10.3 Kuvantulkinta.....	37
10.4 Paikannus	39
11 Järjestelmän toimivuus vaihtelevissa metsikköoloissa ja mittavirheiden lähteet	40
11.1 2D-laserin toimivuus ja virhelähteet	40
11.2 3D-skannerin toimivuus ja virhelähteet.....	43
11.3 Järjestelmän suorituskyky suhteessa asetettuun tarkkuusvaatimukseen	44
12 Puukartan käyttöliittymä	45
13 Hankkeen tavoitteiden toteutuminen	47
13.1 Tavoite ja toteutuma.....	47
13.2 Yhteenveto	47
14 Lisätutkimustarve	48
Kirjallisuus	49

Asiasanoja ja lyhenteitä

2D-laserskanneri	Optinen anturi, jonka toiminta perustuu lähetetyn valonsäteen palautumiseen kohteesta siitä heijastuttuaan ja siihen kuluvaan ajan mittaamiseen. 2D-laserskanneri keilaa vain vaakasuoraa akselia.
3D-laserskanneri	2D-laserskanneri lisättyä pystysuoralla pyyhkäisytyiedolla.
DGPS	Differentiaali-GPS (Differential Global Positioning System), maastossa tunnetun pisteen avulla kolmiomittauksella korjattu GPS-tieto.
Eulerin kulmat	Kolme kulmaa, joiden avulla voidaan kuvata mikä tahansa orientaatio 3-ulotteisessa avaruudessa. Kukin kulma kuvaa kierron tietyn avaruuden akselin ympäri.
GPS	Satelliittipaikannus (Global Positioning System)
IMU	Inertiayksikkö, asennontunnistin (Inertial Measurement Unit)
Kalman-suodatin	Digitaalinen suodin, joka kykenee estimoimaan dynaamisen järjestelmän tilaa aikaisempien mittaustulosten perusteella, vaikka nämä olisivat epätasaisia ja sisältäisivät kohinaa.
Kartesinen koordinaatisto	Suorakulmainen koordinaatisto, jossa on ulottuvuuksien mukainen määrä akseleita, jotka on nimetty kuvaamansa ulottuvuuden mukaan. Akselit ovat toisiaan vastaan kohtisuorassa, ja ne kulkevat koordinaatiston nollapisteen eli origon kautta sekä leikkaavat toisensa siinä.
Kulmaresoluutio	Määrittää kahden vierekkäisen lasersäteen välisen kulmaerotuksen. Kulmaresoluutio voi olla erisuuruinen pysty- ja vaakasuunnissa. Kulmaresoluution tuottama erotuskyky määrää, kuinka yksityiskohtaisia havaintoja kohteen pisteistä saadaan.
Kuvantunnistus	Hahmojen koneellista tunnistamista digitaalisesta kuvatiedosta
Lasertutka	Katso: 2D- ja 3D-laserskanneri
Merkintälasku	Paikannusta vanhan paikkatiedon avulla, kun kuljettu matka ja suunta tiedetään. (Dead-reckoning)
Odometria	Sijainnin määrittäytapa, jossa hyödynnetään takaisinkytkentää liikkeen havaitsevalta anturilta.
Puukartta	Puiden paikan kuvaus tasokoordinaatistossa
RFID	Menetelmä tiedon etälukuun ja -tallentamiseen käyttäen RFID-tunnisteita (Radio Frequency IDentification). Tunnetaan Suomessa myös nimellä saattomuisti.
Sensorifuusio	Eri mittalaitteiden samanaikaisesti tuottamaa informaation yhdistäminen sovelluksen kannalta mielekkääksi ja informaation sisällöltään suuremmaksi kokonaisuudeksi.
SLAM	Samanaikaisesti tapahtuva paikannus ja kartoitus. (Simultaneous Localization And Mapping)
Voronoi-diagrammi	Geometrinen työväline, joka jakaa pistejoukon alueen soluihin, siten että soluja on yksi jokaista joukon pistettä kohden. Voronoi-soluun kuuluvat ne alueet, jotka ovat lähempänä kyseistä pistettä kuin mitään toista joukon pistettä.

1 Johdanto

1.1 Lähtökohta

Tämän päivän hakkuukoneet ovat tehokkaita, mutta myös kalliita koneita. Korkea hinta asettaa suuret vaatimukset koneiden tuottavuudelle. Toisaalta harvennushakkuissa poistettavien puiden valinta, siten että kasvamaan jäävät parhaat puuyksilöt sopivassa tiheydessä, on erittäin tärkeää. Työssään hakkuukoneen kuljettaja joutuu tekemään useita päätöksiä lyhyessä ajassa. Päätöksenteon helpottamiseksi on pyritty kehittämään erilaisia teknisiä apulaitteita ja järjestelmiä. Aistinjärjestelmät ovat esimerkkejä tällaisista järjestelmistä. Aistinjärjestelmät voivat koostuvat antureista, radio- ja satelliittipaikantimista sekä erilaisista ääni- ja valoskannereista.

Metsäsektorilla aistinvaraista arviointia on aikaisemmin käytetty lähinnä metsänarvioinnin tutkimusten yhteydessä. Näissä kaukokartoituksen piiriin kuuluvissa tutkimuksissa metsää mitataan yleensä lentokoneeseen tai helikopteriin asennetulla 3D-skannerilla, jolla pystytään muodostamaan syvyyskuva metsästä. Näistä lasermittauksista ei kuitenkaan vielä ole pystytty laskemaan metsäkoneiden ohjauksessa tarvittavaa riittävän tarkkaa tietoa puiden paikasta ja läpimitasta. Tarvetta tällaiselle tiedolle kuitenkin olisi.

Aistinjärjestelmät helpottaisivat metsäkoneiden toimintojen automatisointia. Osa koneiden toimintoista on jo kyetty automatisoimaan. Erityisesti puun katkonnan ja voimansiirron toimintojen osalta automaatiotasossa on edistytty. Tiedot kuormaimen liikeradat, kuten paralleellisiirto, voidaan optimoida ohjelmallisesti kuljettajan sitä tietämättä. Lisäksi esimerkiksi yksioteharvesteilla tehtävässä pölkyn tilavuuden ja kuormainvaakaan perustuvassa puun massan mittauksessa itse mittaustapahtuma on täysin automatisoitu, eikä kuljettajan tarvitse erikseen huolehtia tietojen tallentamisesta. Edellisten lisäksi myös paikantamiseen ja tiedonsiirtoon liittyviä toimintoja halutaan toteuttaa kuljettajasta riippumattomasti.

Puunhankinnan tarpeisiin on myös kehitetty lukuisia joukko digitaaliseen kuvatulkintaan ja hahmontunnistukseen perustuvia menetelmiä. Järjestelmät voivat käyttää lähtöaineistoinaan esimerkiksi ilma- tai satelliittikuvia (näkyvä aallonpituusalue ja sitä lähellä olevat taajuudet) sekä skannerikuvia. Erityisesti terminaaleissa tapahtuvaan puutavaran mittaukseen on kehitetty erityyppisiä laserskannaukseen perustuvia menetelmiä, joilla puiden dimensioita ja laatua voidaan estimoida.

Metsäkoneeseen liitettynä aistinvaraista järjestelmää voitaisiin käyttää puustokartan luomisessa ja puuston tilajärjestyksen selvittämisessä. Jos metsästä olisi käytettävissä digitaalisen peruskarttaan yhdistettynä riittävän tarkka puukartta, sen avulla voitaisiin suunnitella hakkuun yksityiskohdat nykyistä tarkemmin. Puukartan tulisi sisältää tiedot puiden paikasta, puulajista sekä rungon läpimitasta.

Hakkuun yhteydessä päivittyvän puukartan tietojen perusteella hakkuutuloksen arviointi olisi nopeaa ja helppoa. Edelleen, jos tarkan reaaliaikaisesti päivitettävän puukartan tietojen perusteella olisi mahdollista hakata osin automaattisesti poistettavat puut, metsäkoneen kuljettajien jatkuvaa tarkkuutta ja valppautta vaativaa työtä saataisiin osittain automatisoitua.

1.2 Hankkeen kuvaus

Hankkeessa tutkittiin, kehitettiin ja testattiin uusia metsäkoneisiin sopivia puustonmittaus- ja havainnointitekniikoita. Mittaus- ja havaintotekniikoiksi kehitettiin uusia aistintekniikoita ja signaalikäsittelymenetelmiä sekä mitattuun puutietoon perustuvia puoliautomaattisia ohjausalgoritmeja. Erityisesti tutkimuksessa keskityttiin laserskannereiden ja konenäön sovellutusten mahdollisiin hyödyntämispotentiaaleihin metsäkonekäytössä.

Laserin ja kuvantunnistuksen avulla laadittiin reaaliaikainen digitaalinen puukartta, jota voidaan hyödyntää monin tavoin hakkuutapahtumassa. Kartta voi toimia kuljettajan tukena hakattavien puiden valinnassa ja sopivan harvennustiheyden saavuttamisessa. Luodun puukartan avulla voidaan tutkia myös hakkuujälkeä ja suunnitella metsän myöhempää käyttöä. Tulevaisuudessa puukarttaa on mahdollista hyödyntämään metsäkoneen ohjauksen osittaisessa- tai täysautomatisoinnissa.

1.2.1 Yhteistyökumppani ja rahoittajat

Hanke toteutettiin yhteistyössä Teknillisen korkeakoulun (TKK) Automaatiotekniikan Laboratorion kanssa. TKK:n osuutena oli rakentaa mittauslaitteisto ja suorittaa mittaukset. Metsätutkimuslaitos (METLA) toimitti hankkeeseen sopivat leimikot ja niihin liittyvät mittatiedon sekä teki laitteiston soveltuvuus-, virhe- ja kannattavuusanalyysjä. Hankkeen rahoittajana toimivat Teknologian kehittämiskeskus (TEKES) ja yritykset Metsäliitto, Stora-Enso Oyj, UPM-Kymmene Oyj, Mitron Oy ja Ponsse Oyj.

1.3 Hankkeen tavoitteet

Hankkeen tavoitteet olivat:

1. Tutkia metsäkoneiden yhteydessä käytettäviä puiden ja metsän mittaus- ja havainnointitekniikoita ja -menetelmiä,
2. Etsiä mallinnustapoja, joilla mittauksista laskettu puiden paikka- ja dimensiotieto pystytään tallentamaan puukartaksi, yleisen digitaalisen karttatiedon hyödyntäminen sekä tarkka paikannus metsässä,
3. Rakentaa puukarttaan perustuvia menetelmiä avustamaan kuljettajaa poistettavien puiden valinnassa.
4. Metsäkoneiden automaattisen ohjauksen kehittäminen.

2 Hankkeen alkuselvytys

2.1 Metsävaratiedon tuottaminen ja ylläpito yksityismetsien metsäsuunnittelussa

2.1.1 Tausta

Suomalaisella yksityismetsien metsäsuunnittelulla tarkoitetaan useimmiten kokonaisuutta, johon kuuluvat: metsäkeskusten tekemä alueellinen metsien inventointi (noin 1 000 000 ha/vuosi) toimenpide-ehdotuksineen, metsävaratietokannan ylläpito, metsätiedon välittäminen maanomistajan luvalla muille organisaatioille sekä tilakohtaisten suunnitelmaraporttien koostaminen inventointitietojen ja useimmiten metsäammattilaisen valitsemien toimenpide-ehdotusten pohjalta. Tilakohtainen metsäsuunnitelma on standardimuotoinen dokumentti, joka sisältää mm. metsän nykytilan, toimenpide-ehdotukset ja niitä vastaavat kehityssuunnitteet. Tilakohtaisia suunnitelmia tekevät metsäkeskusten lisäksi myös metsänhoitoyhdistykset ja yksityisyrittäjät.

Alueellinen inventointi tuottaa Solmu-tietokannan, josta tiedot voidaan siirtää metsänomistajan luvalla ns. irrottamiskustannuksella myös muille toimijoille. Tieto voidaan siirtää paikalliselle metsänhoitoyhdistykselle ilman omistajan lupaakin, jos omistaja ei ole tilannut suunnitelmaa, mutta kuuluu paikalliseen metsänhoitoyhdistykseen. Lisäksi eri toimijat (metsänhoitoyhdistykset, metsäpalveluyrittäjät, teollisuuden puunhankintaorganisaatiot) tuottavat itse tietoa omiin tietokantoihinsa toimintansa yhteydessä.

Metsäsuunnittelu on Suomessa perinteisesti ollut metsäpolitiikan väline. Alueellisilla metsäkeskuksilla on ollut merkittävä rooli kansallisten tavoitteiden edistäjänä metsätaloudessa. Niinpä maanomistajien tavoitteet ovat vaikuttaneet suunnitelman sisältöön varsin vähän. Nykyisin metsänomistaja nähdään aiempaa selvemmin itsenäisenä toimijana suunnittelupalveluja kehitettäessä, ja suunnittelupalveluilta on ryhdytty edellyttämään tavoitevetoisuutta (Hassinen 2005).

Metsäsuunnittelun metsäpoliittisen roolin takia julkinen tuki on ollut merkittävä osa sen rahoitusta. Viimeaikaisten keskustelujen perusteella valtiovalta on rahoittamassa suunnittelua jatkossakin ja julkisin varoin tuettaneen vähintään metsävaratiedon tuottamista ja ylläpitämistä, mutta kokonaisrahoitus ei ainakaan merkittävästi nouse. Tällöin yhtenä vaihtoehtona on rahoittaa metsävaratiedon tuottaminen ja ylläpito ainakin osaksi julkisin varoin ja tarjota varsinaiset palvelut pääosin asiakasrahoitteisesti.

2.1.2 Nykytilanne

Alueellinen metsävaratieto kerätään metsikkökuvioittaisella silmämääräisellä arvioinnilla, jota tuetaan mittauksin. Suhteellinen kuvioittainen keskivirhe puuston kokonaistilavuudessa on ollut tyypillisesti yli 20 % (Uuttera 2005). Vuonna 2003 suunnittelukustannukset olivat keskimäärin 17,6...18,6 euroa/ha, josta maastotyön osuus on noin puolet (Rakemaa 2003). Vuonna 2004 metsäsuunnitteluun osoitettiin valtion talousarviossa 17,6 miljoonaa euroa (Rakemaa 2003).

Metsätiedon tuottamistekniikoissa suurimmat edistysaskeleet on otettu ilmakuvien hyödyntämisessä. Niitä käytetään lähinnä visuaaliseen ennakkokuviointiin. Myös ilmakuvilta tehtävää puoliautomaattista kuviointia on kokeiltu, mutta sitä ei ole otettu laajaan operatiiviseen käyttöön. Visuaalista ilmakuvatulkintaa on kokeiltu puustotietojen ajantasaistuksen tukena (Anttila 2002), mutta menetelmä ei ole ainakaan vielä yleistynyt laajasti. Maastotallentimia on organisaatiosta

riippuen joko käytössä tai tulossa käyttöön vaihtelevin ominaisuuksin (GPS, mobiili tiedonsiirto, ilmakuva, karttatieto jne.).

Puun ostajat, metsänhoitoyhdistykset ja metsäpalveluyrittäjät hyödyntävät metsävaratietoa hakkuu- ja hoitotoimien suunnittelussa, sikäli kun tietoa on saatavilla siirtotiedostona tai tilakohtaisen suunnitelmaraportin kautta. Lisäksi satelliittikuvilta haetaan puustoisia kohteita puunhankinnan ohjaamiseksi.

2.1.3 Kehittämistarpeita

Nykymuotoinen alueellinen inventointi tuottaa liian epätarkkaa tietoa informaatiologiikaltaan tehokkaan puunhankinnan ja modernien simulointi-optimointisysteemeihin perustuvien suunnittelumenetelmien täysimääräisen hyödyntämisen näkökulmasta ja se on lisäksi liian kallista. Metsänomistajien neuvontaa ajatellen ongelmana on, että staattisen suunnitelmaraportin tieto menee vanhaksi heti, kun jokin toimenpide toteutetaan. Erityisesti tulevaisuudessa tämä aiheuttaa suuria ongelmia, koska maastotöiden määrää ollaan minimoimassa ja toimenpiteiden päivitysmahdollisuudet maastokäynnein ovat pienet.

Edellä mainituista syistä nykymuotoisesta suunnittelukokonaisuudesta ollaan luopumassa ja niin tutkimuksessa kuin käytännön organisaatioissakin on meneillään monia kehittämissponnistuksia, kuten laserskannaus lentokoneesta tai helikopterista (myös yhdistettynä digikuvaukseen) (Kangas 2005, Uutera 2005), puustotietojen laskennallinen päivittäminen ja toimenpiteiden jatkuva päivitys (Korhonen ja Hyvönen 2003) sekä verkkopalvelut erilaisissa asiakasrajapinnoissa (Hartikainen ym. 2003).

2.1.4 FORESTRIX-hanke ja metsäsuunnittelun kehittäminen

FORESTRIX-hankkeen lyhyen aikavälin hyöty metsäsuunnittelulle näyttäisi liittyvän jäävän puuston skannaukseen hakkuutoimenpiteiden yhteydessä ja tämän tiedon siirtämiseen metsävaratietokantaan. Näin saataisiin ajantasaista ja tarkkaa tietoa, joka mahdollistaisi tehokkaamman puunhankinnan ja modernien suunnittelumenetelmien paremman hyödyntämisen. Myös metsäsuunnittelun laatu metsänomistajan oppimisen kannalta paranisi, jos tehdyistä toimenpiteistä ja jäävästä puustosta olisi saatavissa tarkat tiedot. Puiden paikkojen tunteminen mahdollistaisi tulevaisuudessa virtuaalimetsän hyödyntämisen myös metsänomistajalle suunnatuissa suunnittelupalveluissa, mikäli metsävaratietokannassa käytettävä tietomalli olisi riittävän tarkka.

2.2 GPS:n käyttö puunkorjuussa

2.2.1 Taustaa

GPS-laitteiden tarkkuus on viime vuosina parantunut ja GPS-tekniikkaa käytetään metsätaloudessa laajasti (Asikainen ym. 2005). Suomen puunkorjuussa GPS-laitteita käytetään hakkuukoneissa ja uudehkoissa kuormatraktoreissa. Puutavaran kaukokuljetuksessa GPS-laitteita hyödynnetään kattavasti. Pohjoismaissa myös metsätalouden muissa toimenpiteissä, mm. maanmuokkauksessa, istutuksessa, lannoituksessa ja metsäteiden kunnossapidossa on hyödynnetty GPS-tekniikkaa (Brown ym. 2003, Petterson 1999, Petterson ym. 2003, Forsberg ym. 2001).

Metsäkoneissa GPS-tekniikka on yleisesti käytössä yrityksissä, joiden urakanantajina toimivat suuret metsäyhtiöt ja Metsähallitus. Myös joillakin keskisuurilla metsäteollisuusyrityksillä on käytössä paikkatietojärjestelmät, joiden osana ovat korjuuyritysten metsäkoneiden paikannuslaitteet. Monilta pieniltä toimijoilta järjestelmät kuitenkin puuttuvat kokonaan.

2.2.2 Metsäkoneiden GPS-laitteiden ominaisuudet

Metsäkoneissa GPS-laite on useimmiten työkoneen tietokoneeseen asennettu ns. korttityyppinen laite, jossa on erillinen antenni. Laitteella paikannetaan peruskoneen sijainti. Hakkuulaite voi nosturin asennosta riippuen olla maksimissaan noin 10 metrin päässä peruskoneesta.

Differentiaalikorjauksella varustetulla GPS:llä voidaan päästä jopa muutamien kymmenien senttimetrien tarkkuuteen (Hujala 2004). Metsässä differentiaalikorjauksella ja erillisellä antennilla varustetun DGPS:n paikannustarkkuuden on todettu olevan muutaman metrin luokkaa (Rouvinen, Varjo ja Korhonen 1999). Pidentämällä havainnointiaikaa on ilman differentiaalikorjausta olevilla kannettavilla GPS-laitteillakin päästy keskimäärin muutaman metrin paikannustarkkuuteen (Naasset ja Jonmeister 2003). Yksittäisillä havainnoilla paikannusvirheet voivat kuitenkin olla jopa yli 10 metrin luokkaa (Naasset ja Jonmeister 2003). GPS:n paikannustarkkuutta huonontavat mm. kiinteiden esteiden, kuten puuston aiheuttama ns. monitieheijastus, joka on voimakkainta latvuston ollessa märkä (Jasumback 1996, Rouvinen ym.1999). Toisinaan paikannus ei riittävän hyvässä asemassa olevien satelliittien puuttuessa onnistu lainkaan.

GPS-paikannuksessa käytetään differentiaalikorjausta niiden puunkorjuuyritysten metsäkoneissa, joiden urakanantajana on UPM-Kymmene (Melkas 2005). Muilla puunkorjuuyrityksillä ei ole juurikaan käytössä differentiaalikorjatulla paikannuksella varustettuja metsäkoneita. Käytännössä tekninen valmius DGPS:ien käyttöönottoon on olemassa. Tarkan paikannuksen hyötyjen ollessa riittävän suuret tekniikkakin otettanee käyttöön.

2.2.3 GPS-laitteiden nykyiset käyttötavat puunkorjuussa

Puunkorjuussa eräs GPS:n käyttötarkoitus on navigointi leimikolle koneita siirrettäessä. Tämä tapahtuu paikannuksen ja karttaohjelmiston avulla. Leimikot, varastopaikat ja ajoneuvojen kääntöpaikat on merkitty karttaphjalle. Työkoneen sijainti voidaan tarkistaa työkoneen tietokoneen näytöltä.

Työskenneltäessä leimikolla GPS-paikannusta hyödynnetään mm. leimikon rajojen ja leimikolla sijaitsevien erityiskohteiden, kuten sähkölinjojen ja avainbiotooppien, paikantamisessa. GPS-laitteen avulla voidaan myös merkitä kartalle harvennuksessa syntyvät ajourat. Mahdollista on myös erilaisten hälytysten käyttö työkoneiden siirtyessä liian lähelle leimikon rajaa tai muita merkittäviä kohteita.

2.2.4 GPS-laitteiden tutkittuja ja mahdollisia käyttötapoja puunkorjuussa

Esimerkkinä GPS:n uudenlaisesta käyttötavasta puunkorjuussa on menetelmä, jossa hakattujen puutavarapölliön sijaintitiedot lähetetään kuormatraktoriin hakkuun yhteydessä. Tietoa voidaan hyödyntää metsäkuljetuksessa ja tietyn puutavaralajin puut voidaan löytää nopeasti leimikolta. Tekniikka mahdollistaa myös ajoreittien optimoinnin ja parantaa lumen peittämien puiden kuormauksen tehokkuutta (Tammisto 2003, Tarkka 2004).

Leimikoiden kuviorajat voidaan määrittää hakkuun yhteydessä myöhempää käyttöä varten (Melkas 2002). Yhdistämällä hakattu puumäärä ja sen tarkka sijainti voidaan tuottaa vertailuaineistoja käytettäväksi ilma- tai satelliittikuvien tulkintaan (Melkas 2002).

Metsien inventointitiedon keräämiseen sekä vertailuaineistojen tuottamiseen liittyviä ja metsäkoivien tuottamaa paikkatietoa hyödyntäviä menetelmiä on kehitetty runsaasti. Yksittäisten puiden paikantamiseen ja puukartan laatimiseen liittyviä sovelluksia on tutkittu vähemmän, mutta (Melkas 2005) on selvittänyt yksittäisten puiden paikantamista ilmakuvilta hakkuukoneen GPS:n tietojen perusteella.

2.3 Laserskannaus puuston mittauksessa

Laserkeilausta on tutkittu metsikkötason metsävaratiedon tuottamisessa, mutta myös yksittäisten puiden tunnistamista ja mittaamista on selvitetty. Menetelmää pidetään lupaavana (Maltamo ja Pitkänen 2003). Ilmasta tehtävällä laserkeilauksella saadaan aikaan pisteparvidata, jossa osa pisteistä on heijastumia maasta ja osa puiden latvoista. Pisteiden avulla voidaan laatia maaston ja latvuston korkeusmalli ja näiden erotuksena selvittää puuston pituus (Maltamo ym. 2004). Menetelmällä voidaan mitata yksittäisten puiden pituuksia jopa alle metrin keskimääräisellä virheellä. Puiden pituus- ja latvusalatiedoista voidaan johtaa puuston tilavuusestimaatti. Kuviotasolla virhe tilavuuden mittauksessa on ollut samaa tasoa tai hieman pienempi kuin kuvioittaisessa arvioinnissa, jossa käytetään apuna maastomittauksia. Kuviorajojen luomiseen laserskannaus ei kuitenkaan soveltune (Maltamo ym. 2004).

Laserskannauksen ongelmakohtia ovat järjestelmän havaitsemattomista puista aiheutuva aliarvio mittaustuloksissa, puulajien tunnistus, iän arviointi ja toimenpide-ehdotusten tuottaminen (Maltamo ym. 2004). Ongelmakohtiin etsitään ratkaisua mm. yhdistämällä laserskannaus- ja ilmakuvaineistoja. Metsäsuunnittelussa laserskannaus on Suomessa ja muualla maailmassa vasta tutkimuskäytössä, mutta Norjassa on sovelluksia jo operatiivisessa käytössä (Maltamo ym. 2004).

Myös maasta tehtävää laserskannausta 3D-laserilla on tutkittu metsän inventointikeinona (Aschoff ym. 2004, Pfeifer ym. 2004, Simonse ym. 2003, Watt ja Donoghue 2005). Aschoff ym. (2004) näkivät menetelmän ongelmaksi puiden pituuden arvioinnin, sillä puiden latvojen sijaintia ei saatu skannauksessa selville. Puulajeja ei myöskään saatu tunnistettua skannauksen avulla. Puiden pituus voidaan selvittää mallien avulla hyödyntämällä mahdollisimman korkealta rungosta saatua tarkkaa läpimittatietoa. Tämän läpimitan mittausta haittaavat puiden oksat. Watt ja Donoghue (2005) toteavat, että puiden läpimitat saadaan tarkasti selville silloin, kun sensorin ja mitattavan puun välillä ei ole esteitä. Latvuksen mitoista ja oksien sijainnista rungolla saadaan myös tietoa laserin avulla. Skannauspisteiden lukumäärä ja skannauksen resoluutio lisäävät informaatiomäärää. Tiheyden ja oksaisuuden aiheuttama varjostus vähentää kuitenkin käyttökelpoisen tiedon määrää. Pfeifer, Gorte ja Winterhalder (2004) esittävät keinoja puiden mallintamiseen laserskannausdatasta. Teknologia ja menetelmät eivät heidän mukaansa ole vielä täysin sopivia vaikeisiin metsäolosuhteisiin.

2.4 Laserskannereiden ja konenäön mahdolliset metsäkonesovellukset

2.4.1 Taustaa

Metsäympäristö ja metsätyö asettavat tunnetusti suuria vaatimuksia teknisten järjestelmien toimivuudelle. Tämä näkyy selkeästi esim. puunkorjuukoneiden alustaratkaisuisissa, joissa ensisijainen tavoite näyttää olevan yksinkertaisella rakenteella saavutettu kestävyys. Vastaavasti on menetetty edistyneemmällä rakenteella mahdollisesti saavutettavia hyötyjä, kuten keveys ja alemmat maaperään kohdistuvat kuormitukset.

Edellä mainittuun nähden harvestereiden hakkuu- ja mittalaitteisiin liittyvä tekniikka on huomattavan korkealla tasolla. Kuormaimen ohjaus karteesisessa koordinaatistossa olisi nykyisinkin täysin toteutettavissa, mutta kuormaimen automatisointi teollisuusrobottien tapaan vaatisi toimivaa aistinjärjestelmää kohteiden ja esteiden havaitsemiseksi. Tältä osin ongelma poikkeakin jo huomattavasti tyypillisestä teollisuussovelluksesta, sillä kohteiden ja esteiden sijainti ja muoto vaihtelevat. Edelleen aistintekniikka joutuu toimimaan puunkorjuun yhteydessä luonnonoloissa ja anturit ovat lisäksi alttiina mekaanisille vaurioille.

Edellä mainitusta johtuen laserskannauksen ja konenäön sovellukset metsä- ja puutalouden piirissä ovatkin lähinnä mekaanisessa metsäteollisuudessa sekä prosessiteollisuudessa luokittelu-, prosessinohjaus- ja laadunvalvontasovelluksissa.

Tarve etenkin hakkuukoneen toimintojen ainakin osittaiseen automatisointiin on kuitenkin ilmeinen, sillä nykyisellään kuljettajan tehtävänä on huomattavan suuri määrä päätöksiä, mikä aiheuttaa henkistä kuormittumista. Puun karsinta ja katkonta on jo automatisoitu niin pitkälle kuin ilman rungon laadun mittaustekniikan kehittämistä on mahdollista.

2.4.2 Laserskannauksen ja konenäön sovelluksia

Suurin osa laserskannauksen ja konenäön sovelluksista on teollisuudessa. Lukuisia tutkimuksia autonomisista ajoneuvoista tieliikenteeseen (Svahn 2005, Hong ym. 2002) ja maatalouteen (Nogushi ym. 2001) on tehty. Siirryttäessä maastoon autonomisista ajoneuvoista tehdyn tutkimuksen määrä vähenee. Valtaosa edellisestä tutkimuksesta on sotilassovelluksia logistiikkaan tai valvontatehtäviin (Hong ym. 2002, Ibanez-Guzman ym. 2004).

Metsätyössä autonomisille ajoneuvoille tai työkoneille asetettavat vaatimukset ovat huomattavan korkeat. Pelkkä liikkuvuus sinällään ei riitä vaan sen tulee tapahtua mahdollisimman pienin maasto- ja puustovaurioin. Vastaavasti hakkuukoneen olisi kyettävä tekemään työtä, joka asettaa ihmisen havainto- ja päätöksentekokyvyillekin suuret vaatimukset.

Yleisintä varsinaista tuotantoketjun metsäpään sovellusta edustaa joko ilmasta tai maasta tehdyn laserskannauksen (Maltamo ym. 2004, Simonse ym. 2003, Haala ym. 2004, Pheifer ym. 2004, Aschoff ym. 2004, Watt ja Donoghue 2005) tai digikamerakuvan (Juujärvi ym. 1998) käyttö metsän mittaukseen. Myös puutavarakuorman tilavuuden määrittämisessä tehtaalla käytetään 2D-laserskannausta.

2.4.3 Laserskannauksen ja konenäön mahdolliset metsäkonesovellukset

Varsinaisia laserskannauksen ja konenäön metsäkonesovelluksia ei juurikaan ole. Lähimpänä aihealuetta lienee ruotsalainen projekti, jossa reitin oppiva autonominen kuormatraktori kuljettaa puuta leimikolta varastopaikalle (Hellström 2002, Ringdahl 2003, Hellström ja Ringdahl 2004, Hallonborg ja Norden 2005). Tässäkin sovelluksessa esteiden havaitsemiseen tosin käytettiin 24 GHz 2D-laserskanneria, jonka eduksi mainitaan tunteettomuus sääoloille. Toinen aihealuetta sivuva sovellus on harvesterin kouraan asennettu kamera, jonka ohjaamoon asennetun lisänäytön avulla kuljettaja voi paremmin havainnoida rungon suoruutta ja vikaisuutta (Heiskanen 2005). Tässä sovelluksessa puolestaan ei ole kysymys konenäöstä. Kamera on suojattu mekaanisilta vaurioilta niin, että kestävyys ei ole ongelma. Normaalisti kamerasuojan objektiivin puhdistetaan tarvittaessa, mutta sateisella ja loskaisella kelillä objektiivin sumentuminen estää laitteen käytön.

2.4.4 Anturit ja sensorifuusio

Paikannus, kulkuväylän havaitseminen, maaston pinnanmuotojen havainnointi, esteiden havaitseminen ja kohteiden löytäminen ovat tyypillisiä autonomian ja automatisoinnin edellytyksiä. Luvussa 2.4.3 mainituissa sovelluksissa paikannukseen on käytetty GPS:ää, inertiapaikannusta ja odometriaa, väylän, esteiden ja kohteiden havaitsemiseen laserskannausta, tutkaa, ultraääntä ja konenäköä sekä maaston muotojen havainnointiin laserskannausta. Sensorifuusiossa, eli eri mittalaitteiden samanaikaisesti tuottaman informaation yhdistämisessä sovelluksen kannalta mielekkääksi ja informaatioisällöltään suuremmaksi kokonaisuudeksi, on useimmin käytetty Kalman-suodatinta. Autonomisten ajoneuvojen ohjauksessa on sovellettu myös sumeaa logiikkaa.

3 Tekninen aistinvaraisuus ja aistinvarainen paikannus

Aistinvaraisuus on luonnollinen olotila hermostolla varustetuille kasveille ja eliöille. Aistinvarainen yksilö reagoi aistinsoluiltaan saamaan informaatioon hermostossa olevan vasteen mukaan. Toimintavaste on opittua ja sitä voidaan harjoitella tai muuttaa tarpeen mukaan. Aistinvaraisuuden rakentaminen koneille on ollut pitkään automaatioteollisuuden tavoitteena. Tähän luontoa matkivaan keinotekoiseen aistimukseen on pyritty erilaisilla sensoreilla, jotka antavat tietoa ajasta, paikasta ja paineesta yms. Tietokoneet ovat käsitelleet näitä käskyjä muistissaan olleiden ohjelmoitujen vasteiden mukaan. Aikaansaadun keinoaistimuksen tarkkuus on riippunut sensorista ja sen havaintovasteen tarkkuudesta.

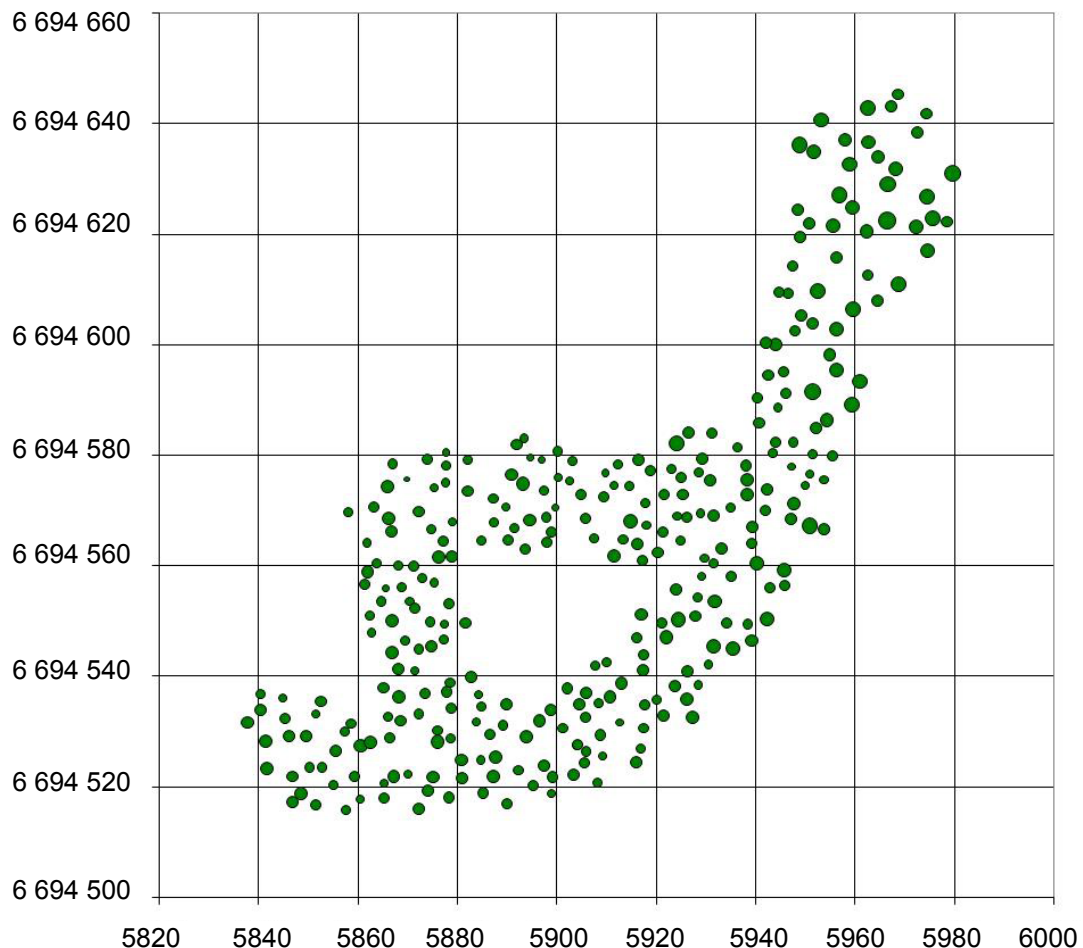
Yksinkertaiset sensoriohjatut prosessit toimivat hyvin. Aistinvaraisuuden ongelmaksi muodostuvat monimutkaiset prosessit, joita on vaikea mallintaa tai jotka sisältävät paljon virhetekijöitä. Maasto ja metsä ovat monella tapaa vaikeita kohteita mallintaa. Säännönmukaisuuksia löytyy, mutta niiden vaihtelu voi olla suurta. Esimerkkinä tästä voidaan ajatella puun runkoa, joka teoreettisena muotona voidaan ajatella kartioksi tai lieriöksi. Käytännössä puut ovat kuitenkin harvoin edellä mainittuja puhtaita muotoja. Lisäksi havainnointia vaikeuttavat myös oksat, sää- ja valaistusolosuhteet ja muut luonnonilmiöt.

Keinotekoisien aistimuksen luomisessa oman absoluuttisen tarkan paikan tunteminen on erittäin tärkeää. Kun paikka tunnetaan, voidaan luoda kartta ympäristöstä ja keinotekoiset aistimukset voidaan kiinnittää tähän yhteyteen esimerkiksi aikalaskun avulla. Tässä tapauksessa halutaan liikua ja toimia metsässä, joten luotava kartta on puukartta. Absoluuttiseen paikannukseen metsässä on hyvin vähän toimivia vaihtoehtoja. Ainoa referenssisijainnin antava menetelmä on satelliittipaikannus. Paikannus ei kuitenkaan toimi, jos satelliitteja ei ole riittävästi käytettävissä ja näin laitteiston tarkkuus on usein riittämätön. Paikannustietoa voidaan tarkentaa käyttämällä digitaalista radiosignaalia paikan korjaamiseen. Korjauksen jälkeen paikannustarkkuus on noin 1–3 m virheen sisällä absoluuttisesta (US Department Of Transportation 2007). Tämäkään tarkkuus ei vielä riitä puukartan luomiseen, joten absoluuttisessa paikannuksessa paikka täytyy tarkentaa koneen laserskannerin ja IMU-yksikön avulla. Skanneri peilaa metsässä lähimpiä puita ja esteitä, joiden paikan tietokone laskee pulssin kulun aikaviiveen tai vaihesiirtymän avulla. Absoluuttisen paikan määrittämiseksi täytyy laserskannerin datasta saada paikannettua vähintään kaksi, mielellään kolme, ei symmetrisesti laitteeseen nähden asennoitunutta puuta tai kohdetta. Puiden asennosta voidaan laskea paikka suhteessa DGPS-dataan. Tätä tietoa voidaan tarvittaessa vielä korjata koneen odometriatiedoilla ja IMU-yksikön kallistus- ja suuntatiedoilla. Kun kaikki edellä mainitut paikannustavat yhdistetään, on päästy tarkkuuteen jolla puukartta voidaan luoda.

4 Puukartta

Puukartalla tarkoitetaan tasokoordinaatistoon tehtyä kuvausta runkojen paikasta. Koordinaatiston origo on kiinnitetty tunnettuihin maastokoordinaatteihin. Puukarttaa voidaan pitää myös eräänlaisena puuston tila- ja tilavuusmallina. Kuvassa 1 on manuaalisesti käsin mitattu referenssipuukartta yhdeltä tässä tutkimushankkeessa käytetyistä koealoista. Kartassa jokaisella puulla on oma tunnus, johon voidaan liittää lisätietoa puusta.

Tutkimuksessa rakennettu mittausjärjestelmä pyrkii luomaan esitetyn kaltaisen puukartan automaattisesti laserskannerin avulla. Laserskanneriin liitetty tietokone laskee puista mittaustietojen avulla läpimitan ja paikan. Valmista puukarttaa voidaan käyttää hyödyksi ennen hakkuutapahtumaa ohjaamaan kuljettajan toimintaa. Järjestelmä voi esimerkiksi ehdottaa puiden kaatoa tietystä järjestyksessä. Jatkossa kartan avulla pyritään automatisoimaan yksioteharvesterin toimintoja.



Kuva 1. Paikkakoordinaatistossa esitetty manuaalisesti mitattu referenssikartta Tuusulan Ruotsinkylässä sijaitsevalta koealalta.

5 Aistinvaraisen mittausjärjestelmän hyödyntämismahdollisuuksia metsätaloudessa

Tässä kehitetty aistin- ja mittausmenetelmä on puunkorjuuseen ennen soveltamaton. Näin ollen moni sen mahdollisista sovelluksista keksitään toden näköisesti vasta järjestelmän käyttöönoton jälkeen. Seuraavassa on esitetty joitakin ajateltavissa olevia soveltamismahdollisuuksia ja saavutettavia hyötyjä.

- Nopeasti hyödynnettävä apu järjestelmästä on sen avulla saatava tarkempi leimikkotieto ja runkolukusarjat hakatuilta leimikoilta. Jos järjestelmän mittaamia puiden läpimittatietoja voidaan yhdistää pituustietoon, voidaan puusto mallintaa huomattavasti tarkemmin kuin nykyään. Pituustietoa voitaisiin saada jo harvennuksen edetessä kaadetuista rungoista tai yhdistämällä puukarttatietoa lentokoneesta mitattuun laserkeilaustietoon.
- Aistinvaraisen ennakoivan mittaustiedon avulla on mahdollista saavuttaa haluttu harvennuksen voimakkuus. Kuviotietojen tallennuksessa harvesteri voi automaattisesti määrittää hakkaamattoman ja hakatun metsän pohjapinta-alan ja muuntaa tiedot kuutiotiedoiksi kaadettujen puiden pituustiedon avulla.
- Jos puukartan tiedot tallennetaan tietokantamuotoon, voidaan jokaiseen runkotunnukseen lisätä periaatteessa ääretön määrä muita määreitä. Pelkän paikan ja läpimitan lisäksi voidaan kartan yhteydessä olevaan tietokantaan lisätä tietoa kasvupaikasta, laadusta tai vaikkapa puun geneettisistä ominaisuuksista. Jos nämä tiedot ovat käytössä hakkuuvaiheessa, voidaan saata-va puutavara merkitä esimerkiksi etätunnistintekniikalla ja näin tieto saadaan välitettyä koko ketjun läpi jatkojalostuksen käyttöön sahalle tai tehtaalle saakka.
- Järjestelmää voidaan käyttää kuljettajan apuna tehtäessä ylä- tai alaharvennuksia. Tämä tapahtuisi lähinnä siten, että järjestelmä ehdottaisi puita harvennuksen edetessä. Koneeseen pitäisi tätä varten kehittää uutta ohjelmistoa.
- Puukartan avulla voidaan hakkuutapahtumaa tarkastella ennen hakkuuta ja sen jälkeen, ja siten arvioida sen esim. maisemallisia vaikutuksia tai onnistuneisuutta. Tämä antaisi uuden mahdollisuuden vähentää hakkuuta kohtaan mahdollisesti tunnettuja epäluuloja edistää puun myyntiä mm. kaupunkilaismetsänomistajien keskuudessa.
- Puiden paikka olisi mahdollista merkitä jo istutusvaiheessa, jolloin taimikonhoito voitaisiin koneellistaa ja automatisoida. Näin luotavan puukartan puista osa tietenkin menetettäisiin ennen taimikonhoitoa, mutta saavutettavissa olevat hyödyt voisivat olla huomattavat.
- Järjestelmällä voidaan helpottaa työskentelyä lumessa mm. siten, että se osoittaa kuljettajalle aiemmin käytetyt ajourat sekä puutavarakasojen paikat.

Järjestelmän kannattavuutta voidaan tarkastella seuraavasti.

- Arvioidaan lisämittausten kestävän noin 0,5 h/leimikko. Suomessa hakataan 80 000 kpl (Valtakunnan... 2008) harvennusleimikoita vuodessa ja harvesterin käyttötuntikustannuksiksi oletetaan 55 euroa/tunti (Kärhä ym. 2003). Lisämittausten kokonaiskustannukseksi muodostuu näin 2,2 miljoonaa euroa/vuosi. Verrattaessa tätä yksityismetsien suunnittelussa käytettävään

noin 200 miljoonaan euroon/vuosi (TAPIO 2006), voidaan todeta että suhteellisen suurellakin kustannuksella järjestelmän käyttöönotosta on huomattavaa taloudellista hyötyä.

- Mikäli harvennuksessa poistetaan liian paljon puita, maan kasvupotentiaalia ei käytetä täysin hyödyksi. Ongelma on suurin männiköissä. Vuonna 2005 alitiheyteen harvennettiin noin 26 % männiköistä (TAPIO 2006). Harvennusrvirheet olivat alitiheyden syy noin 20 % alitiheistä kohteista. Suurimmaksi syyksi havaittiin harvennuksen tekeminen jo alkujaan liian harvaan metsään (Poikela ja Aijälä 2006). Yhteensä korjuun takia alitiheyteen harvennetaan 11 000 ha vuodessa. Tämä aiheuttaa metsänkasvatukseen Metlan Motti-ohjelmistolla (Motti-ohjelmisto 2008) laskettuna n. 2,5 miljoonan euron tulojen menetyksen vuosittain.
- Hakkuita tehdään koneellisesti 40 miljoonaa m³/vuosi. Hakkuukäytössä on 1500 harvesteria ja näissä 10 % (Pöllänen 1999) on kokematon kuljettaja, jolloin osittain automatisoidun nosturin ohjauksen voidaan olettaa parantavan hakkuutyön tuottavuutta esim. 20 %. Kokemattomat kuljettajat hakkaavat vuosittain 3 miljoonaa m³ puuta, joten suora tuottavuuden kasvamisesta seuraava kustannusvaikutus on 3,1 miljoonaa euroa/vuosi. Tämä sisältää sekä harvennukset että päätehakkuut.
- Edellisiä lukuja voidaan verrata FORESTRIX-järjestelmän käyttöönoton kustannuksiin. Jokaiseen 1 500 kpl harvestereita asennetaan mittausjärjestelmä, joka maksaa arviolta 5 000 tai 10 000 euroa. Laskennalliseksi käyttöiäksi arvioidaan 3v/7 500 tuntia ja huoltoihin arvioidaan kuluvan 500 euroa/vuosi. Tämän seurauksena laitteen pääomakustannuksiksi jäännösarvotona jää 1 840 euroa/vuosi tai 3 670 euroa/vuosi. Tämä nostaisi harvesterin käyttötuntikustannuksia 0,9...1,7 euroa. Vuotuisiksi kokonaiskustannuksiksi edellisillä arvioilla muodostuisi kaikille harvestereille noin 3,5 miljoonaa euroa tai 6,25 miljoonaa euroa.
- Edelliset arviot edellyttävät, että mittausjärjestelmä saadaan toimimaan kaikenlaisissa metsiköissä ja että se toimii lähes virheettömästi. Mittausjärjestelmä tulisi myös olla asennettuna kaikissa toiminnassa olevissa harvesterissa.

6 Metsäkoneen puoli- ja täysautomaattinen ohjaus

Metsäkoneiden tuottavuuden parantaminen on ollut oleellisena lähtökohtana koneiden suunnittelussa. Koneiden kehityksestä huolimatta, suurin tuottavuuteen vaikuttava yksittäinen tekijä olosuhteiden ohella on koneen kuljettaja. Eritasoisten kuljettajien vaikutusta on pyritty vähentämään automaation avulla. Kuva 2 havainnollistaa nykyisen automaation tasoa yksioteharvesterin toiminnossa. Dimensioiden mittausta, karsintaa ja katkosta ovat jo pitkälle automatisoituja toimintoja. Myös puomin liikkeitä on saatu automatisoitua ja yhdistettyä automaatiojärjestelmäksi, näistä esimerkiksi kasaustoiminto ja puomin heilunnan vaimentaminen.

Metsäkonesuunnittelussa pyritään ratkaisemaan:

- mitä toimintoja automaation avulla voidaan luoda lisää tai vähentää
- minkä toimintojen ohjaus voidaan siirtää kuljettajalta koneelle.

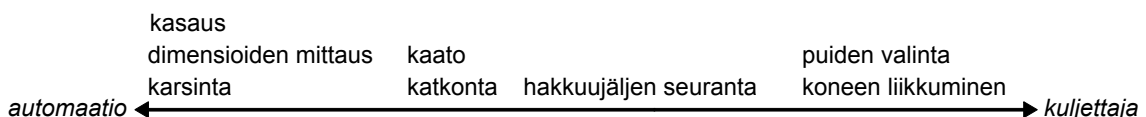
Kehitys on johtamassa siihen, että yhä useampia toimintoja pyritään puoli- tai täysautomaattisesti lähitulevaisuudessa. Kuvassa 3 on esitys lähitulevaisuuden automaationäkymistä.

Vaikka tässäkin tutkimuksessa aistinvaraisuuden tarkoituksena on lopullisessa toimintamuodossa opastaa tai tehdä päätöksiä kuljettajan puolesta, voidaan vasta varsinaisten aika- ja työmittauksilla varmistaa järjestelmän hyödyt. Toivottavaa kuitenkin olisi, että aistinjärjestelmät vähentävät kuljettajan työtaakkaa ja mahdollistavat tuottavuuden kasvun varsinkin aloittelevilla kuljettajilla.

Esimerkki automaation soveltamisen hankaluudesta metsäkoneiden toiminnassa on kuormaimen ohjauksen toteuttaminen. Kuormaimen ohjaus toimii karteesisessä koordinaatistossa ja olisi nykyisellä tekniikalla lähes täysin automatisoitavissa. Ongelmaksi muodostuu ympäristö, jossa kuormaimen tulee toimia. Toisin kuin teollisuusrobottien kohdalla kuormaus- ja purkuoperaatiot tapahtuvat vaihtelevissa ympäristöissä. Jotta kuormaimen automatisointi teollisuusrobottien tapaan onnistuisi, se vaatisi toimivaa aistinjärjestelmää kohteiden ja esteiden havaitsemiseksi. Kehitettävät aistintekniikat joutuvat toimimaan puunkorjuun yhteydessä luonnonoloissa ja alttiina mekaanisille vaurioille.



Kuva 2. Yksioteharvesterin toimintojen automatisoinnin nykytila.

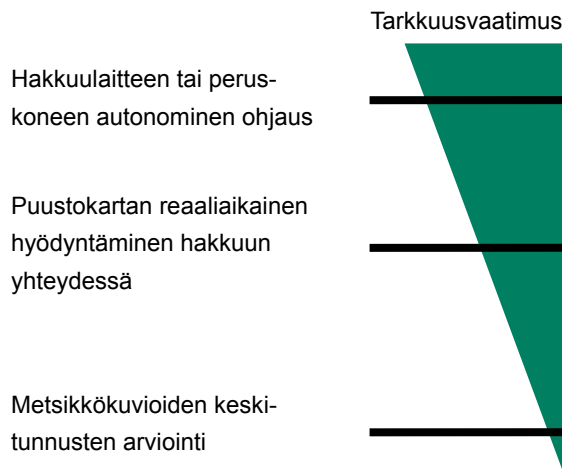


Kuva 3. Automatisoinnin mahdolliset vaikutukset yksioteharvesterin toimintoihin.

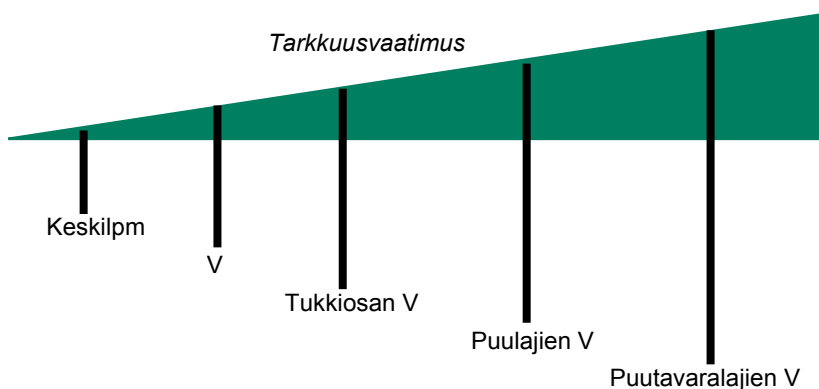
7 Järjestelmälle asetettava tarkkuusvaatimus

Mitattavan tiedon käyttötarkoitus vaikuttaa siihen, minkälaista tarkkuutta mittausjärjestelmältä vaaditaan (kuvat 4 ja 5). Oikeaa mittaustarkkuutta ei näin ollen olekaan syytä asettaa vaan voidaan arvioida sitä eri tunnusten mittauksen vähimmäistarkkuutta, jolla tietoa voidaan vielä hyödyntää. Tarkkuudeltaan hyvän mittaustiedon hyödyntämisalue on laaja.

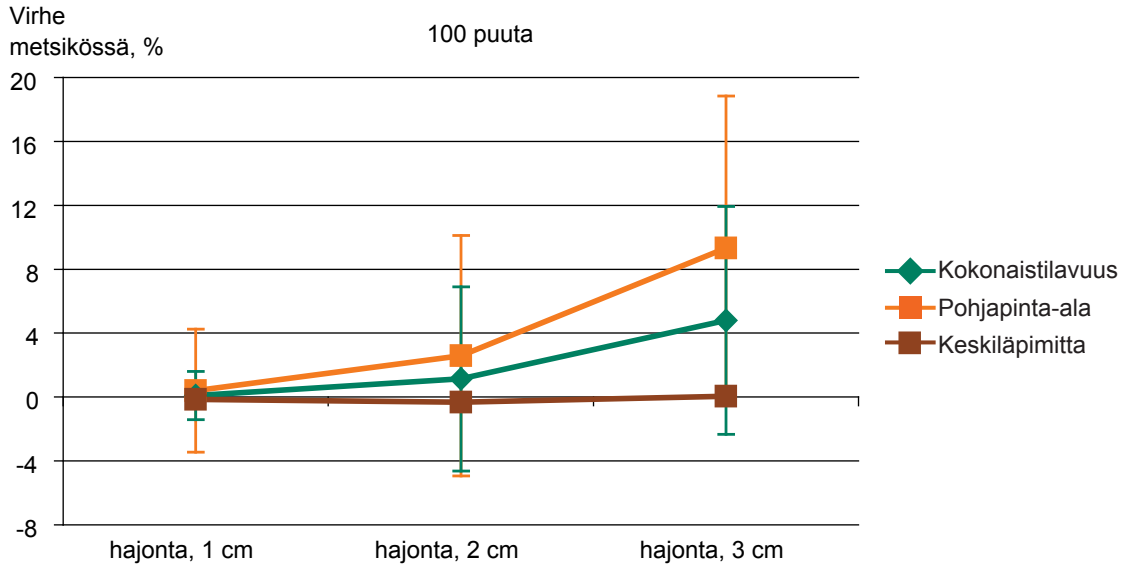
Tunnusten mittaukselta vaadittavaa vähimmäistarkkuutta ja mittausvirheiden vaikutusta käytettävään lopulliseen tunnukseseen voidaan arvioida virheiden simuloinneilla ja muuttujien herkkyyssanalyysillä. Simulointi tehtiin laatimalla runkolukusarja harvennusmetsikölle. Runkolukusarjalla simuloitiin erilaisia läpimitan mittausvirheitä eri määrällä koerunkoja. Käytetyt runkomäärät olivat 100 ja 500 runkoa. Lisäksi laskettiin valittuja metsikkötunnuksia oikeilla ja virheellisillä läpimitoilla, sekä selvitettiin mitattujen puiden lukumäärän vaikutusta tuloksiin. Simulointien tulokset ovat nähtävissä kuvissa 6, 7 ja 8.



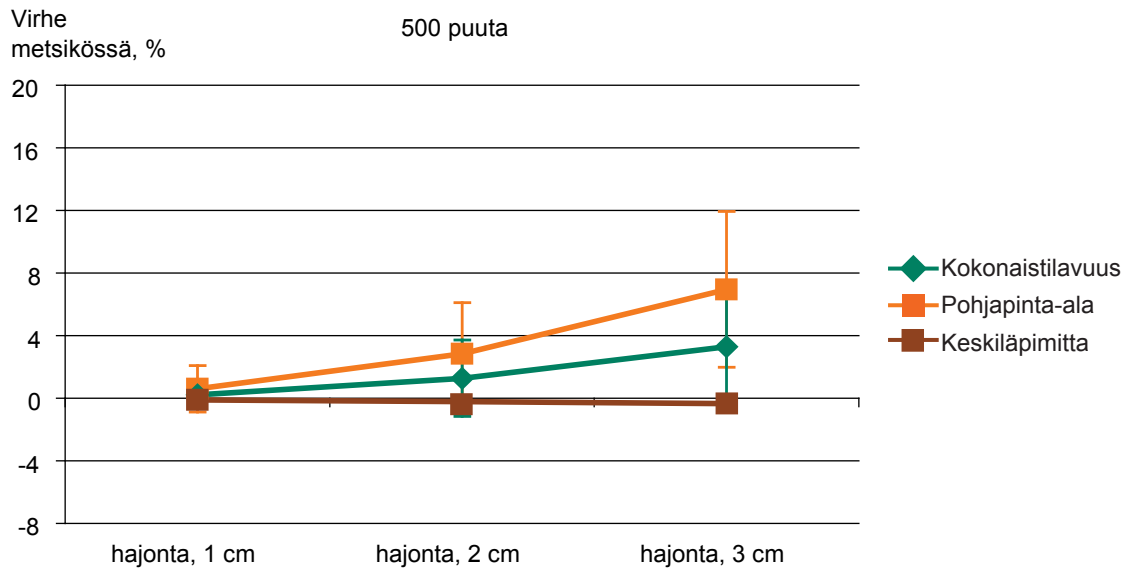
Kuva 4. Tiedon jälkikäytön tyypin mukainen lähtötiedon suhteellinen tarkkuusvaatimus.



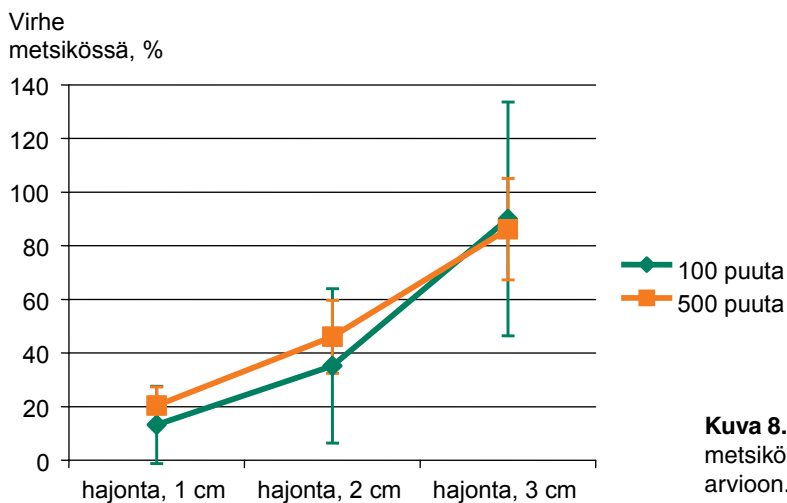
Kuva 5. Lähtötiedon suhteellinen tarkkuusvaatimus ennustettavan muuttujan mukaan.



Kuva 6. Läpimitan mittavirheen vaikutus metsikön keskitunnuksiin 100 puulla.



Kuva 7. Läpimitan mittavirheen vaikutus metsikön keskitunnuksiin 500 puulla.



Kuva 8. Läpimitan mittavirheen vaikutus metsikön tukkipuuosuuden tilavuuden arvioon.

Läpimitan hajonta vaikutti puuston keskitunnuksista eniten kokonaistilavuuteen. Hajonnan kasvaessa yhdestä kolmeen cm mittavirhe kumuloiduissa metsikkötiedoissa kasvoi 10 %. Puuston pohjapinta-alassa vaikutus oli 5 %. Mittausta pidettiin harhattomana. Hajonta määritettiin mittaustilanteiston läpimitan mittavirheen keskihajonnaksi. Suuremmalla runkomäärällä virheiden vaikutus simuloitussa aineistossa pieneni. Tämä johtui kuitenkin vain suuremman aineiston ta-soittavasta vaikutuksesta. Tarkkuusvaatimuksen kasvaminen ennustettavan muuttujan mukaan havaitaan selvästi kuvasta 8, jossa virhe metsikön tukkipuusuudessa mittaustilanteiston läpimitan ollessa 3 cm on jo noin 90 %.

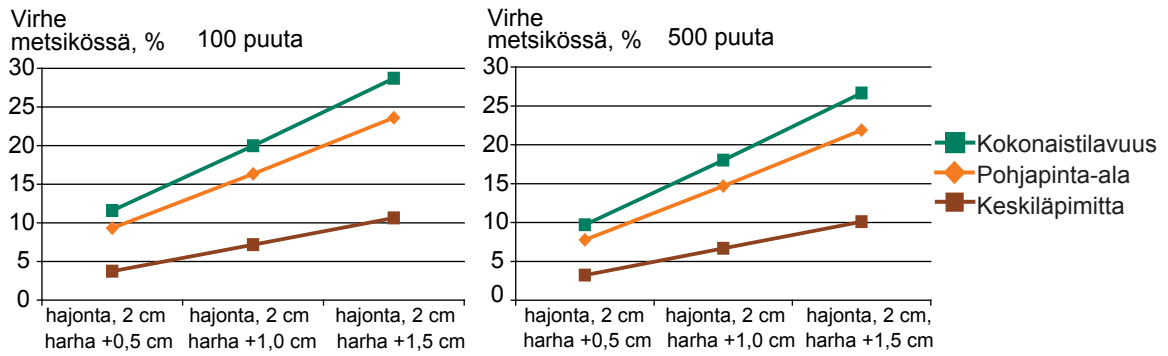
Positiivisen harhan vaikutusta keskitunnuksiin on tarkasteltu kuvassa 9. Kuvasta havaitaan erityisesti mitatusta suureesta johdettujen muuttujien virheen kasvavan nopeasti mittauksen harhan lisääntyessä.

Laserskannauksen periaatteesta johtuen lähempänä mittalaitetta olevat puut pystytään mittaamaan kauempana olevia tarkemmin. Tällöin resurssien käyttöä ajatellen olisi edullista luopua kaukana olevien puiden vaikeammasta ja epätarkemmasta mittauksesta, mikäli lähellä olevien puiden otoksella saavutettaisiin riittävä mittaustarkkuus. Lähimpien puiden käytön mahdollisuutta selvitettiin simuloimalla Ruotsinkylän pilottimittaustilanteella tasoltaan vaihtelevaa läpimitan satunnaista mittaeroa seuraavalla oletuksella:

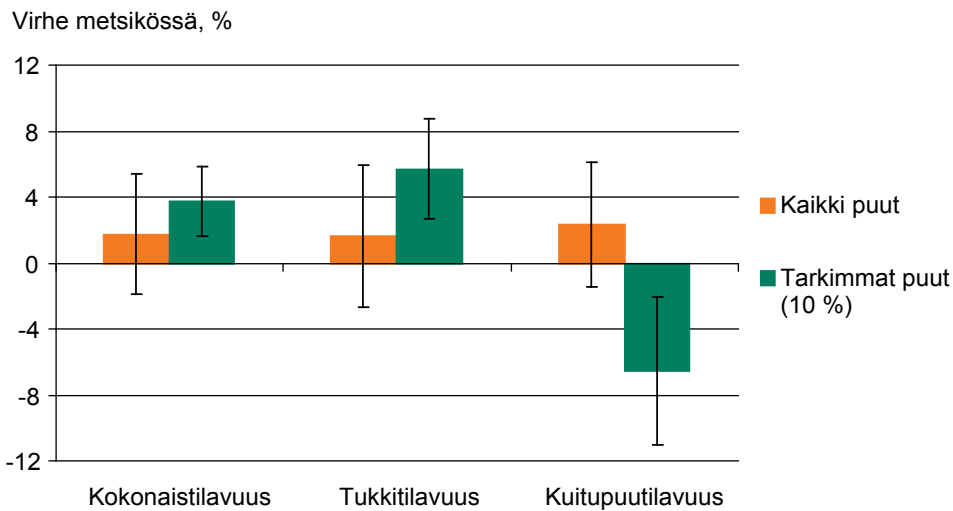
- 10 % puista, läpimitan hajonta 0,5 cm
- 30 % puista, läpimitan hajonta 1 cm
- 30 % puista, läpimitan hajonta 3 cm
- 30 % puista, läpimitan hajonta 5 cm

Tästä simuloinnista laskettiin puustotunnuksia käyttämällä kaikkein tarkimmin mitattujen puiden (10 %, 0,5 cm hajonnat puut) otosta (kuva 10). Havaitaan, että tilavuuden virhe vähintäänkin kaksinkertaistuu. Tapauksesta riippuen tämäkin ratkaisu saattaa silti olla käyttökelpoinen esim. olosuhteiltaan vaikeissa metsiköissä tai näkyvyyden ollessa sään takia rajoitettu.

Käytännössä järjestelmällä mitattavien puiden lukumäärä muodostuu suureksi, mikä vähentää mittaustilanteiston hajonnan vaikutusta. Eri keskitunnusten arviointitarkkuus vaihtelee kuitenkin voimakkaasti vaikka läpimitan mittaustarkkuus pysyisikin samana. Suuri hajonta aiheuttaa kuitenkin systemaattista yliarviota johdettujen keskitunnusten laskentaan, sillä yliarvion vaikutus on vastaavan suuruista aliarviota suurempi. Siten lievä negatiivinen mittaero olisi suotava. Systemaattiset läpimitan mittaerot voidaan kuitenkin poistaa laskennallisesti. Tarkastelun perusteella mittaustilanteiston tarkkuutta voidaan pitää hyvänä, jos läpimitan mittavirheen hajonta on 1 cm. 3 cm hajonnallakin mittaustietoja voidaan vielä hyödyntää, sillä tarkkuus vastaa tällöin kuvioitua arviointia.



Kuva 9. Läpimitan harhaisuuden vaikutus keskitunnuksiin.



Kuva 10. Runkokäyrämallilla parannetusta simulointiaineistosta laskettuja vaihteluja puustotunnuksissa.

8 Mittausmenetelmät ja -laitteisto

8.1 Yleistä

Hankkeen kuluessa käytettiin monentyyppistä mittaustietoa. Mittauskohteita olivat ajoneuvon paikannus, väylän havaitseminen, maaston pinnanmuotojen havainnointi, esteiden havaitseminen ja kohteiden löytäminen. Kaikki edelliset ovat tyypillisiä autonomian ja automatisoinnin edellytyksiä. Hankkeen sovelluksissa paikannukseen käytettiin GPS:ää, inertiaipaikannusta ja odometriaa; väylän, esteiden ja kohteiden havaitsemiseen laserskannausta ja konenäköä sekä ajoneuvon kulman ja suunnan havainnointiin inertiayksikköä.

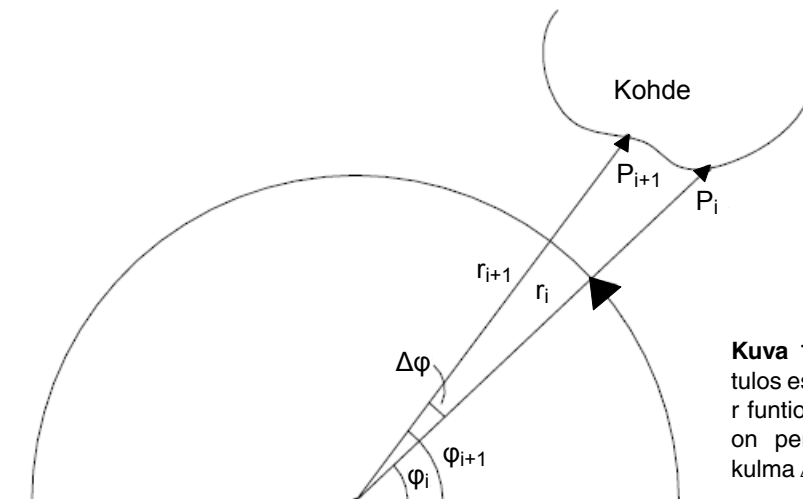
8.2 Laserskannaus

Laserskannerilla tarkoitetaan laitetta, joka lasersäteen avulla mittaa tasossa etäisyyden ympäristössään oleviin kohteisiin. Laserskannaus tai lyhyemmin skannaus on toimenpide, jonka aikana etäisyys mitataan useaan ympäristön kohteeseen poikkeuttamalla säteen lähtökulmaa. Skannaustasolla tarkoitetaan yhden skannauksen aikana lähetettyjen lasersäteiden tasoa. Lasermittaus tai lyhyemmin mittaus on yksittäisen lasersäteen avulla saatu mittaustieto. Yksi laserskannaus koostuu useasta lasermittauksesta ja sen tuloksena saadaan mittausten etäisyystiedot eli skannaustiedot.

Laserskannerissa on pyörivä peilijärjestelmä, jonka avulla lasersäteen lähtökulmaa poikkeutetaan. Peilijärjestelmän pyörähtäessä etäisyys kohteeseen mitataan skannerin kulmaresoluution määrittämällä tiheydellä mittausalueen jokaisessa kohdassa. Näin saadaan aikaan sädeviuhka, jonka tiheys riippuu kulmaresoluutiosta. Yleisimmillä kaksiulotteisilla laserskannereilla kulmaresoluutio on $0,25^\circ \dots 1^\circ$. Kaksiulotteinen skanneri tuottaa etäisyysarvot yleensä kulman funktiona muodossa (yhtälö 1, kuva 11)

$$R = \{(r_i, \varphi) | i = 1, \dots, n\} \quad (1)$$

jossa r_i on etäisyys kohteen pintaan, johon säde i osuu, ja φ on säteen suuntakulma. Käytännössä (r_i, φ_i) on siis mittauspisteen p_i polaariset koordinaatit (Borges ja Aldon 2004).



Kuva 11. Laserskannerin skannaus-tulos esitetään kulman φ ja etäisyyden r funktiona. Skannerin kulmaresoluutio on peräkkäisten mittausten välinen kulma $\Delta\varphi$.

Etäisyyden mittaaminen perustuu kohteeseen lähetetyn lasersäteen heijastumiseen takaisin lähtevään vastaanottoon. Etäisyyden laskemiseksi voidaan käyttää useita vaihtoehtoisia menetelmiä, joista yleisimmät ovat säteen kulku-aikaan perustuva mittaaminen ja sen vaihtoehtoisena perustuva mittaaminen. Etäisyydenmittauksessa on aina mukana kohinaa ε_r , jonka yleensä oletetaan olevan normaalijakautunutta ja nollakeskiarvoista ja jonka varianssi on σ^2 . Mitatun etäisyyden r_m ja todellisen etäisyyden r_v riippuvuusuhde voidaan kuvata kaavalla 2

$$r_m = r_v + \varepsilon_b(r_m) + \varepsilon_r \quad (2)$$

jossa anturin etäisyydenmittauksen systemaattinen virhe on ε_b . Systemaattinen virhe riippuu todellisesta etäisyydestä ja on joka anturilla erilainen. Systemaattinen virhe pyritään poistamaan mitta-laitteen kalibroinnilla (Borges ja Aldon 2004). Kaksiulotteinen laserskanneri mittaa ympäristönsä kohteita yhdessä tasossa skannausalueen kulman ollessa tyypillisesti joko 100° , 180° tai 360° . Kaksiulotteisen skannerin etuina ovat suuri, useiden kymmenien hertsien skannaustaajuus sekä skannaustiedoissa oleva hyödyllisen informaation suuri osuus. Tämä nopeuttaa tiedonkäsittelyä ja laskentaa, minkä johdosta kaksiulotteiset skannerit soveltuvat hyvin reaaliaikaisuutta vaativiin sovelluksiin ja liikkuviin ajoneuvoihin.

Kolmiulotteisissa skannereissa lähteviä valonsäteitä poikkeutetaan kahdessa suunnassa resoluuti- on ollessa usein monikymmenkertainen nopeaan tasoskanneriin verrattuna. Tällä hetkellä mark- kinoilla olevien skannerien näkemä alue voi kattaa vaakatasossa 360° ja pystytasossa jopa 320° (Faro... 2005). Yksi skannaus kestää lähes poikkeuksetta vähintään 60 sekuntia, mikä rajoittaa menetelmän käyttöä liikkuvissa sovelluksissa.

Laserskannerin etäisyydenmittauksessa käytetään täysin samoja menetelmiä kuin tutkassa tai ultra- ääneen perustuvassa etäisyydenmittauksessa. Tutkassa käytetään radiotaajuuksia ja ultraäänianturi taas käyttää korkeataajuisia äänisignaaleja, kun taas laserskannereissa käytetään valon aallonpituuksia, jotka ovat infrapuna-alueella tai hyvin lähellä sitä. Laservalo on monokromaattista ja koherenttia, eli sen aallonpituusalue on hyvin kapea ja säteiden vaihe on kaikilla sama. Lisäksi säteet ovat sa- mansuuntaisia. Tämän takia lasersäteiden tehon kulutus on alhainen suhteessa sen kirkkauteen.

Infrapuna-alueella tehtävään skannaamiseen ei ympäröivä näkyvä valo aiheuta häiriöitä, mutta au- ringosta tuleva infrapunasäteily voi häiritä mittausta. Skannaustuloksen saamiseksi on kohteesta aina heijastuttava takaisin vähintään osa siihen lähetetystä valosta. Tulokseen vaikuttavat laser- säteiden vaimeneminen matkalla ja mitattavan kohteen pinnan heijastusominaisuudet. Jos kohteen pinta on epätasainen, lasersäde siroaa siihen osuessaan. Mitä suurempi etäisyys kohteeseen on, sitä pienempi osuus heijastuneesta säteestä osuu anturiin (Hoffman 2005).

Hankkeen mittauksissa käytetyn 2D-laserskannerin (kuva 12) tärkeimmät tekniset tiedot (Laser... 2007):

- Skannaa 180° kulmaa noin 40Hz taajuudella
- Mittaukset tehdään $0,5^\circ$ välein eli yhteensä 361 mittausta
- Mittausvälin leveys on $0,7^\circ$ astetta
- Mittausetäisyys on 1–80 metriä



Kuva 12. Sick 2D-laserskanneri.
(Kuva: Jari Ala-Ilomäki)

Mittauksissa käytetyn 3D-skannerin (kuva 13) tärkeimmät tekniset tiedot (3D... 2006):

- Mittausalue on 333 astetta vaakatasossa ja 80 astetta pystytasossa
- Skannausnopeus on keskimäärin 5 astetta/s
- Mittauksen keskihajonta (1σ) on 25mm
- Kulmaresoluutio 0,018 astetta
- Syvyyskuvan resoluutio on 2500 x 720 mittausta (270 astetta x 80 astetta) eli noin 0,11 astetta
- Mittaussäteen leveys on 3 mrad (3 m / 1000 m)
- Mittausetäisyys on 2–350 metriä



Kuva 13. Riegel 3D-laserskanneri.
(Kuva: Jari Ala-Ilomäki)

3D-lasermittauksia tehtiin myös 2D-skannereilla poikkeuttamalla skannerin mittaus-tason kulmaa pystysuunnassa sähkömoottorilla ja asentamalla kaksi 2D-skanneria pyörivään kehikkoon 45 asteen kulmassa toisiinsa nähden.

8.3 Kuvantulkinta

Kuvantulkinnassa tai konenäössä liikkuvasta tai paikallaan olevasta kuvasta pyritään tulkintaohjelman algoritmien avulla löytämään ennalta määriteltäviä piirteitä. Tässä tapauksessa liikkuvasta kuvasta pyrittiin löytämään puiden rungoiksi luokiteltavia kohteita. Laskentaa kevennettiin tekemällä aluksi kevyempää kuvan tarkastelua ja keskittämällä tarkempi laskenta ikkunoihin, joissa oletettavasti oli puun runko.

Kuvantulkintaa käytettiin sekä itsenäisesti ja että lasermittauksen tukena puiden paikkoja ja dimensioita mitattaessa. Kuvatulkintaa käytettiin myös puulajitunnistukseen teekstuuri- ja värianalyysiä hyväksi käyttäen.

Paikannusta ja puiden mittauksen tähtävään kuvantulkintaan hankittiin materiaalia FOculus 442C -kameralla, jossa on yksi 1280x960 resoluutioinen CCD-kenno. Puulajitunnistuksessa käytettiin Hitachi HV-F22f-kameraa. Kamerassa on jokaiselle kolmelle pääväreille oma 1360x1024 resoluutioinen CCD-kenno.

8.4 Paikannus

8.4.1 Odometria

Odometrian avulla voidaan määrittää ajoneuvon hetkellinen nopeus ja kääntymiskulma. Tavallisimmin odometriatiedon lähteenä käytetään antureita ajoneuvon pyörien aksleissa tai moottorissa. Koska odometriatietoja lasketaan ajoneuvon sisäisten anturien tiedoista, se ei sinällään ole

riippuvainen ajoneuvon ympäristöstä ja maamerkeistä. Maastolla ja alustalla on kuitenkin suuri vaikutus mittaustarkkuuteen.

Useissa tapauksissa, varsinkin ulkotiloissa ja epätasaisessa maastossa, odometriian avulla saata-va tieto on epäluotettavaa. Tähän on useita syitä, joista yksi liittyy ajoneuvon kinemaattisen liikemallin aiheuttamiin systemaattisiin virheisiin. Odometriatietoja laskettaessa on tärkeää tietää tarkasti ohjauspyörien kulma, akseliväli sekä pyörien säde. Erityisesti ilmatäytteisiä renkaita käytettäessä pyörien säteen arvioiminen on hankalaa johtuen renkaiden kulumisesta sekä ajoneuvon massan muutoksista. Toinen merkittävä vaikutus odometriian epätarkkuuteen on pyörien luisto. Luiston määrään vaikuttavat ajonopeus ja ohjauskulma sekä tietysti alustan pintamateriaali ja kitkakerroin. Etenkin ulkotiloissa epätasaisessa maastossa pyörien luistoa on hyvin vaikea arvioida (Bailey ym. 2000, Tsai ym. 2005). Myös maaston kaltevuudella ajosuunnassa sekä ajoneuvon liiketilalla (kiihdytys/tasainen liike/jarrutus) on suuri vaikutus luistoon. Luiston mittaus edellyttää tietoa ajoneuvon todellisesta etenemisnopeudesta maaston suhteen.

Ajoneuvon paikka voidaan laskea myös merkintälaskun avulla. Merkintälaskulla tarkoitetaan ajoneuvon sijainnin laskemista edellisen sijainnin ja sen jälkeen tietyllä nopeudella tietyssä suunnassa tapahtuneen siirtymän perusteella. Merkintälaskumenetelmässä edellisen ajanhetken paikan epävarmuus yhdessä siirtymän estimoinnista aiheutuvan virheen kanssa kasvattaa laskettavan paikkatiedon epävarmuutta. Näin ollen tätä menetelmää käyttäen paikan epävarmuus kasvaa rajatta ajan funktiona. Tämän takia merkintälaskua ei voi yleensä käyttää ainoana paikannusmenetelmänä vaan se tarvitsee rinnalleen toisen menetelmän, jolla virheen kasvamista voidaan rajoittaa.

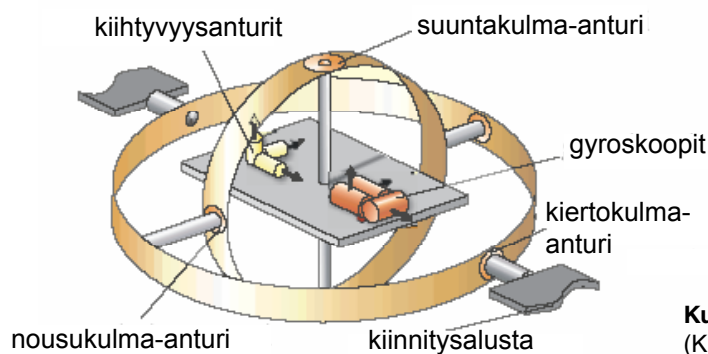
Perinteinen merkintälasku perustuu odometriatietoon. Yksinkertaisella ajoneuvomallilla voidaan odometriatiedoista estimoida ajoneuvon paikka. Tietokoneiden kasvanut laskentateho on kuitenkin tuonut uuden vaihtoehdon merkintälaskun tarvitseman tiedon tuottamiseen. Merkintälasku tehdään aistin pohjaisesti eli laskennan perusteena käytetään ajoneuvon ympäristöä havainnoivien aistimien mittaustietoa.

8.4.2 Inertiayksikkö

Asentoa ja asennon muutoksia voidaan mitata kiihtyvyyssantureiden ja gyroskooppien tai niistä rakennettujen valmiiden inertiyksikköiden (IMU, Inertial Measurement Unit) avulla. Kuuden vapausasteen inertiyksikkö sisältää kolme keskenään kohtisuorasti sijoitettua kiihtyvyyssanturia ja kolme gyroskooppia.

Kukin kiihtyvyyssanturi mittaa hetkellistä kiihtyvyyttä yhden koordinaattiakselin suhteen, jolloin kolmen ortogonaalisen kiihtyvyyssanturin avulla saadaan ratkaistua kiihtyvyyssvektori. Nopeusvektori voidaan ratkaista integroimalla kiihtyvyyssvektoria. Vastaavasti paikkavektori saadaan integroimalla nopeusvektori vielä kerran.

Gyroskooppi on yksinkertaisimmillaan nopeasti pyörivä hyrrä, joka on kardaanisrenkasjärjestelmän sisällä. Nopeasti pyörivä gyroskoopin hyrrä sisältää pyörimisenergiaa ja pyörimismomentin säilymisen ansiosta se pyrkii säilyttämään pyörimisakselin suunnan. Näin saadaan ratkaistua gyroskoopin asentokulman muutosnopeus. Nykyisin käytössä on myös optisia gyroskooppeja, kuten kehälasergyroskooppeja, joissa kaksi lasersädettä kulkee vastakkaisesti suuntiin suljetulla kehällä. Kehän kiertyessä lasersäteiden kulkema suhteellinen matka muuttuu ja lasersäteiden vaiheiden toisiaan vahvistavan ja heikentävän vaikutuksen perusteella lasketaan anturin kulmano-



Kuva 14. Inertiayksikön perusrakenne (King 1998).

peus. IMU-yksikössä olevat kolme gyroskooppiä antavat siis IMU-yksikön kulmanopeuden eri akselien suhteen.

Inertiayksikön perusrakenne on nähtävissä kuvassa 14. Kiihtyvyyssanturit ja gyroskoopit ovat alustalla, jonka asento pysyy vakiona riippumatta kiinnitysalustan asennon muutoksista. Kulma-anturit mittaavat kulmien asentoa suhteessa akselisiin. (King 1998)

Usein IMU-yksiköihin on lisätty magnetometri. Magnetometri antaa asentotietoja tarkkailemalla maan magneettikentän suhteen tapahtuvia muutoksia. Magnetometriä käytetään IMU-järjestelmässä tarkentamaan kiihtyvyyssanturien ja gyroskooppien tietoa. Anturin ollessa paikallaan saattavat kiihtyvyyssanturit ja gyroskoopit ”ryömiä”, jolloin magnetometriä avulla tiedetään anturin asennon pysyvän todellisuudessa vakiona. Magnetometri on herkkä sähkömagneettisille häiriöille, kuten sähkömoottoreiden aiheuttamalle häiriölle (King 1998, Linja 2005).

Hankkeessa käytettiin kahta inertiayksikköä, joista edullisempi laite oli Xsens Technologiesin Motion Tracker MT9-B. Yksikössä on digitaaliset ulostulot kiihtyvyyssanturien laskemille kiihtyvyyksille, gyroskoopeilta saataville kulmanopeuksille sekä magnetometreiltä saataville magneettivuon tiheyksille. IMU-yksiköt eivät kuitenkaan olleet käytössä koko hankkeen ajan.

Orientaatiotieto saadaan IMU-yksiköstä vaihtoehtoisesti joko Eulerin parametreina, Eulerin kulmina tai rotaatiomatriisimuodossa. Kulmanopeuksia integroimalla lasketaan orientaatio. Kulmanopeuksien integroinnissa ilmenevä poikkeama poistetaan kiihtyvyyssantureista sekä magnetometreistä saatavalla absoluuttisella referenssiorientaatiolla. IMU-yksiköstä saadaan tieto ulos vaihtoehtoisesti myös täysin käsittelemättömänä, jolloin yksikkö antaa jokaisen yksittäisen sensorin tiedon yhdessä paketissa. (Motion... 2004, Linja 2005). Toinen käytetty inertiayksikkö oli yhdysvaltalaisen MicroStrainin valmistama 3DM-GX1.

8.4.3 GPS-laitteet

Navstar GPS on Yhdysvaltojen puolustusministeriön kehittämä ja operoima satelliittipaikannusjärjestelmä, jossa tällä hetkellä on 29 satelliittia 20 000 km korkeudessa. GPS-paikannus perustuu siihen, että GPS-satelliitit lähettävät GPS-vastaanottimelle omat ratatietonsa sekä tarkan ajan. Vastaanotin seuraa samanaikaisesti usean eri satelliitin signaalia. GPS-vastaanottimella on ratkaistavana 4 tuntematonta muuttujaa; kolme paikkakoordinaattia sekä vastaanottimen kellovirhe, joten muuttujien ratkaisemiseksi tarvitaan yhteys vähintään neljään satelliittiin. Jos yhteyttä satelliitteihin ei ole, ei paikkaa voi määrittää. Paikannustarkkuus on sitä parempi, mitä enemmän satelliitteja on käytössä ja mitä etäämmällä satelliitit ovat toisistaan. GPS-paikannuksen tarkkuus on tällä hetkellä 10...30 metriä (Everett 1995, Linja 2005).

Euroopan Unionilla ja Euroopan avaruusjärjestöllä on käynnissä yhteinen hanke oman satelliittipaikannusjärjestelmän kehittämiseksi. Galileo-järjestelmän ensimmäinen koekatelliitti laukaistiin joulukuussa 2005, ja koko 30 satelliitin järjestelmän oli määrä valmistua vuonna 2008. Galileo-järjestelmän käyttöönotto on kuitenkin viivästynyt ja varmaa valmistumisaikataulua ei ole vielä tiedossa. Galileo-järjestelmän satelliitit kiertävät maata 23 616 kilometrin korkeudessa. GPS:n ja Galileon lisäksi Venäjällä on alun perin sotilaskäyttöön kehitetty satelliittipaikannusjärjestelmä GLONASS. Tällä hetkellä markkinoilla on jo vastaanottimia, jotka kykenevät vastaanottamaan kaikkien kolmen maailmanlaajuisen järjestelmän signaaleja (Linja 2005).

Mittausjärjestelmään kuului kaksi GPS-vastaanotinta sekä DGPS-vastaanotin. Samanaikaisesti käytössä oli kaksi vastaanotinta, jotta niiden antamia tuloksia oli mahdollista vertailla. Käytetyt GPS-vastaanottimet olivat Taiwanilaisen Haicom Electronicsin HI-240E-malleja. Vastaanottimet liitettiin USB-väylän välityksellä tiedonkeruutietokoneeseen ja tiedonsiirtonopeus oli 4,8 kb/s. Vastaanotin lähetti tiedot kerran sekunnissa. Tiedot pitivät sisällään muun muassa paikan, nopeuden, suunnan, havaittujen satelliittien lukumäärän sekä tiedon hyvyysarvion. Kuten IMU-yksiköidenkin kohdalla myöskään kahta vastaanotinta ei käytetty koko hankkeen ajan.

8.5 Mittausalusta

Mittausalustana toimi TKK:n Automaatiotekniikan laboratorion Honda-maastomönkijä. Ajoneuvo varustettiin tutkittavilla sensori- ja aistintiedonkeräyslaitteilla (kuva 15). Mönkijä oli periaatteessa hyvin maastokelpoinen, mutta aikaisemman varustelun jäljiltä jääneet mittauslaitteet, mönkijän tarpeettoman nopea voimansiirron välityssuhde ja mittauslaitteiden suuri määrä hankaloittivat ajamista. Edelleenkehittelyn jälkeen ajoneuvolla voitaisiin ajaa hyvinkin hankalissa maastoissa samalla 2D- ja 3D-laserskannaustietoa, kuvasarjoja ja muita mittaussignaaleja tallentaen.



Mönkijän mittausalustaan kiinnitettiin Sick 2D -laser, Riegl 3D -skanneri, GPS-paikannusvarustus sekä rakennettiin IMU- ja merkintälaskuvarustus, jolloin sillä voi kokeilla joustavasti erilaisia sensoryyhdistelmiä. Aistisignaaleja ja sensorifuusion toimintaa tutkittiin vain jälkikäteen off-line-tilassa. Virransyöttöä varten mönkijään rakennettiin 12V- ja 24V-tasavirtajärjestelmät erillisine akkuineen.

Kuva 15. Mönkijä varustettuna 2D laserskannerilla, 3D laserskannerilla, GPS:llä, IMU:lla ja kameralla. (Kuva: Jari Ala-Ilomäki)

9 Mittaustiedon kerääminen

9.1 Kokeet mönkijällä

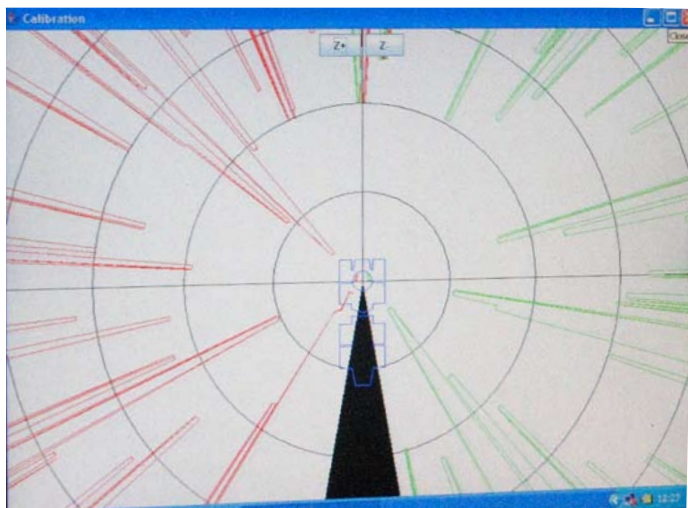
Metsäkoeajoja suoritettiin erityyppisissä metsissä. Ajoreitti pyrittiin sijoittamaan mahdollisimman tasaiseen maastoon, jotta lasersäteiden osumien korkeusvaihtelu puunrungossa pysyisi mahdollisimman vähäisenä. Toisin sanoen skannaustaso rungossa pyrittiin pitämään vakiona koko mittauksen ajan. Käytännössä mittausajot suoritettiin yleensä ajamalla lenkki siten, että pyrittiin palaamaan lähtöpisteeseen. Tämä helpotti paikannustietojen ja tarkkuuden vertauksia.

9.2 Kokeet harvesterilla

2D-lasertutkilla mittaustietoa kerättiin myös yksioteharvesterikoeajolla. Harvesterimittauksissa käytettiin aina kahta skanneria, jotka kiinnitettiin harvesterin puomin sivuille jalustaan siten, että niille saatiin mahdollisimman hyvä näkyvyys puustoon (kuva 16). Uusimpien 2D-laserskannerien avulla voitaisiin kaksi skanneria korvata yhdellä laajakulmaskannerilla. Uudet laajakulmaskannerit eivät kuitenkaan ehtineet testiin ennen hankkeen loppumista. Esimerkki mönkijässä ja harvesterissa käytetystä skannerinäytöstä on esitetty kuvassa 17. Näytön kuva muodostuu kahden skannerin kuvasta siten, että vasemman skannerin peitto on punaisella ja oikean vihreällä. Kohdissa joissa esiintyy tihentynyttä piirtoa, on puu tai muu heijastuksen aiheuttava este.



Kuva 16. 2D-laserskannereilla varustettu Ponsse Cobra HS-10 yksioteharvesteri. (Kuva: Jari Ala-Illomäki)



Kuva 17. Harvesterimittauksissa käytetty skannerinäyttö. (Kuva: Jari Ala-Illomäki)

10 Mittaustulokset ja niiden tarkastelu

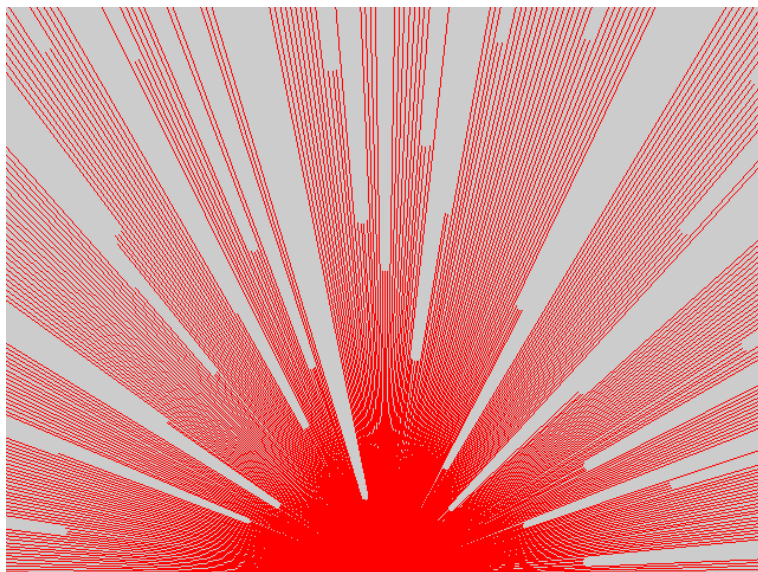
10.1 2D-laser

Säättekijöistä laserskannerin yksittäisen säteen heijastumiseen takaisin skanneriin ulkotiloissa vaikuttaa auringonvalon määrä ja ilman kosteus. Jos ilma on sateinen tai sumuinen, heikentävät ilmassa olevat vesipisarat lasersädettä, jolloin suurin havaitsemisetaisyys pienenee. Tämä saattaa johtaa mittaustuloksen menetykseen lähellään olevista kohteista. Auringon säteilystä yli puolet on infrapunasäteilyä, josta osan aallonpituus on sama kuin tässä työssä käytettävän laserskannerin käyttämä aallonpituus 902 nm. Tämän takia laserskannerilta saatava mittausvarmuus on sitä parempi, mitä vähemmän auringonvaloa ympäristössä on.

Suurin vaikutus mittaustuloksen saamiseen ja lasersäteen takaisin heijastumiseen on kuitenkin mitattavan kohteen pinnan laadulla ja muodolla. Lasersädettä vastaan kohtisuorasta pinnasta säde heijastuu lähes poikkeuksetta takaisin riittävän voimakkaana. Lieriönmuotoisesta puunrungosta vain pieni osa on kohtisuorassa mittaussuuntaan nähden. Mitä suurempi on kohteen pinnan normaalin ja lasersäteen välinen kulma, sitä pienemmällä todennäköisyydellä kohteen pintaan heijastettu säde heijastuu riittävän voimakkaana takaisin säteen heijastussuuntaan. Epätasainen pinta parantaa heijastumisen todennäköisyyttä, koska pinnassa olevat epätasaisuudet saavat aikaan paikallisia kohtisuoruuksia lasersäteen suhteen.

Yksittäisen puunrungon halkaisijaa laskettaessa on tärkeä tietää miten lasersäde heijastuu mitattavan puulajin rungosta. Tämän takia on selvitettävä, kuinka suuren osan 0,7 asteen säteestä on osuttava puunrunkoon, jotta säde heijastuisi riittävän vahvana takaisin skanneriin ja tuottaisi etäisyysmittaustuloksen. SICK-laserskannerin säde heijastuu muovisesta rumpuputkesta takaisin skanneriin, kun vähintään puolet säteestä osuu putkeen (Selkäinaho 2002). Skannerin tarvitsema kohteen vähimmäispeitto yhdestä lasersäteestä voidaan määrittää, kun tunnetaan kohteeseen tietyille etäisyydelle osuvien säteiden määrä. Puunrungon halkaisija on tunnettava, jotta tiedetään, kuinka suuressa kulmassa runko näkyy tarkastelupisteeseen tietyllä etäisyydellä. Laserskannerin näkemä kulma lasketaan runkoon osuneiden säteiden määrän ja rungon etäisyyden perusteella. Etäisyytenä käytetään pienintä etäisyyttä, jolla kohteeseen osuu tietty määrä keiloja. Vertaamalla todellista ja laserskannerin näkemää kulmaa keskenään saadaan ratkaistua, kuinka suurelta osin reunimmaisat kohteeseen osuneet säteet ovat osuneet kohteeseen.

2D-laserskanneri muodostaa kuvan 18 mukaista raakadataa ympäristöstään. Kyseisessä tiedossa harmaat alueet esittävät saavuttamattomissa olevaa katealuetta ja punaiset lasersäteille vapaata aluetta. Säteen kimmotessa takaisin skanneriin on sen edessä este. Esteen etäisyys voidaan laskea säteen käyttämän kulkuajan avulla. Esteen havainnointi hahmoksi tehdään validoinnin avulla. Käytännössä validointi tehdään skannerikuvasta pysäytetyn rasterikuvan avulla pikselianalyysillä. Jos analyysissa havaitaan useita pisteitä vierekkäin, voidaan pisteryhmistä klusteroida kohteita. Kohteista haetaan puun muotoon sopivia hahmoja. Hahmo/kohde validoidaan testaamalla sitä useilla eri kriteereillä. Puun malliin sopivat klusterit hyväksytään piirteiksi jatkokäsittelyä varten. Validointivaiheen jälkeen käsiteltävänä on vain pieni osa kaikista mittauspisteistä, tyypillisesti enää 30...50 % alkuperäisistä.



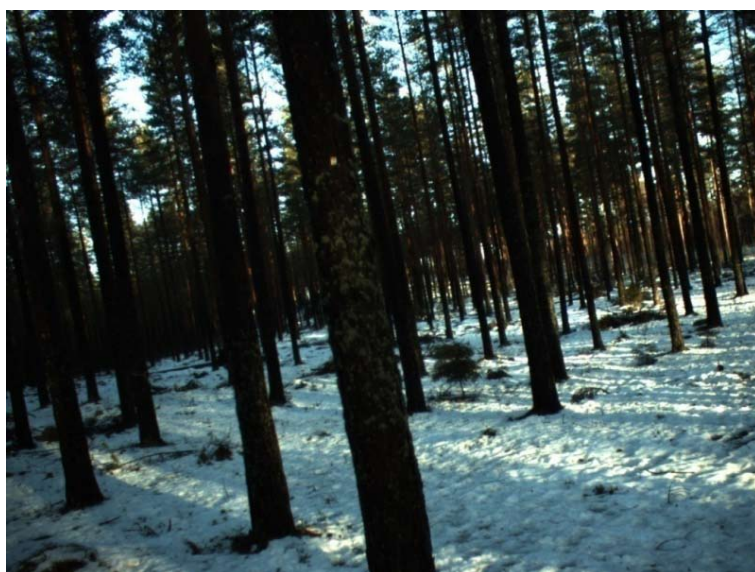
Kuva 18. Sick 2D-skannerin tulkitsematon raakakuva.

10.1.1 Laserskannerin kuvan validointi

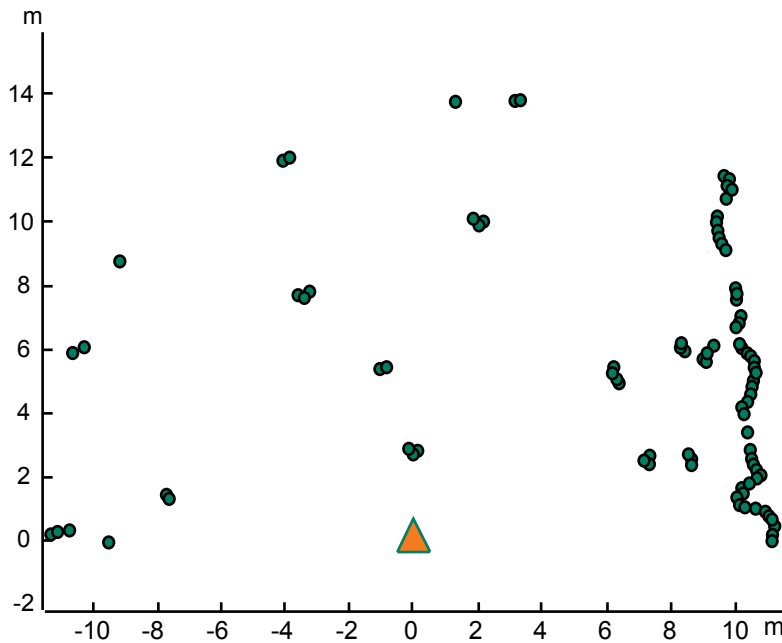
Kuvassa 19 on esitetty FORESTRIX-järjestelmän kameran ottama kuva metsästä. Kuvasta huomataan, että mittausalusta ei ole ollut kuvanottohetkellä vaakatasossa. Kuvasta on havaittavissa helposti ainakin neljä puunrunkoa, jotka ovat enintään 15 metrin etäisyydellä. Klusterointi- ja validointimenetelmiä demonstroidaan seuraavassa kamerakuvan kanssa samanaikaisella laserskannaustiedolla.

IMU-yksikön ja GPS-vastaanottimen avulla voitiin päätellä mönkijän paikka ja kulma validoitaviin kohteisiin nähden. Laitteilta saatavilla parametreilla voitiin poistaa kohteista esimerkiksi laserin maastoheijastumia.

Kuvasta 20 voidaan nähdä kuvan 19 alue skanneritietona. Kuviin on lisätty koordinaatisto havaintojen paikantamisen avuksi. Tietoa ei ole vielä tässä vaiheessa käsitelty mitenkään.



Kuva 19. FORESTRIX-järjestelmän kameran ottama kuva koealueena toimineesta metsästä.

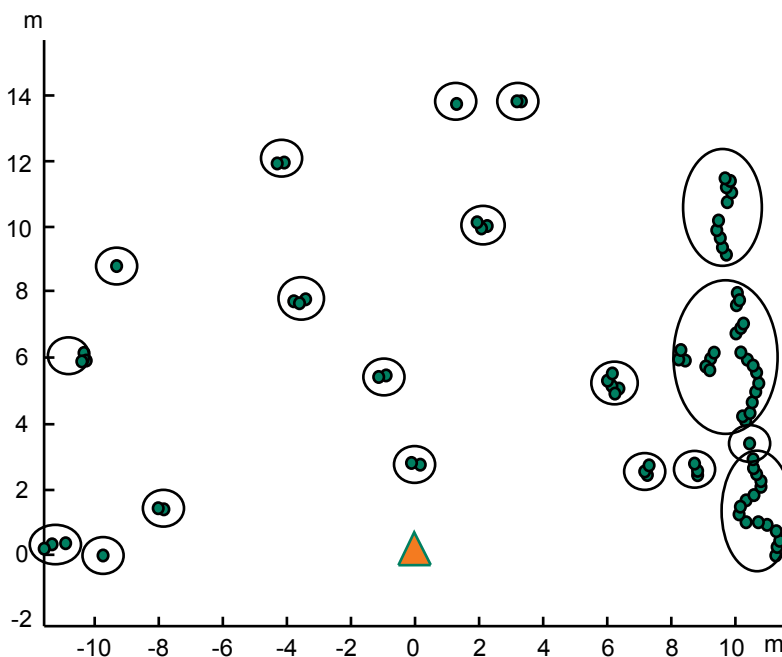


Kuva 20. Viiteentoista metriin rajattu skannaustieto, joka vastaa kuvan 12 aluetta. Mittalaitteen paikka on merkitty kolmiolla.

Kameran kuvassa havaittu mittausalustan kallistuma on helposti havaittavissa myös laserskannauskuvassa. Kuvan oikealla reunalla noin kymmenen metrin kohdalla mittauspisteet muodostavat pitkän ketjun. Tämä johtuu siitä, että skannaustaso on ollut vinossa ja skanneri on saanut havaintoja maan pinnasta. Mittaustiedosta on erotettavissa puun rungoista saatuja usean pisteen joukkoja, jotka ovat kaaren muodossa useiden metrien etäisyydellä toisistaan.

Seuraavaksi skannaustieto jaetaan klustereihin (kuva 21), jotka käydään yksitellen läpi. Klusterista määritetään karkeasti kevyillä menetelmillä kohteen muoto. Sallituiksi kohteiksi käyvät piirteiltään ympyrän kaaren muotoiset ja sopivat kokoiset muodot.

Käytetty validointialgoritmi tekee klusterille erilaisia testejä, joissa se käyttää kuutta kriteeriä klusterin hyväksymiseen: koko klusterin kaarevuuden minimi- ja maksimiarvoja, yksittäisen pisteen kaarevuuden minimiarvoa, klusterin mittauspisteiden vähimmäismäärää, klusterin suurin-

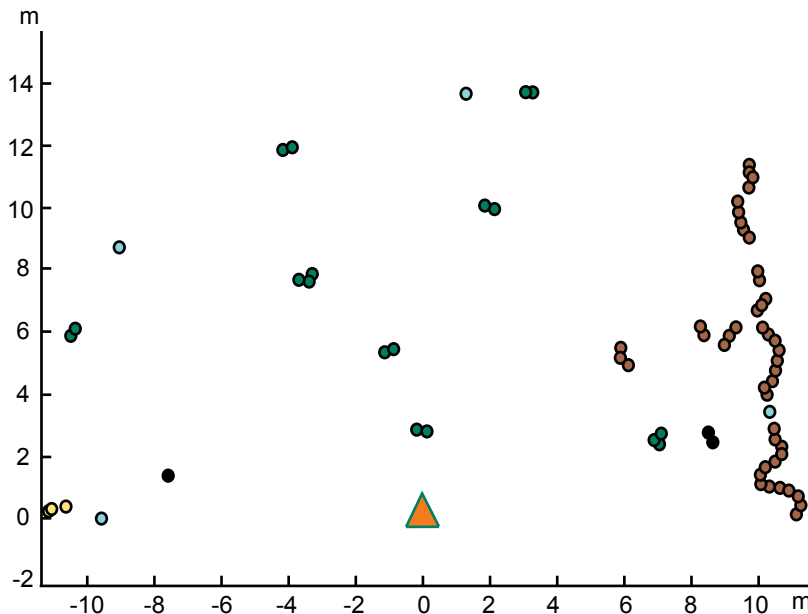


Kuva 21. Klusterialgoritmin tekemät klusterit. Yksittäiset puut on helppo erottaa. Maan pinnasta tulleet heijastumat oikeassa laidassa on erotettu kolmeen suureen klusteriin.

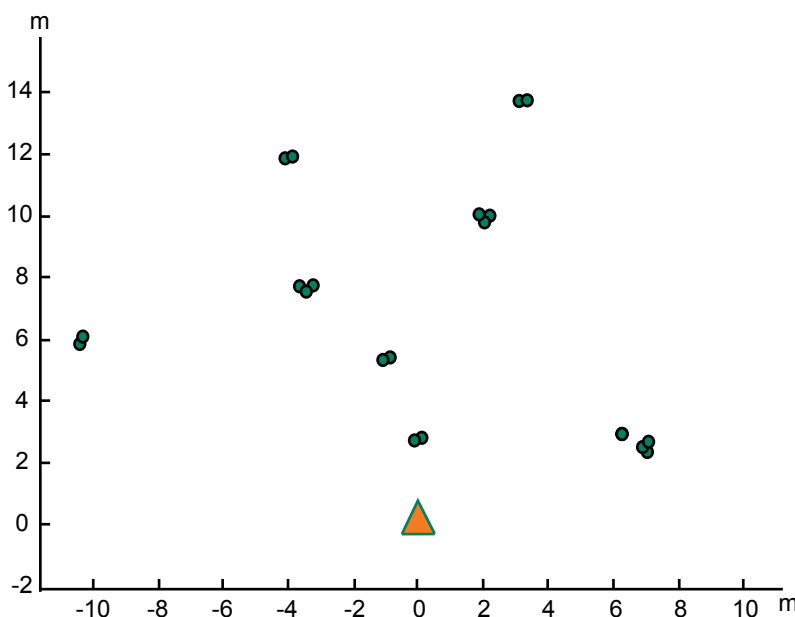
ta hyväksyttävää leveyttä sekä pienintä hyväksyttävää syvyyttä. Klusterissa on oltava vähintään kaksi pistettä. Poikkeuksen muodostaa tilanne, jossa on useamman skannaustiedon pisteitä. Tällöin klusterissa on oltava vähintään yksi mittauspiste jokaista skannausta kohden. Leveys saa olla enintään 0,4 metriä. Syvyyden on oltava vähintään 0,01 metriä ja enintään kohteen leveyden verran. Koska etsittävien kohteiden muoto on syvyys- ja leveysuunnassa pyöreä, nähdään laserskannerilla alle puolet mitattavasta kohteesta.

Puurunkojen lopulliseen validointiin käytettiin reunapistemenetelmää ja/tai pienimmän neliösumman menetelmää. Laskentatapojen toimintaa on selitetty tarkemmin luvuissa 10.1.2 ja 10.1.3. Kuvassa 22 nähdään, kuinka vihreällä merkityt pisteet on hyväksytty puiksi, ruskea on liian suuri piirre, musta merkitsee väärää kaarevuusarvoa, vaaleansinisellä merkityissä piirteissä on liian vähän pisteitä ja keltaisella merkityn piirteen syvyys on väärä.

Kun edellä mainittujen kriteerien perusteella valitaan hahmoista ne, jotka edustavat puita, päästään iteroinnin lopputulokseen eli syntyneeseen puukarttaan (kuva 23).



Kuva 22. Validointialgoritmin tulos.



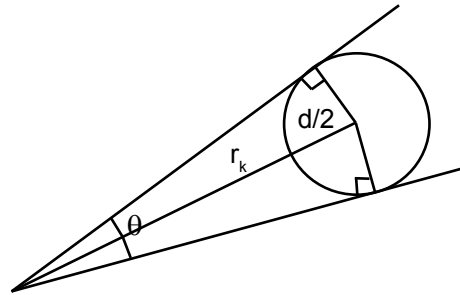
Kuva 23. Skannaustiedosta erotetut piirteet, jotka edustavat löydettyjä puita.

10.1.2 Reunapistemenetelmä

Reunapistemenetelmässä ympyrän parametrien arvojen määrittäminen voidaan tehdä käyttäen sen reunan määrittävien säteiden kulma-arvoja ja havainnointipistettä lähimmän pisteen etäisyyttä (kuva 24). Ympyrän halkaisija d lasketaan kaavalla 3

$$d = 2r_k \frac{\sin \frac{\theta}{2}}{1 - \sin \frac{\theta}{2}} \quad (3)$$

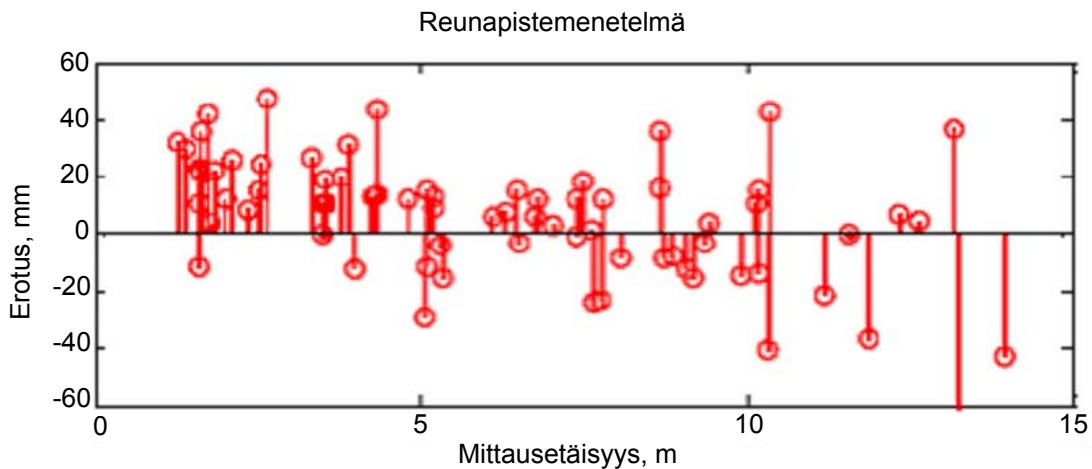
jossa r_k on lyhyin etäisyys kohteeseen ja θ piirteen näkymän kokonaiskulma.



Kuva 24. Ympyrän halkaisija sekä sen määrittämiseen käytetyt säteet. Ympyrän arvot ratkaistaan reunan sekä lähimmän pisteen määrittävien säteiden avulla (Bailey ja Nebot 2001).

Menetelmä on laskennallisesti kevyt ja erinomaisen käyttökelpoinen, koska siinä ympyrää ei yritetä sovittaa kaikkien siihen kuuluvien pisteiden avulla. Näin vältetään virheellisiltä tuloksilta ja ympyrän keskipisteen sijainnin epätarkkuus pienenee. Toisaalta se, että kaikkia mittauspisteitä ei käytetä, aiheuttaa tulokseen myös virhettä. Algoritmia käytettäessä oletetaan, että löydetty lyhyin mittauspiste on kaaren keskimäinen piste. Halkaisijan laskennassa tällä ei ole niinkään vaikutusta, mutta keskipisteen paikkaan saattaa tulla virhettä.

Kuvan 1 (s. 16) aineistossa laserskanneriin perustuvan mittausjärjestelmän ja manuaalisen kontrollimenetelmän läpimitan erotuksen itseisarvon keskiarvoksi reunapistemenetelmällä saatiin 18 mm ja erotuksen keskihajonnaksi 14 mm (kuva 25).



Kuva 25. Reunapistemenetelmällä mitattujen puiden läpimitan erotus verrattuna käsin mitattuun referenssiaineistoon.

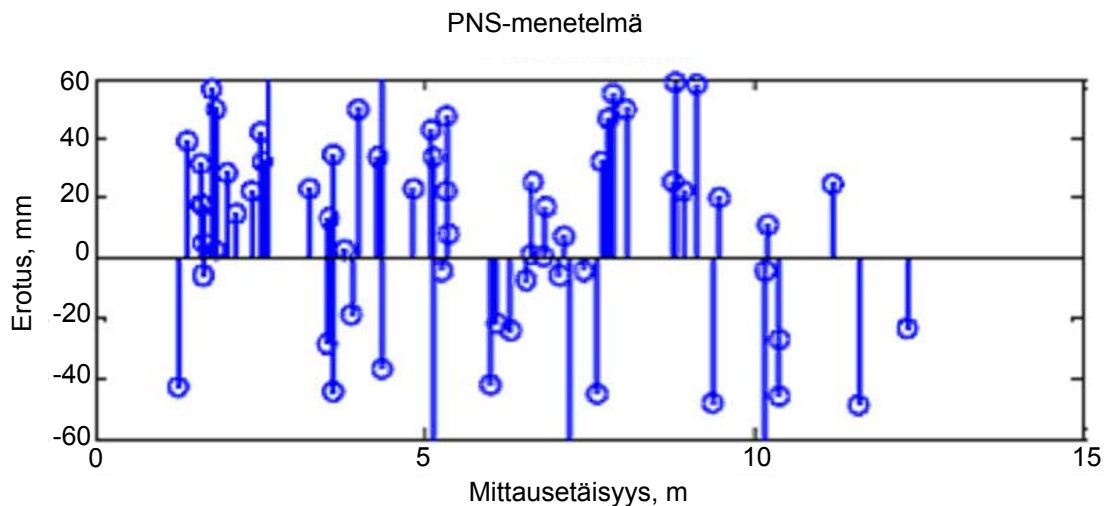
10.1.3 Pienimmän neliösumman menetelmä

Pienimmän neliösumman menetelmä (PNS-menetelmä) on matemaattisen optimoinnin menetelmä, jolla pyritään löytämään aineistolle paras sovite. Pienimmän neliösumman menetelmässä minimoidaan residuaalien eli sovituksen ja aineiston pisteiden erotuksen neliöiden summaa.

PNS-menetelmässä jokaisesta piirteestä mitataan vähintään kolme pistettä. Pisteiden määrä vaikuttaa tällä menetelmällä laskettuihin tuloksiin enemmän kuin reunapistemenetelmällä lasketuna. Tämä johtuu siitä, että reunapistemenetelmässä käytetään ainoastaan kolmea pistettä, kun taas PNS-menetelmä sovittaa ympyrän kaikkien saatavilla olevien pisteiden mukaan (Taylor ja Probert 1996).

PNS-sovitus on matemaattisesti reunapistemenetelmää tarkempi, mutta ongelmaksi muodostuu puista saatavien mittauspisteiden pieni määrä. Metsässä alle viidentoista metrin etäisyydellä oleviin puihin osuu keskimäärin 5 mittauspistettä, mikä ei riitä tälle menetelmälle. Lähellä oleviin puihin osuu luonnollisesti enemmän lasersäteitä, mutta suuri osa puista jää kuitenkin ajoreitiltä sen verran kauas, että niihin osuneiden säteiden määrä on useimmiten 3 tai 4. Lähellä olevien puiden sovituksessa voidaan käyttää PNS-menetelmää ja kauempana olevat puut voidaan sovittaa reunapistemenetelmällä. Peräkkäisiä skannaustietoja yhdistettäessä saadaan kustakin puusta suurempi pistejoukko, vaikka puut eivät olisikaan aivan lähellä mittalaitetta.

PNS-menetelmällä laskettujen läpimittatietojen erotus referenssimittauksista oli suurempaa kuin reunapistemenetelmässä. Verrattuna käsin mitattuun aineistoon mittaustukosten erotuksen itseisarvon keskiarvoksi saatiin 31 mm ja keskihajonnaksi 21 mm (kuva 26).



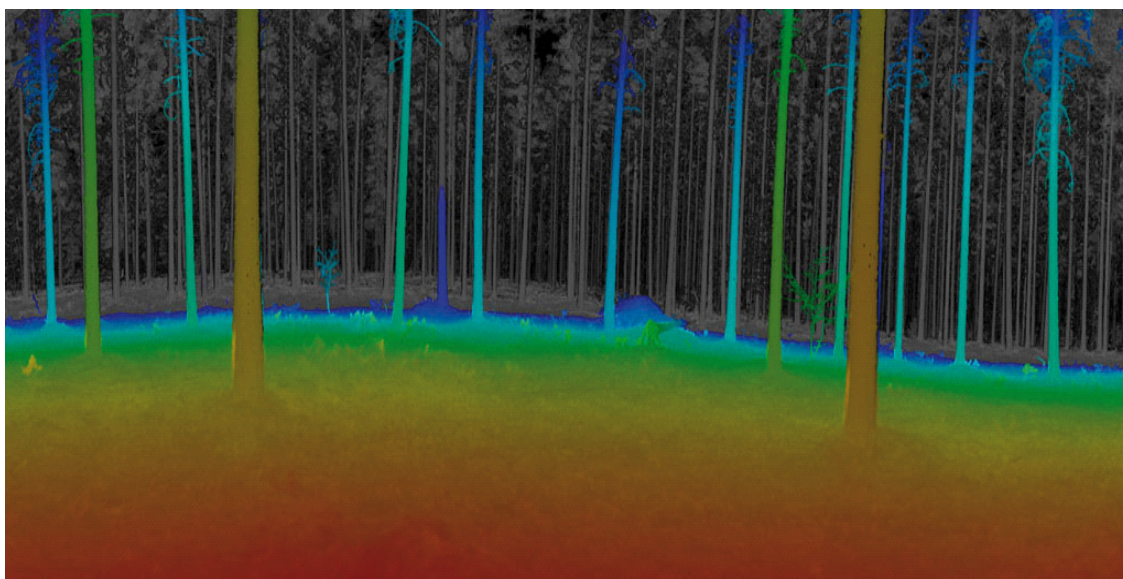
Kuva 26. PNS-menetelmällä mitattujen puiden läpimitan erotus erotus verrattuna käsin mitattuun referenssiaineistoon.

10.2 3D-laser

3D-laserilla saadaan kuvan 27 mukaista raakadatakuvaa metsiköstä. Lisäyksenä 2D-kuvaan on mukaan saatu pysty akselin (Y-akselin) tieto ympäristöstä. 3D-skannerin mittaukseen kuluttama aika on kuitenkin kulmaresoluutiosta riippuen useita minutteja/paikka/kuva, joten sitä ei voida vielä käyttää itse puukartan tekemiseen tässä aiotussa sovelluksessa. Tutkimuksen aikana 3D-skannerilla tehtiin kuitenkin referenssimittauksia. 3D-skannerin kuvassa näkyy suhteellisen tarkasti siellä olevat puut ja muut kohteet. Puiden paikat ja runkojen halkaisijat pystytään myös laskemaan varsin tarkasti 3D-kuvasta, jolloin tietoja voidaan verrata samalla paikalla suoritettun 2D-laserskannauksen tietoihin.

Mittausetäisyys on kahdesta metristä aina 350 metriin saakka. Suurin mittausetäisyys on siis huomattavasti käytössä ollutta 2D-skannerin vastaavaa suurempi. SICK:n skanneriin verrattuna $0,018^\circ$ kulmaresoluutio on myös täysin eri luokkaa. Hinnaltaan tämän tasoiset 3D-laserit ovat vielä huomattavan kalliita.

Hankkeen edistyessä Riegelin 3D-laserin käytöstä luovuttiin ja 3D-mittaukset tehtiin muunnetuilla Sick 2D-lasereilla.



Kuva 27. 3D-skannerin skannerikuva. Havainnot on värikoodattu etäisyyden mukaan.

10.3 Kvantulkinta

Yhtenä hankkeen tavoitteena oli yhdistää lasertutkien käyttöön kuvantulkintaa. Vaikka ympäristössä olevien kohteiden etäisyyksien mittaamiseen laserskanneri soveltuu hyvin, ongelmia aiheuttaa pienen näytteenottotaajuuden varjopuolena oleva huono kulmaresoluutio. Useimmiten pelkkä laserskanneri ei ollutkaan riittävän tarkka ympäristön tarkkaan havainnointiin. Parempi ja monipuolisempi käsitys ympäristöstä saatiin käyttämällä samanaikaisesti useita eri aistimia.

Pelkkä kamerakaan ei ole aina riittävä reaaliaikaisissa sovelluksissa. Guivant ym. (2000) vertailivat kamerajärjestelmän ja laserskannerijärjestelmän toimintaa karttapohjaisessa paikannustehävässä. Tutkimuksessa tarkasteltiin paikannuksen virheen suuruutta sekä järjestelmien robus-

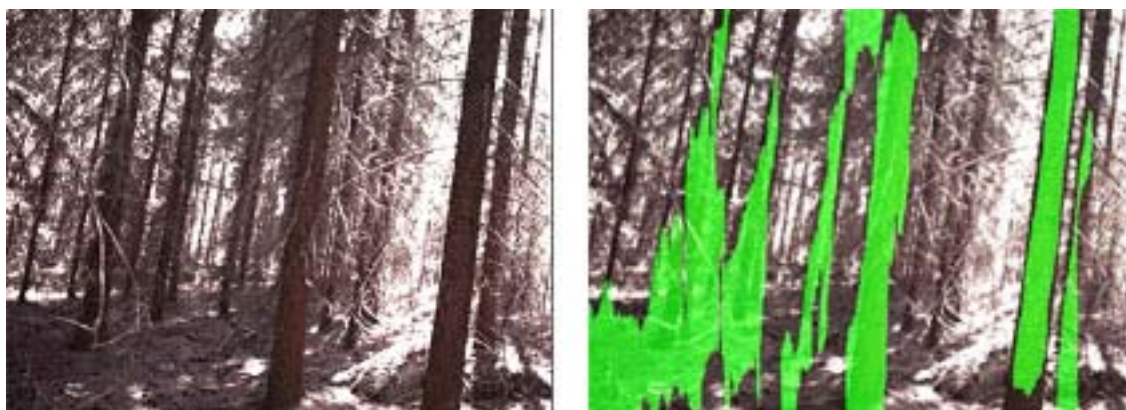
tisuutta. Paikannuksen tarkkuudessa ei kamera- ja skanneripohjaisen järjestelmän välillä ollut havaittavaa eroa. Kuvankäsittelymenetelmien monimutkaisuus heikensi kuitenkin kamerapohjaisen järjestelmän luotettavuutta laserskannerimenetelmiin verrattuna (Pérez, Castellanos, Montiel, Neira ja Tardós 1999).

Kuvantulkinnassa (Kannas 2006) käytettiin mm. homomorfasta suodatusta, pystysuoraa Fourier-suodatusta sekä erilaisia reunantunnistusalgoritmeja. Kuvantulkinnan testauksen jälkeen havaittiin, että nykyinen kuvantulkinta ei ole riittävän kehittynyt erottelemaan metsästä puiden runkoja. Kamerakuvan tulkinta ei parantanut lasermittauksen läpimitta-arvion tarkkuutta. Kuvista haettavat kohteet ovat liian usein epäselviä ja monimuotoisia, jotta runkotunnuksia voitaisiin löytää. 30 % tapauksista tarkasteltava kuvanosa ei osunut kunnolla puun rungon kohdalle. Toinen kuvantulkintaa rajoittava tekijä on algoritmien laskennallinen raskaus nykyisille tietokoneille.

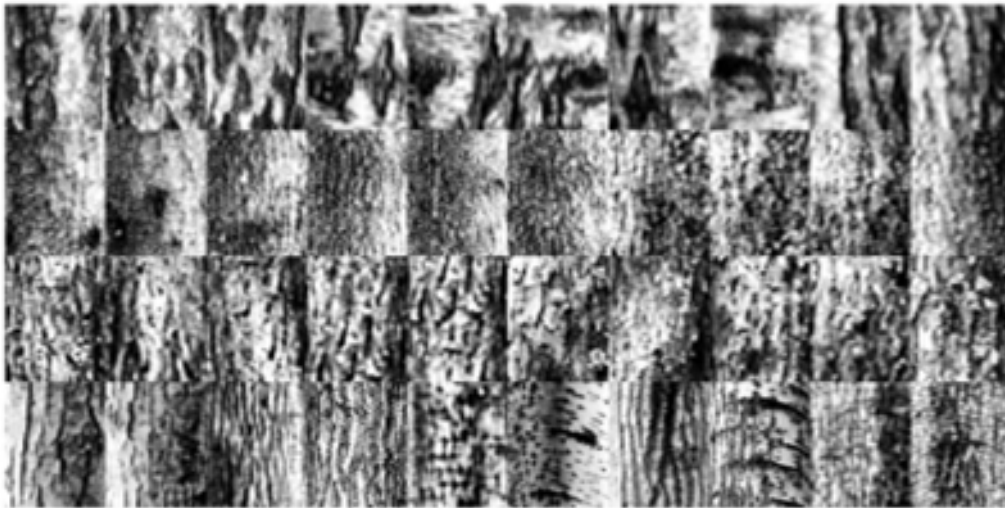
Kuvassa 28 nähdään kuinka kuvantulkinta-algoritmeilla on yritetty löytää runkoja kuusikosta otetusta vasemman puoleisesta kuvasta. Oikean puoleisesta kuvasta nähdään, että algoritmi on löytänyt vain kaksi varmaa runkotunnuksiin sopivaa runkoa (2. ja 3. hahmo oikealta lukien). Kuvan vasemman reunan tunnistustulos on hajanainen ja yksittäisiä muotoja ei voida eristää taustakuvasta. Kuvan esimerkin tapaus on tyypillinen vähänkin vaikeammassa puustokohteessa. Mikäli puustokohde on selkeäpiirteinen, kuten kuvassa 31 (s. 41), niin kuvantunnistuksella päästään kuitenkin jo nyt hyviin tuloksiin.

Kuvantunnistuksen tavoitteena oli myös männyn, kuusen, koivun ja haavan puulajin tunnistus metsässä, jolloin puulajitieto olisi mahdollista yhdistää puukarttaan automaattisesti. Puulajin automaattisen tunnistuksen vaikeuksiksi havaittiin liike, esteet, valaistuksen vaihtelevuus, ominaisuuksien vaihtelu puulajin sisällä ja toisaalta eri puulajien samankaltaisuudet etenkin puun tyvellä. Kuvassa 29 nähdään esimerkkejä puurungon tai puulajin kuvantunnistuksen vaikeudesta. Jopa ihmisen on vaikea tunnistaa puulajit kuvasta pelkästään kuoresta otetun valokuvan perusteella. Kososen (2007) kuvaamassa järjestelmässä kyseisen kuvan tunnistamiseen käytettiin väri- ja tekstuurialgoritmeja, jälkimmäisiä kuutta eri tyyppiä. Tulkittava alue valittiin kuvista manuaalisesti, jotta huono kohdistaminen ei olisi vaikeuttanut tulkintaa.

Algoritmien toiminnalle tärkeiksi tekijöiksi havaittiin kameran vakaus, kuvan skaala sekä rotaatio ja intensiteetin muutokset. Kuvina käytettiin sekä histogrammitasoitettuja harmaasävykuvia, että täysivärikuvia. Jokaisesta RGB-kanavan histogrammista laskettiin odotusarvo, keskihajonta ja huipukkuus. Sama tehtiin myös värikuville.



Kuva 28. Puiden runkojen kuvantunnistusta väljennysshakkuuvaiheen kuusikossa, jossa on kuivia alaoksia (Visala ym. 2006).



Kuva 29. Puulajin tunnistamisen vaikeus pelkän rungon valokuvan avulla (Kosonen 2007).

Värikuville tehtiin värianalyysi, jonka seurauksena saatiin yhteensä 54 reaalilukua sisältävä piirrevektori. Tämä yhteensä 30 tekstuuriarvoa ja 24 tilastollista suuretta kuvaavan vektorin avulla pyrittiin kuvasta hahmottamaan muotoja tai säännönmukaisuuksia. Lyhyen testauksen jälkeen 54 piirteen sijasta siirryttiin käyttämään 16 arvoa sisältävää piirrevektoria.

Tuloksena kaikissa vektorikokeissa havaittiin, että mikään yksittäinen kuva-analyysimenetelmä ei ole riittävän luotettava puulajin varmaan tunnistamiseen. Yhdistämäanalyysillä ja sensorifuusiolla päästään kuitenkin yllättävän hyvään, yli 80 % luokittelutarkkuuteen selväpiirteisissä puusto-kohteissa. Tulosten perustella voidaankin todeta, että aiheen perustutkimusta tarvitaan lisää. Koneenäkö tutkimusalue ei ole vielä kypsä vapaisiin olosuhteisiin.

10.4 Paikannus

Puiden parametrien määrittämisen lisäksi toinen tämän tutkimuksen painopistealue on paikannus. Onnistuneen paikannuksen avulla voidaan löydettyjen puiden tiedot siirtää koealaa kuvaavaan puukarttaan. Ilman paikannusta voidaan ratkaista ainoastaan puiden sijainti suhteessa laserskanneriin. Laserskannerin paikka paikallisessa koordinaatistossa on tunnettava, jotta puiden sijainnit voidaan kiinnittää.

Eräs robotiikassa yleisesti tunnettu ongelma liittyy paikannukseen tuntemattomassa ympäristössä. Oma paikka ei voi määrittää ilman tietoa ympäristössä olevien kohteiden sijainnista. Ympäristön kohteiden sijainteja ei kuitenkaan voida määrittää ilman tietoa omasta paikasta. Ratkaisuna on toteuttaa sekä paikannusta että kartoitusta samanaikaisesti tai käytännössä vuorotellen pieninä askelina. Tästä lähestymistavasta käytetään nimitystä SLAM (Simultaneous Localization And Mapping). Tässä tutkimuksessa toteutettu paikannusmenetelmä ja FORESTRIX-projektissa tämän rinnalla toteutettu piirrepohjainen paikannusmenetelmä toimivat SLAM-periaatteella.

11 Järjestelmän toimivuus vaihtelevissa metsikköoloissa ja mittavirheiden lähteet

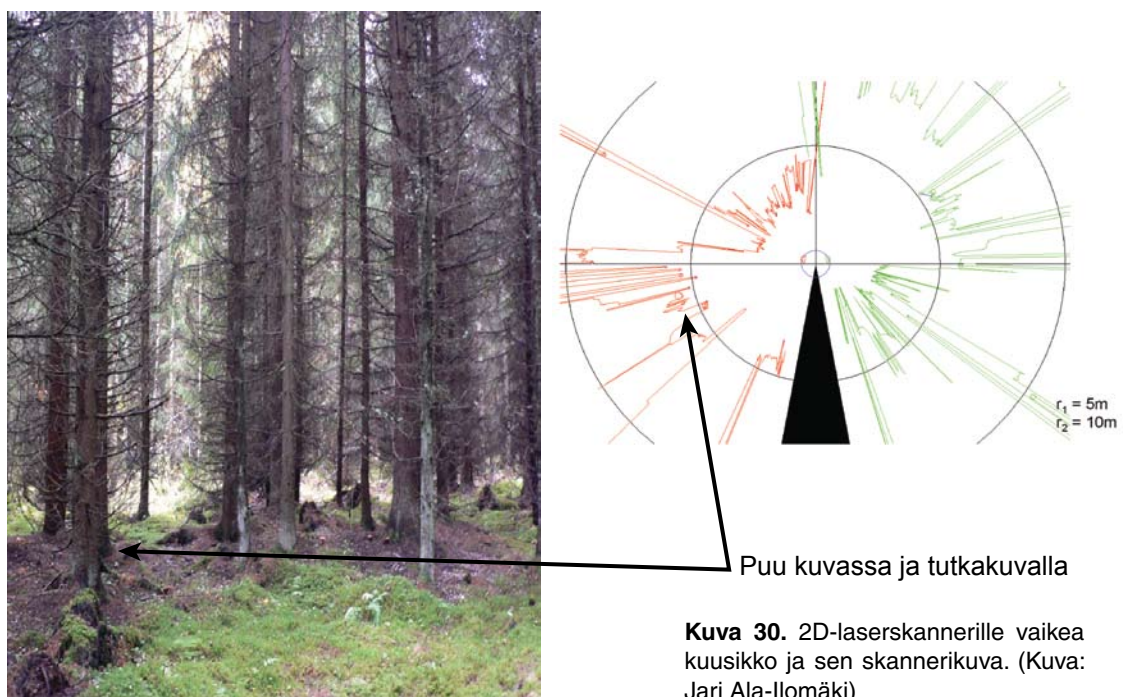
11.1 2D-laserin toimivuus ja virhelähteet

Validointialgoritmin tulos riippuu kohteen selkeydestä. 2D-laserskannerin toimivuus oli hyvä metsiköissä, joissa ei ollut haittaavaa aluskasvustoa tai alaoksia. Hankkeen lopussa laitteen todellista kykyä toimia kuvan 30 harvennuskusikossa kokeiltiin, ja varsinkin alaoksat tekivät runkojen paikannuksesta lähes mahdotonta.

Skannerikuvasta nähdään että algoritmi on löytänyt kuvasta vain kaksi puuksi tunnistettavaa pyöreää kohdetta. Kuva on skannattu kahdella skannerilla, joista toinen oli suunnattu vasemmalle ja toinen oikealle. Huono tulos johtui voimakkaista oksaheijastumisista. Toinen laserin toimintaa vaikeuttava tekijä on maastonmuodoista johtuvat heijastukset. Lasersäteiden väärien kimmokkeiden määrän vähentyessä mittaustulos paranee. Vääriä kimmokkeita ja kaikuja aiheuttaa metsässä lähinnä oksaisuus, alikasvusto ja puuston eri-ikäisyys. Eniten ongelmia aiheuttaa oksaisuus. Voidaankin todeta, että skannerin puurunkojen erotuskyky heikkenee lineaarisesti puuston oksaisuuden kasvaessa. Puuston eri-ikäisyys vaikuttaa havainnointia haittaavasti lähinnä metsiköissä, joissa valtapuuston alle on päässyt kertymään alikasvosta, joka lisää hajaheijastumien määrää. Kuvassa 31 olevassa alaoksattomassa, suorarunkoisessa ja järeässä männikössä kaikki rungot pystyttiin löytämään ja niistä saatiin etämittattua läpimittatiedot. Lisäksi mittaus onnistui liikkuvasta ajoneuvosta.

Läpimitan mittauksia suoritettiin vain männyllä ja kuusella. Rungoista johtuvaa eroa puulajien tunnistamisessa ei juurikaan havaittu, vaan ongelmaksi muodostuu edellä mainittu oksaisuus.

Kuvassa 31 nähdään metsikkö, jossa 2D-laserskannauksella tunnistettiin yli 80 % rungoista. Metsikössä ei ollut alakasvustoa ja runkojen alaoksaus oli vähäistä. Yhä oksaisemmissa kuusikoissa (kuva 33) 2D-laserskannereiden runkojen tunnistamistulos jäi alle 30 %. Käytännössä enää





Kuva 31. Skanneritunnistukselle ja kuvantunnistukselle helppo metsäkohde. (Kuva: Jari Ala-Illomäki)



Kuva 32. Kuusikko, jossa algoritmitunnistus onnistuu yli 80 % rungoista. (Kuva: Jari Ala-Illomäki)



Kuva 33. Kuusikko, josta algoritmitunnistus erottaa enää yksittäisiä lähimpiä runkoja. (Kuva: Jari Ala-Illomäki)



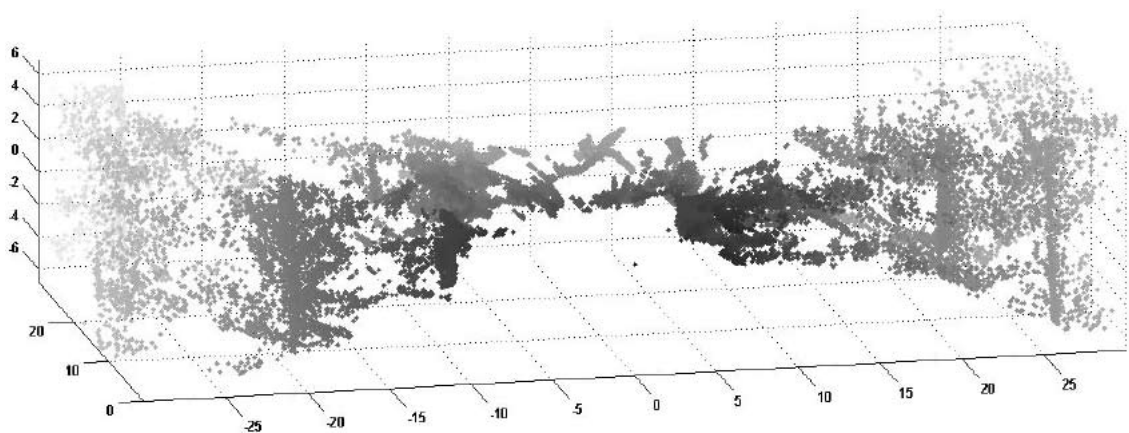
Kuva 34. Kuusikko, jossa 2D-laserskanneri ei tunnistanut lainkaan runkoja. (Kuva: Jari Ala-Illomäki)

yksittäisiä selkeitä runkoja lähellä laitetta saatiin tunnistettua. Kun siirryttiin tätä vaikeampiin kuusikoihin, skannereiden saama hajaheijastumien määrä kasvoi siten, että runkojen tunnistaminen muuttui mahdottomaksi (kuva 34). 2D-lasereiden skannerikuvaa voitiin parantaa liittämällä siihen 3D-kuvaa. Tällöin voitiin runkomuotoa hakea myös pystysuuntaa tutkivilla algoritmeilla. 3D-kuvista voidaan runkoja hakea myös kuvan tyhjästä kohteista. Tällöin voidaan olettaa, että kohteessa, jonka äärimuotojen sisällä ei ole kaikuja, voi olla puurunko.

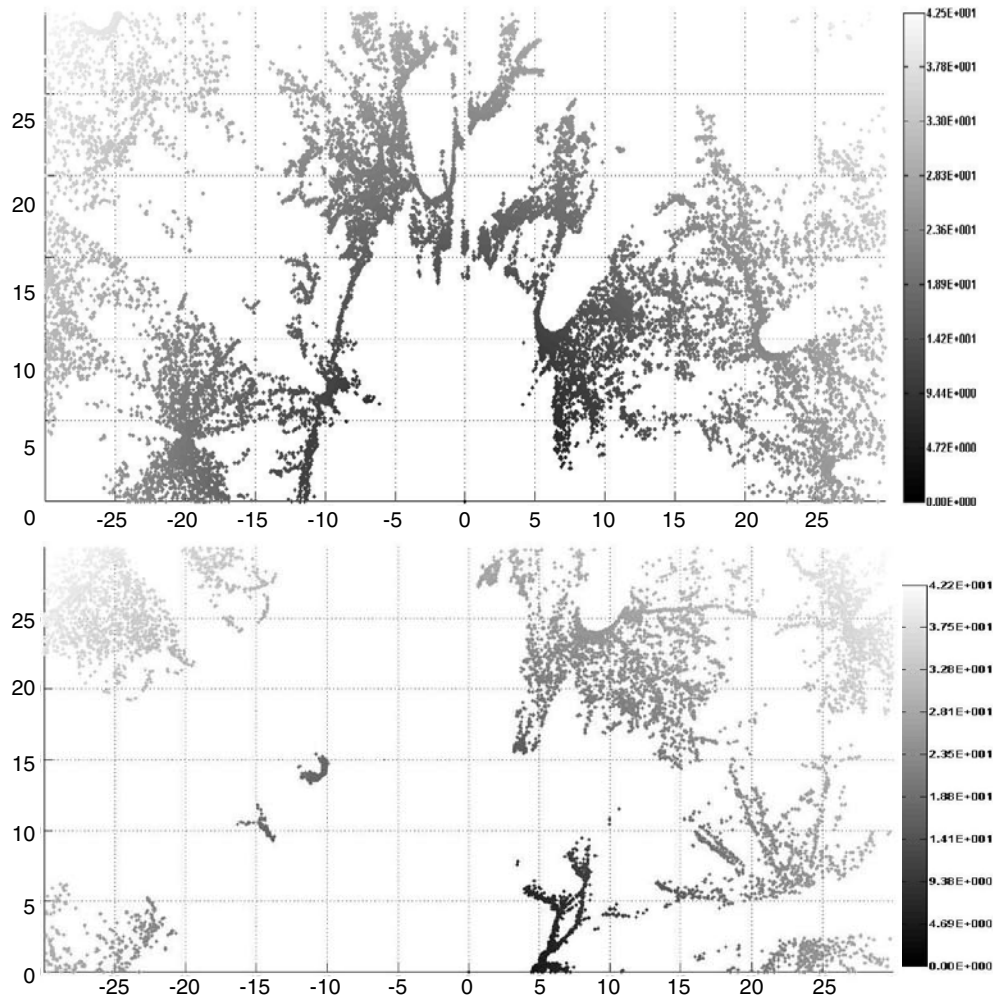
Tutkitussa sovelluksessa laitteisto ja sen mittaustaso kallistuivat alustakoneen mukana. Tästä johtuen lasersäde osui runkoihin vaihtelevalla korkeudella, mikä aiheutti eroa manuaalisesti mitattuun läpimittaan verrattuna. Runkokäyrämallin avulla mittaustarkkuutta järjestelmässä voitiin parantaa. Lähestymistapana käytettiin Lapin (1986) Metsäntutkimuslaitoksessa kehittämää napa-koordinaatistoon perustuva runkokäyrämallia, jolla voidaan laskea rinnankorkeusläpimitta joltain muulta korkeudelta mitatun läpimitan perusteella. Tarkkuus paranee edelleen, kun runkokäyräyh-tälöä kalibroidaan hakkuukoneen mittalaitteen tuottamilla puiden runkokäyrillä (5...10 puuta). Mittauksissa havaittiin myös, että useiden eri korkeudelta mitattujen läpimittojen käyttö on mahdollista ja parantaa mittaustarkkuutta

11.2 3D-skannerin toimivuus ja virhelähteet

Kuten 2D-skannerilla, myös 3D-skannerilla suurimman ongelman puukarttaa ajatellen muodostavat oksat, joista saatavat heijastumat haittaavat kuvan tulkintaa. 3D-laserin hyvä puoli on kuitenkin se, että kohteesta voidaan hakea runkotunnuksia myös pystyakselilta. Hyvä esimerkki pystyakselin hyödyistä nähdään kuvassa 35. Kyseisessä kohdassa 2D-laserilla ei voitu tunnistaa kuin yksi varma runkohavainto, kun taas 3D-laserin kuvasta nähdään heti vähintään kolme varmaa tunnistusta. Vaikka kuva on selvästi parempi puukartan muodostamisen pohjaksi, se edellyttää myös vaativampaa validointia eli kohteen oikeellisuuden varmistamista. Hankkeessa ei ehditty perehtymään 3D-kohteiden validointiin, joten laitteen lopullinen käyttökelpoisuus jäi testaamatta. 3D-kuvaa voidaan myös katsoa tasossa (kuva 36), jolloin myös 2D-kuvasta saadaan tarkempi. Esimerkkikuvassa runkoja on helppo tunnistaa kaarevista pinnoista, joiden takana on valkoinen alue. Myös tämä validointi jäi odottamaan jatkohankkeita.



Kuva 35. 3D-skannauksen kuva 2D-laserille vaikeasta kuusikosta. Koordinaattiakselit ilmaisevat etäisyyttä metreissä.



Kuva 36. 3D-skannaustulos tasossa. Koordinaattiakselit ilmaisevat etäisyyttä metreissä.

11.3 Järjestelmän suorituskyky suhteessa asetettuun tarkkuusvaatimukseen

Tässä hankkeessa ei päästy mittaamaan uuden laitteiston tuomaa mahdollista hyötyä tai haittaa hakkuutyölle ja puustotiedon keräykselle. Tämän seurauksen jouduttiin tukeutumaan mittausten simulointeihin. Laitteistolta vaadittava mittaustarkkuus määritettiin simuloimalla puuston keskitunnuksia. Simulaatiossa keskityttiin sekä mittavirheen vaikutuksiin puustotiedoissa että virheen taloudellisiin vaikutuksiin.

Mittausjärjestelmän havaittua tarkkuutta tarkasteltaessa (s. 35–36) havaitaan, että nykytilassaan järjestelmän voidaan katsoa täyttävän asetetut tarkkuusvaatimukset (s. 20–23) helppoissa olosuhteissa mittausvirheen keskihajonnan ollessa järeässä, suorarunkoisessa ja alaoksattomassa mäntymetsässä parhaimmalla tulkintamenetelmällä 1,4 cm, sillä tarkkuus on nyky menetelmänä käytettyä kuvioittaista arviointia parempi. Vastaavasti vaikeammassa metsikköoloissa järjestelmä vaatii lisäkehitystä. Sääolojen vaikutusta järjestelmän suorituskykyyn ei tutkittu, mutta periaatteessa ainakin voimakas vesi- ja lumisade saattavat aiheuttaa ongelmia.

Mittausjärjestelmän tarkempi analyysi voidaan tehdä vasta sitten kun järjestelmä on saatu laajempaan koekäyttöön. Vain analyysillä ja koejärjestelyillä voidaan etsiä järjestelmästä systemaattista virhettä aiheuttavia komponentteja.

12 Puukartan käyttöliittymä

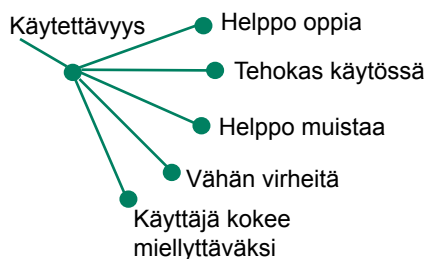
Laakso ja Latva-Koivisto (2006) kuvaavat hyvää käyttöliittymää näin: ”Käytettävyyttä ei voida lisätä väärän tietosisällön tai toiminnallisuuden päälle. Hyvä käyttöliittymä sisältää ensisijaisesti sellaisen tietosisällön ja toiminnallisuuden, että käyttäjien on mahdollista saavuttaa tavoitteensa (työtehtävät ylipäättään ’menevät läpi’). Kun työt on järjestelmällä mahdollista tehdä, voidaan parantaa niiden tekemisen tehokkuutta ja opittavuutta ja yrittää estää tarpeettomat virheet.”

Muita käyttöliittymälle kuvattuja tunnuksia ovat (Laakso ja Latva-Koivisto 2006):

1. *Hyödyllisyys* (utility): Voiko tehdä oikeaa asiaa? Ovatko järjestelmässä sellaiset toiminnot ja tietosisältö, että oikeiden työtehtävien tekeminen ’menee läpi’ – vaikka vaikeasti ja vaivalloisestikin?

Jos oikean asian pystyy tekemään jotenkin:

2. *Käytettävyys* (usability, kuva 37): Onko tekeminen sujuvaa?
 - Opittavuus: keksiikö käyttäjä, mitä pitäisi tehdä ja mitä tiedot tarkoittavat (learnability).
 - Muistettavuus: onko selvää, kun on kerran keksinyt (memorability).
 - Virheettius: houkuttaako käyttöliittymä virhetoimintoihin, ja miten käyttäjä selviytyy virheistä (errors).
 - Tyytyväisyys: kokeeko käyttäjä käytön miellyttävänä (satisfaction).

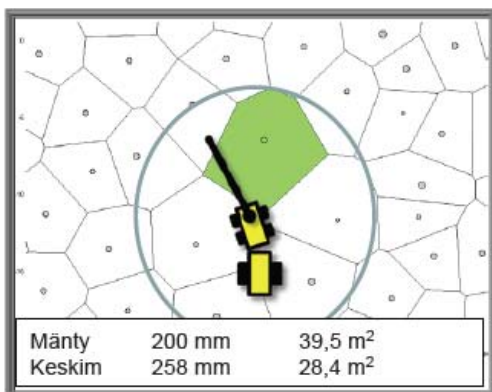


Kuva 37. Hyvän käyttöliittymän käytettävyyden tekijät (Nielsen 2003).

Hankkeen yhtenä tavoitteena oli saada aikaan puukartan käyttöliittymä yksioteharvesteriin. Tähän asti ei päästy, mutta käyttöliittymän toimintoja ja esitystapaa esiteltiin kuitenkin alustavasti simulaattorin avulla. Simulaattorin näytöllä kuljettaja näkee puukartan, ja koneen paikan. Näytöllä on myös puiden läpimitat ja voronoi-diagrammi puiden tilajärjestyksestä. Simulaattorin toimintoina ovat kaadettavan puun valinta ja kaatosuunnan määrittäminen. Kaikki toiminnot on toteutettu tietokoneen hiiriohjaimen tai erillisen näppäinvalinnan avulla. Helpoin tapa näyttää puukartta on joko hakkuukoneen olemassa olevalla kuvaruudulla tai erillisellä lisättävällä kuvaruudulla (kuva 39, oik.). Kartta päivittyy koneen liikkuessa ja saadessa tarkempia havaintoja ympäröivästä puustosta ja paikastaan. Käyttöliittymämalli on helppo toteuttaa nykytekniikalla, eikä vaadi erillistä tehdasvarustusta harvesteriin. Ongelmaksi muodostuu kuitenkin harvesterin käyttäjän kannalta se, että hän joutuu siirtämään katsettaan monitorista tuulilasiin ja takaisin. Tältä vältyttäisiin jos voitaisiin luoda virtuaalinen ympäristö näkyvissä olevan ympäristön päälle. Tämä voitaisiin toteuttaa erilaisilla kypärävisiireillä, kameralaseilla tai heijastamalla kuva kartasta koneen ikkunaan (kuva 38). Kaikki kyseiset menetelmät ovat jo teknisesti mahdollisia, mutta vaativat toteutuksen kannalta raskasta laskentaa.



Kuva 38. Visio tulevaisuuden käyttöliittymästä. Järjestelmän harvesterin työskentelyalueella havaitsemien puiden ääriiviivat näkyvät korostettuina kuljettajan havaitseman näkymän päällä. Myös havaittujen puiden läpimitat on merkitty. Kaadettavaksi valitun puun kaatosuunta valitaan kursorilla vetämällä, jolloin syntyvä nuoli näyttää valitun suunnan. (Kuva: Jari Ala-Ilomäki)



Kuva 39. Puukartan käyttöliittymän mahdollinen paikka yksiotteharvesterissa (Jutila ym. 2007).

Virtuaalinäytön avulla tulisi ainakin voida määrittää

- puun valinta
- kaatosuunta
- kasattavan puutavaran paikka
- puulaji (jos konenäköjärjestelmä ei tähän kykene)

Muita hyödyllisiä toimintoja voisivat olla

- katkonnan laatuohjaus
- laatuluokittelu
- muut ympäristöhavainnot

Nykyinen laitteiston simulaattorin käyttöliittymä on kuvan 39 (vas.) mukainen. Kuljettaja voi ohjaamossa olevilla ohjaimilla käyttää liittymää ja valita puut, joko tietokoneen ohjeistuksen mukaan, tai itse. Näyttöliittymässä näkyy muuttuvina tietoina puun läpimitta, puulaji ja puulajin suhteellisen pohjapinta-alan käänteisarvo. Käyttöliittymässä puut on esitetty voronoi-diagrammin avulla. Diagrammin reunaviiva kuvaa kahden puun välissä sijaitsevaa puolivälipistettä, riippuen siitä mikä puu on lähinnä kyseistä puuta. Nykyisellä käyttöliittymällä voidaan siis jo tarkastella puiden tilajärjestystä ja tiheyttä, sekä merkata kantojen ja kasojen paikat.

13 Hankkeen tavoitteiden toteutuminen

13.1 Tavoite ja toteutuma

Tavoite 1. Tutkia metsäkoneiden yhteydessä käytettäviä puiden ja metsän mittaus- ja havainnointitekniikoita ja -menetelmiä. Hankkeen kuluessa rakennettiin useita uusia mittauslaitteita ja uutta ohjelmistoa edellisiin. Uusina puuston mittauskeinoina esitettiin ajoneuvoon kiinnitetyt 2D- ja 3D-laserskannerit. Uusina havainnointikeinoina saatiin aikaan puukarttasimulaattori.

Tavoite 2. Etsiä mallinnustapoja, joilla mittauksista laskettu puiden paikka- ja dimensiotieto pystytään tallentamaan ”puukarttaan”, yleisen digitaalisen karttatiedon hyödyntäminen sekä tarkka paikannusta metsässä. Erilaisia skannerikuvia kohteista saatiin aikaan. Ilman alikasvosta olevat vähäoksaiset mäntymetsiköt saatiin paikannettu lasereilla puukartaksi lähes 100 %:sti. Metsiköiden vaikeutuessa paljon alaoksia sisältäviksi kuusikoiksi melkein kaikki runkotieto kuitenkin hukattiin. Aikaansaatu operatiivinen puukartta, oli siten hyvin riippuvainen puuston ja maaston laadusta. Tarkka paikannus saatiin lopulta aikaiseksi usean sensorin yhteistiedosta. Paikannustarkkuus on riittävä tarkan puukartan luomiseksi.

Tavoite 3. Rakentaa ”puukarttaan” perustuvia menetelmiä avustamaan kuljettajaa poistettavien puiden valinnassa. Varsinaista puukarttakäyttöliittymää ei ehditty hankkeen kuluessa toteuttamaan. Aikaan saatiin kuitenkin Matlab-ympäristössä toimiva harvesterisimulaattori. Varsinaisia harvesteritestejä ei saatu suoritettua. Myöskään järjestelmän mahdolliset aikahyödyt tai haitat jäivät tutkimatta, sillä aikatutkimusta metsässä ei suoritettu.

Tavoite 4. Metsäkoneiden puoliautomaattisen ohjauksen kehittäminen. Automaation kehityksen kannalta voitiin hankkeen kuluessa todeta, että yhä useampi toimintoja voitaisiin automatisoida toimivan puukartan avulla.

13.2 Yhteenveto

FORESTRIX -hankkeen suurimmaksi tekniseksi ongelmaksi muodostui se, että laitteet eivät toimineet vaikeammissa metsäkohteissa. Lisäkehitystä tarvitaan ainakin oksien aiheuttaman virheen poistamiseksi lasertutkien kuvista. Kuva- ja mittalaitteiden tietoja saatiin yhdistettyä, joten toivoo tästä on tulevaisuudessa.

Jatkossa tulisi parantaa tuotetun aineiston riittävää luotettavuutta ja integroitavuutta metsäsuunnittelun ja puunhankinnan tietojärjestelmiin. Lisäksi järjestelmien on oltava sellaisia hinnaltaan ja käytettävyydeltään, että ne eivät heikennä hakkuutoiminnan tuottavuutta tai nosta kustannuksia hyötyjä enemmän. Tulevan harvesterikäyttöliittymän tavoitteeksi jatkossa voidaankin toivoo seuraavia seikkoja:

- Kuviotietojen automaattinen päivitys tietokantaan hakkuiden jälkeen
- Automaattinen hakkuutiheyden seuranta
- Kokemattoman hakkuukoneen kuljettajan työn tuottavuuden parantuminen vähintään 20 %
- Mittausjärjestelmän toiminta lähes virheettömästi kaikenlaisissa metsiköissä.

14 Lisätutkimustarve

Kehitetty mittaus- ja kartoitusjärjestelmä puukartoineen edustaisivat toteutuessaan suurta kehityskaskelta metsäsuunnittelussa ja puunkorjuussa. Järjestelmää tulisi kehittää niin, että se saataisiin testattavaksi käytännön työssä ja metsäolosuhteissa. Tällöin saataisiin järjestelmän mahdollisuuksista, tarkkuudesta ja kehittämistarpeista erilaisissa kohteissa realistinen kuva.

Anturitekniikan kehitys ja tuotteistaminen on mm. autoteollisuuden tarpeista johtuen nopeaa. Nyt vaikeilta näyttävät ongelmat saattavat lähitulevaisuudessa olla helposti ratkaistavissa. Lisätutkimusta tarvittaisiin uusien mittaussektoriltaan laajempien ja erottelukyvyltään tarkempien skannerimallien testaukseen. Uutena tutkamallina kokeiluun tulisi saada voimakkaat mikroaaltotutkat. Myös konenäön perustutkimusta tulisi jatkaa ja käyttömahdollisuuksia tutkia myös metsäkäytössä.

Kirjallisuus

- Anttila, P. 2002. Updating stand level inventory data applying growth models and visual interpretation of aerial photographs. *Silva Fennica* 36: 549–560.
- Aschoff, T., Thies, M. & Spiecker, H. 2004. Describing forest stands using terrestrial laser-scanning. *Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol XXXV, Part B5: 237–241.
- Asikainen, A., Ala-Fossi, A., Visala, A. & Pulkkinen, P. 2005. Metsäteknologiasektorin visio ja tiekartta vuoteen 2020. 91 s. <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2005/mwp008.htm>
- Bailey, T., Nebot, E., Rosenblatt, J. & Durrant-Whyte, H. 2000. Data association for mobile robot navigation: a graph theoretic approach. *Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA '00. IEEE International Conference: 2512–2517*. San Francisco, CA, USA. ISBN 0-7803-5886-4.
- Borges, G. A. & Aldon, M.-J. 2004. Line Extraction in 2D Range Images for Mobile Robotics. *Journal of Intelligent and Robotic Systems* (40)3: 267–297.
- Brown, M., Mercier, S. & Provencher, Y. 2003. Road maintenance with Opti-Grade: maintaining road networks to get the best value. Teoksessa: Iwarsson Wide, M and Baryd, B.(toim.). 2nd Forest Engineering Conference, 12–15 May. Arbetsrapport från Skogforsk Nr. 536.
- Differential Global Positioning System Program. 2007. Fact Sheet US Department Of Transportation. <http://www.tfhr.gov/its/ndgps/handgps/03039.htm>
- Eriksson, P. 2004. Skogsverige. <http://www.skogssverige.se/pressmeddelanden/lasmerpress.cfm?22/>. Luettu 22.5.2005.
- Everett, H. R. 1995. *Sensors for mobile robots: theory and application.*: A. K. Peters, Ltd. Natick, MA, USA. ISBN 1-56881-048-2.
- Faro Laser Scanner LS. 2005. Faro Technologies. Data Sheet.
- Forsberg, M., Berglund, G. & Malm, D. 2001. GPS i skogsbruket – var står vi idag? Skogforsk Resultat Nr. 16. 4 s.
- Guivant, J., Eduardo, N. & Baiker, S. 2000. Autonomous Navigation and Map building Using Laser Range Sensors in Outdoor. *Journal of Robotic Systems* (17)10: 565–583.
- Haala, N., Reulke, R., Thies, M. & Aschoff, T. 2004. Combination of terrestrial laser scanning with high resolution panoramic images for investigations in forest applications and tree species recognition. *Proceedings of the ISPRS working group V/1, 'Panoramic Photogrammetry Workshop'*. Dresden, Germany, 19–22 February 2004
- Hallonborg, U. & Norden, B. 2005. Flexiblare skotning med breda mellanstötter – öppnar för robotisering. Skogforsk Resultat Nr 4. 4 s.
- Hartikainen, S., Mäkelä, T., Aunola, P. & Kauranne, T. 2003. Innovatiiviset toimet Itä-Suomessa metsänomistajan verkkopalvelu-hanke. Teoksessa: Saramäki, J., Tikkanen, J. & Heino Esa(toim.). Yksityismetsien suunnittelun uudet tuulet. Metsätutkimuslaitoksen tiedonantoja 900.
- Hassinen, K. 2005. Alueellisen metsävaratiedon rooli ja uuden sukupolven metsäsuunnittelun tavoitteet. Maa- ja metsätalousministeriö.
- Heiskanen, S. 2005. Kamera kourassa paljastaa kierouden. *Koneyrittäjä* 4: 17–18.
- Hellström, T. 2002. Autonomous navigation for forest machines, Technical Report UMINF 02.13. Department of Computing Science, University of Umeå.
- Hellström, T. & Ringdahl, O. 2004. Follow the past – a path tracking algorithm for autonomous forest vehicles', Technical Report UMINF 04.11. http://www.cs.umu.se/~thomash/reports/07_Hellstrom.pdf
- Hoffman, E. 2005. Specifying Laser Scanning Services. *Chemical Engineering Progress* 101/5: 34–38.
- Hong, T., Balakirsky, S., Messina, E., Chang, T. & Shneier, M. 2002. A Hierarchical World Model for an Autonomous Scout Vehicle. NIST – Intelligent Systems Division. http://www.isd.mel.nist.gov/documents/hong/SPIE_WM02.pdf
- Hujala, T. 2004. GIS2-kurssi, GPS maa ja metsätaloudessa. Satelliittipaikannusjärjestelmät. Helsingin yliopisto, Metsävarojen käytön laitos. http://www.mm.helsinki.fi/GIS/Courses/gis2/2004/GIS2_satelliittipaikannusjarjestelmat_2004.pdf

- Ibanez-Guzman, J., Jian, X., Malcolm, A., Gong, Z., Chen, C. W. & Tay, A. 2004. Unmanned Tracked Ground Vehicle for Natural Environments. 9 s.
- Jasumback, T. 1996. GPS evaluation: West Coast test site. USDA Forest Service, Missoula Technology and Development Center. Missoula: USDA Forest Service.
- Jutila, J. 2006. Laserskannerin käyttö paikannuksessa ja puiden mittauksessa osana metsäkoneen aistinjärjestelmää. Diplomityö. Teknillinen Korkeakoulu, Espoo, Automaatio- ja systeemitekniikan osasto.
- Jutila, J., Miettinen, M., Forsman, P., Öhman, M. & Visala, A. 2007. FORESTRIX-johtoryhmän kokous 10.11.2007. Esitelmämoniste.
- Juujärvi, J., Heikkinen, J., Brand, S. & Lampinen, J. 1998. Digital image based tree measurement for forest industry. Teoksessa: David P. Casent (toim.). Intelligent Robots and Computer Vision XVII. Algorithms, techniques and Active Vision, volume 3522: 114–123.
- Kangas, J. 2005. Metsäteollisuuden odotukset metsäsuunnittelun kehittämiseksi. Alueellinen metsävaratieto metsäsuunnittelussa 2000-luvulla. Maa- ja metsätalousministeriö.
- Kannas, K. 2006. Tree Measurement with Machine Vision in a Perception System for Forestry Machines. Diplomityö. Teknillinen Korkeakoulu, Espoo, Automaatio- ja systeemitekniikan osasto.
- Kansallinen metsäohjelma 2010. Seurantaraportti 2002–2003. 2004. Maa- ja metsätalousministeriön julkaisu 7/2004.
- King, A. 1998. Inertial Navigation – Forty Years of Evolution. *Gec Review* 13:3: 140–149.
- Korhonen, K. & Hyvönen, P. 2003. Tutkimuksia metsävaratiedon jatkuvasta ylläpidosta. Teoksessa: Saramäki, J., Tikkanen, J. & Heino, Esa (toim.): Yksityismetsien suunnittelun uudet tuulet. Metsätutkimuslaitoksen tiedonantoja 900. 64 s.
- Kosonen, S. 2007. Tree Species Recognition with Machine Vision Using Color and Texture Analysis. Diplomityö. Teknillinen Korkeakoulu, Automaatio- ja systeemitekniikan osasto.
- Kärhä, K., Peltola, J., Korpilahti, A., Poikela, A., & Liikkanen, R. 2003. Uusia laitteita energia- ja ainespuun korjuuseen nuorista metsistä. Metsätehon raportti 164.
- Laakso, S. A. & Latva-Koivisto, A. 2006. Käyttöliittymät. Kurssimoniste, Sarja D-2006-1. Helsingin yliopisto, Tietojenkäsittelytieteen laitos.
- Lappi, J. 1986. Mixed linear models for analyzing and predicting stem form variation of scots pine. Seloste: Männyn runkokuodon vaihtelun analysointi ja ennustaminen lineaaristen sekamallien avulla. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 134. 69 s.
- Laser Measurement Sensors. 2007. Data Sheet. Sick Oy. <http://mysick.com/partnerPortal/eCat.aspx?go=FinderSearch&Cat=Row&At=Fa&Cult=English&Category=Produktfinder&FamilyID=267&Selections=8642,0,8783,0>.
- Linja, M. 2005. Traktorin paikannuksen parantaminen sensorifuusiolla. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, Automaatio- ja systeemitekniikan osasto.
- Maltamo, M., Erikäinen, K., Pitkänen, J., Hyypä, J. & Vehmas, M. 2004. Estimation of timber volume and stem density based on scanning laser altimetry and expected tree distribution functions. *Remote Sensing of Environment* 90: 319–330.
- Melkas, T. 2002. GIS2: GPS metsäsovellukset. Helsingin yliopisto/Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta. from GIS2 kurssin sivut: http://mm.helsinki.fi/GIS/GIS2/GIS2_GPS_metsasovellukset_2002.pdf
- Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion vuositilastot. 2006. Tapio. Motti-ohjelmisto. 2008. Metla. <http://www.metla.fi/metinfo/motti/index.htm>
- Motion Tracker. 2004. Xsens Technologies. Technical Documentation.
- Naesset, E. & Jonmeister, T. 2003. Assessing Point Accuracy of DGPS under Forest Canopy Before Data Acquisition, in the Field and After Postprocessing. *Scandinavian Journal of Forest Research* 17: 351–358.
- New Electronic Technology. 2005. FOculus FO 442C, Data Sheet. http://www.net-gmbh.com/e/documents/FO442SB_SC_4.pdf
- Nielsen, J. 1993. Usability engineering. Academic Press, New York.
- Nogushi, N., Zhang, Q., Han, S. & Reid, J. 2001. Autonomous agricultural tractor with intelligent navigation system. 4th IFAC symposium on intelligent autonomous vehicle: 200–206.

- Pérez, J., Castellanos, J., Montiel, J., Neira, J. & Tardós, J. 1999. Continuous Mobile Robot Localization: Vision vs. Laser. IEEE International Conference on Robotics and Automation: 2917–2923.
- Petterson, A., Utveckling, S. & Eriksson, B. 2003. GPS I markberedaren underlättar förnyngsarbete. Skogforsk Resultat Nr. 16.
- Petterson, P. 1999. Control System Architecture for a Walking Robot. Skolan för Industriell Teknik och Management. <http://www.md.kth.se/~cas/publications/>
- Pfeifer, N., Gorte, B. & Winterhalder, D. 2004. Automatic Reconstruction of Single Tree from Terrestrial Laser Scanner Data. ISPRS-International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol XXXV, Part B5: 114–119.
- Poikela, A. & Aijälä, O. 2006. Harvennusvoimakkuus korjuujäljen osatekijänä. Metsätehon raportti 190.
- Pöllänen, J. 1999. (toim.) Metsäalan työvoimapolitiittiset toimenpiteet 2000–2006. Savotta 2000 -projekti.
- Rakemaa, A. 2003. Metsäsuunnittelun kehittämissstrategia. Teoksessa: Saramäki, J., Tikkanen, J. & Heino, Esa (toim.) Yksityismetsien suunnittelun uudet tuulet. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 900.
- 3D Terrestrial Laser Scanner LMS-Z210. 2006. Riegl Oy. Data Sheet. http://www.riegl.com/terrestrial_scanners/lms-z210ii_/210ii_all.htm
- Ringdahl, O. 2003. Path tracking and obstacle avoidance for autonomous forest machines. <http://www.cs.umu.se/research/IFORnav/navigation/>.
- Rouvinen, S., Varjo, J. & Korhonen, K. T. 1999. GPS-paikannuksen tarkkuus metsässä. Folia Forestalia 1: 51–64.
- Selkäinaho, J. 2002. Adaptive Autonomous Navigation of Mobile Robots in Unknown Environments. Väitöskirja. Espoo: Teknillinen korkeakoulu, Automaatio- ja systeemiteknikan osasto.
- Simonse, M., Aschoff, T., Spiecker, H. & Thies, M. 2003. Automatic Determination of Forest Inventory Parameters Using Terrestrial Laserscanning. Proceedings of the ScandLaser Scientific Workshop on Airborne Laserscanning of Forests, Umeå, Sweden, 3–4 September 2003: 252–258.
- Svahn, J. 2005. Vision based autonomous road following for a wheeled outdoor robot. MSc-thesis. Royal Institute of Technology. Stockholm.
- Tammisto, M. 2003. Timberjack vie suunnitteluosaamista. Tampereen kauppamarilehti 6
- Tarkka, M. 2004. Logistic solution for forwarding – Timberjack’s solution for the missing link in harvesting logistics. Esitelmämoniste. ForestIT 2004, September 1–2, 2004. Jyväskylä and Jämsänkoski.
- Taylor, R. & Probert, P. 1996. Range Finding and Feature Extraction by Segmentation of Images for Mobile Robot Navigation. IEEE International Conference on Robotics and Automation: 95–100.
- Tsai, C.-C., Lin, H.-H. & Wong, K.-H. 2005. Laser-Based Pose Tracking of a Wheeled Mobile Robot. Preprints of the 16th IFAC World Congress.
- Uuttera, J. 2005. Uuden sukupolven suunnittelujärjestelmän kehittämistyö. Alueellinen metsävaratieto ja metsäsuunnittelu 2000-luvulla. Maa- ja metsätalousministeriö.
- Valtakunnan metsien 10. inventointi (VMI10) 2008. Metla. <http://www.metla.fi/ohjelma/vmi/vmi10-info.htm>
- Visala, A., Jutila, J., Öhman, M., Kannas, K. & Miettinen, M. 2006. FORESTRIX-johtoryhmän kokous 5.10.2006. Esitelmämoniste.
- Watt, P. J. & Donoghue, D. 2005. Measuring forest structure with terrestrial laser scanning. International Journal of Remote Sensing 26: 1437–1446.

Haastattelut ja kirjeenvaihto

Melkas, Timo. Tutkija, Helsingin yliopisto. Sähköpostiviesti 25.5.2005.