



Perttu Anttila



Mikko Lehikoinen

Perttu Anttila ja Mikko Lehikoinen

Kuvioittaisten puustotunnusten estimointi ilmakuvilta puoli- automaattisella latvusten segmentoinnilla

Anttila, P. & Lehikoinen, M. 2002. Kuvioittaisten puustotunnusten estimointi ilmakuvilta puoliautomaattisella latvusten segmentoinnilla. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2002: 381–389.

Tutkimuksessa selvitettiin yksittäisten latvusten segmentointiin ilmakuvalta perustuvan puustotunnusten arviointimenetelmän tarkkuus. Puuston arviointiin kehitetty tietokoneohjelma rajaa puiden latvukset puoliautomaattisesti, minkä jälkeen se laskee puustotunnukset malliketjulla. Puun rinnankorkeusläpimitta ennustettiin latvusalan perusteella, pituus rinnankorkeusläpimitan perusteella ja tilavuus rinnankorkeusläpimitan ja pituuden perusteella. Metsikkötunnukset saatiin kuvion kaikkien segmentoitujen puiden keskiarvoina ja summina. Ohjelmassa oli myös opetettava puulajintunnistusalgoritmi. Runkoluvun, pohjapinta-alan ja tilavuuden estimaatit olivat reiluja aliarvioita, mikä johtui osittain siitä, että aineistossa oli useita puuston tilavuudeltaan erittäin suuria kuvioita. Menetelmä osoittautui jatkotutkimuksen arvoiseksi, vaikka menetelmän tarkkuus ei tämän tutkimuksen perusteella riitäkään metsäsunnittelussa tarvittavien lähtötietojen tuottamiseen.

Asiasanat: ajantasaistus, hahmontunnistus, ilmakuvat, inventointi, kuvioittainen arviointi, metsäsuunnittelu

Yhteystiedot: Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta, PL 111, 80101 Joensuu. Sähköposti perttu.anttila@forest.joensuu.fi

Hyväksytty 6.9.2002

1 Johdanto

Kuvioittaiset puustotunnukset kerätään yksityismaiden metsäsuunnitteluun kuvioittaisella arvioinnilla. Maastotyön ennakkovalmistelussa käytetään ilmakuvia kuvionrajauksessa. Koska kuvat tilataan digitoituina, voitaisiin niitä hyödyntää myös puustotunnusten numeerisessa tulkinnassa. Numeeristen ilmakuvien kuva-alkion koko on tyypillisesti niin pieni, että kuvilta pystytään erottamaan jo yksittäisiä puita.

Tähän mennessä yksittäisten puiden automaattiseen tai puoliautomaattiseen tunnistamiseen perustuvia menetelmiä on kehitetty ympäri maailmaa (Dralle ja Rudemo 1996, Brandtberg 1997, Korpela 2000, Pitkänen 2001). Puustotunnusten estimointi perustuu kaukokartoituskuvilla näkyvien yksittäisten latvusten (puoli)automaattiseen segmentointiin. Latvuksen maksimiläpimitan ja rinnankorkeusläpimitan välillä vallitsee männyllä voimakas korrelaatio (korrelaatiokerroin 0,77) (Ilvessalo 1950). Koivulla ja kuusella korrelaatio on heikompi kuin männyllä. Segmentistä laskettujen latvustunnusten (läpimitat ja pinta-ala) perusteella voidaan ennustaa esim. puun rinnankorkeusläpimitta ja tästä edelleen pituus ja tilavuus. Puulaji päätellään yleensä segmentin sisään jäävien kuva-alkioiden sävyarvoista.

Tutkimuksissa on saavutettu puustotunnusten tuottamisessa erittäin lupaavia tuloksia, mutta laajamittaisia kokeita on tehty suhteellisen vähän. Menetelmien käyttöönottoon liittyy myös menetelmää tukevien prosessien määrittäminen, kuten alueellisten mallien laatiminen rinnankorkeusläpimitan ennustamiseksi latvuksen dimensioista ja mallien kalibrointimenetelmät esim. hakkuukonetietoihin perustuen.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää puoliautomaattiseen latvusten segmentointiin perustuvan ilmakuvatulkinnan luotettavuus metsäsuunnittelussa tarvittavien tietojen tuottamisessa. Tutkimuksessa testattiin Arboreal Forest Inventory Tools -sovellusta (versio 1.2), joka on suunniteltu metsäninventointia ajatellen.

2 Aineisto

Leppävirralta, Mustinmäen suunnittelualueelta (P: 6934000, I: 3550000) mitattiin kuvioittaisen arvioinnin tarkistusinventoinnissa 22 metsikkökuvioita vuosina 2000 ja 2001. Kuvioista kuusi oli nuoria kasvatusmetsiköitä, kymmenen varttuneita kasvatusmetsiköitä ja kuusi uudistuskypsiä metsiköitä. Pääpuulajina oli kuudella kuviolla mänty, 15:llä kuusi ja yhdellä rauduskoivu. Kuvioaineisto on tarkemmin kuvattu Hyvösen (2002) julkaisussa. Yksi nuori männikkö ja kuusikko jätettiin tässä kokeessa tulkitsematta, koska pääpuulajin latvusten rajausta ei onnistunut.

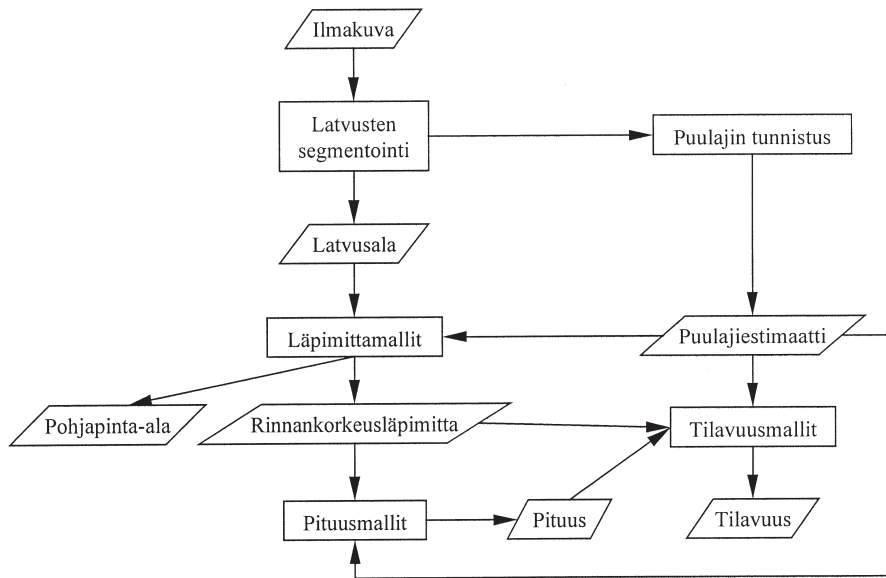
Mustinmäen alue ilmakuvattiin 27.4.2000 klo 10.20 väärävärifilmille. Kuvausmittakaava oli 1:30000. Kuvaukset toteutti FM-Kartta Oy, joka myös digitoi ja orto-oikaisi kuvat. Kuva-alkion koko oli 0,5 m × 0,5 m, joka on muodostunut standardiksi nykyisissä metsäkuvauksissa.

3 Menetelmät

3.1 Segmentointimenetelmä

Kuviokohtaisten puustotunnusten arviointiohjelma Arboreal Forest Inventory Tools perustuu digitaaliselta ilmakuvulta tapahtuvaan latvustulkintaan. Ilmakuvan erotuskyvyn tulee olla vähintään 0,5 metriä, jotta yksittäisten puiden latvukset erottuvat selvästi toisistaan. Ohjelma rajaa annettujen parametrien mukaan yksittäisten puiden latvukset ja laskee latvuksen dimensioiden perusteella kuvion jokaiselle puulle rinnankorkeusläpimitan, pituuden, pohjapinta-alan sekä tilavuuden (kuva 1). Opetettava puulajin tunnistusalgoritmi tuottaa jokaiselle puulle myös puulajiestimaatin. Puustotietojen laskennassa käytetään alueellisia malleja, joita käyttäjä voi tehdä myös itse tai kalibroida jo olemassa olevia malleja ohjelman sisällä.

Tässä tutkimuksessa käytetty sovellus perustuu aluepohjaisiin segmentointimenetelmiin. Menetelmät hyödyntävät pistetiedon (yksittäiset kuva-alkiot) lisäksi myös kuvan spatiaalisia ominaisuuksia (Pratt 1991). Menetelmäperhe voidaan jakaa alue-laajennuspohjaisiin sekä erota ja yhdistä -pohjaisiin

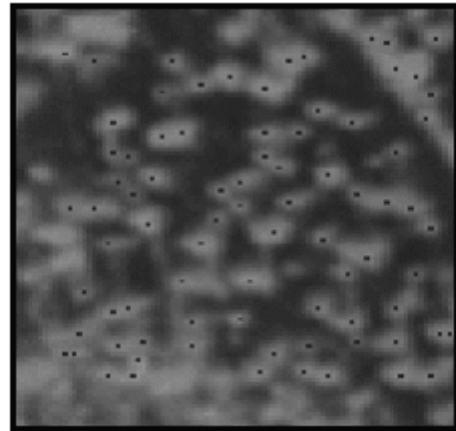


Kuva 1. Puukohtaisten tunnusten laskenta.

(Gonzales ja Woods 1993). Aluelaajennustekniikoita käytettäessä yhdistetään esim. värisävyiltään samanlaisia naapurikuva-alkioita tai kuva-alkioryhmiä, kunnes ennalta määritetyt rajoitteet tulevat vastaan (Lehikoinen 1999). Aluelaajennusmenetelmät ovat yleensä laskennallisesti tehokkaita (Pratt 1991). Sovelluksessa segmentointi jakautuu kolmeen päävaiheeseen: kuvan suodatukseen, latvuskandidaattien hakuun ja aluelaajennuspohjaisen algoritmin suorittamiseen.

Suodatuksessa kuvan informaation taso (esim. yksityiskohtien määrä) pyritään saamaan latvuskandidaattien hakua ja segmentointia ajatellen optimaaliseksi. Yleensä suodatus tehdään käyttämällä alipäästösuodatusta, joka pehmentää kuvaa säilyttäen kuitenkin samalla yksityiskohtien rajat. Tavoitteena on löytää kullekin intensiteettialueelle (~ yksittäinen latvus) vain yksi maksimi (~ latvuksen kirkkain ja yleensä myös korkein kohta), minkä jälkeen segmentointi on tehokasta ja tarkempaa kuin ennen suodatusta (Maltamo ym. 2002) (kuvat 2 ja 3).

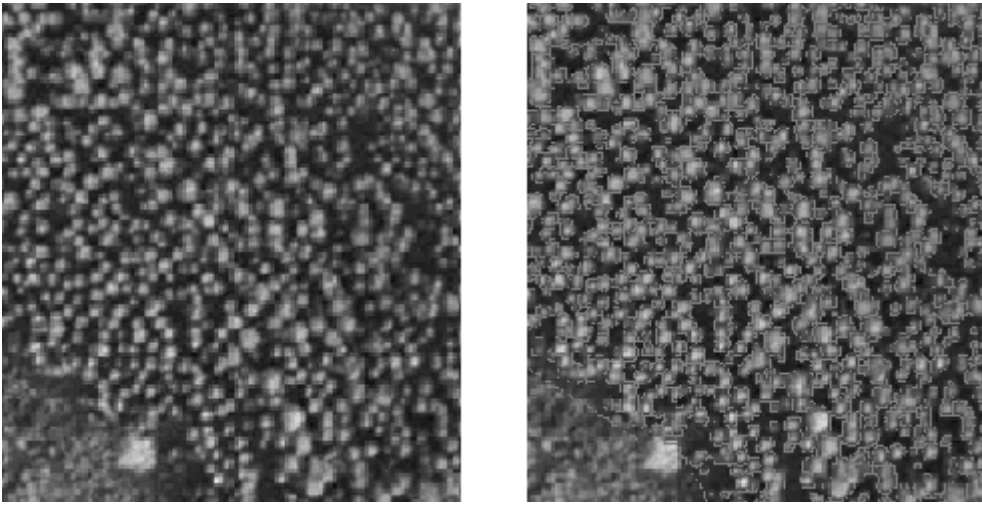
Rajoitteiden määrittelyllä on suuri merkitys aluelaajennuspohjaisen segmentoinnin onnistumisen kannalta, ja niistä muodostuukin usein erittäin monimutkaisia (Pratt 1991). Rajoitteina voidaan käyttää



Kuva 2. Esimerkki latvuskandidaattien hausta. Kuva on alun perin suodatetusta väri-ilmakuvasta (ks. Maltamo ym. 2002).

kuvainformaation lisäksi esimerkiksi segmenttien kokoa ja muotoa (Lehikoinen 1999).

Tutkitussa sovelluksessa segmentointi on puoliautomaattinen, ja sitä kontrolloidaan kolmen parametrin avulla. Parametrit vaikuttavat latvuskandidaattien määrään ja kokoon. Ensimmäinen



Kuva 3. Esimerkki latvusten segmentoinnista. Vasemmanpuoleinen kuva on alun perin väri-ilmakuvasta. Oikealla sama kuva segmentoituna.

parametri määrää kuvan suodatuksen voimakkuutta, mikä käytännössä tarkoittaa peräkkäisten suodatusten lukumäärää. Mitä voimakkaampi suodatus, sitä vähemmän kuvaan jää yksityiskohtia. Toinen parametri kontrolloi, kuinka tummia kuva-alkioita hyväksytään latvuskandidaateiksi. Mitä suurempi parametrin arvo, sitä vähemmän latvuskandidaatteja löytyy. Kuvan yleinen kirkkaus vaikuttaa parametrin arvon säätämiseen, ja käytännössä arvo säädetään iteratiivisesti tutkimalla latvuskandidaattien haku. Kolmannella parametrilla hallitaan segmenttien kasvua. Mitä pienempi arvo, sitä tummempia kuva-alkioita voi liittyä segmenttiin. Segmentin kasvu pyritään aina sovittamaan iteratiivisesti niin, että yksittäisten latvusten reunat kuuluvat mukaan segmenttiin. Ensimmäisenä määrätään kuvan suodatuksen voimakkuus, joka ei yleensä muutu kuvien välillä. Tämän jälkeen parametreja säädetään rinnakkain, kunnes tulkitsijan mielestä on saavutettu visuaalisesti paras tulos. Lisäksi sovellus pyrkii itsenäisesti tutkimaan segmentin muotoa sisäisten parametrien avulla, jotta latvusten muoto ja yksittäiset puut pystytään luotettavammin erottamaan kuvasta.

Sovelluksessa puulajit tulkitaan segmenttien keskiarvosävyjen perusteella opetetavan neuralliverkon avulla. Joka puulajiluokasta osoitetaan

muutama mallisegmentti, joiden perusteella loput segmentit luokitellaan. Tässä tutkimuksessa puulajit tulkittiin kolmeen luokkaan: mänty, kuusi ja lehtipuu.

Yksittäisen puun rinnankorkeusläpimitta estimoitiin ohjelmassa puulajiluokittain seuraavalla mallilla:

$$d_{1,3} = \frac{A}{(a_1 + a_2 \cdot A)^2} \quad (1)$$

missä A on segmentin sisään jääneistä kuvanalkioista laskettu latvusala neliömetreissä ja a_1 ja a_2 puulajiluokittaisia parametreja (taulukko 1). Puun pituus laskettiin Näslundin (1937) malleilla (kaava 2) ja tilavuus Laasasenahon (1982) kahden selittäjän malleilla puulajiluokittain.

$$h = 1,3 + \frac{d_{1,3}^2}{(a_3 + a_4 \cdot d_{1,3})^2} \quad (2)$$

missä a_3 ja a_4 ovat puulajiluokittaisia parametreja (taulukko 1). Sovelluksen valmistajalta ei saatu tietoja läpimitta- ja pituusmallien luotettavuudesta.

Kuvion puuston keskiläpimitta ja -pituus lasketaan puukohtaisten läpimittojen ja pituuksien keskiarvoina, ja hehtaarikohtainen pohjapinta-ala,

Taulukko 1. Lämpimittä- ja pituusmallien parametrit.

Puulajiluokka	a_1	a_2	a_3	a_4
Mänty	0,6552	0,1536	2,0987	0,1445
Kuusi	0,7022	0,1591	2,0900	0,1405
Lehtipuu	1,2409	0,1714	1,5035	0,1609

runkoluku ja tilavuus saadaan summaamalla vastaavat puukohtaiset tunnuksat ja jakamalla summa kuvion alalla.

3.2 Tulkintakoe

Visuaalisen tulkinnan luotettavuus riippuu kuvamateriaalin tarkkuudesta, käytettyjen mallien hyvyydestä, metsikön rakenteesta sekä tulkitsijan koulutuksesta ja taidoista. Riippuvuus tulkitsijan koulutuksesta pyrittiin ottamaan huomioon valitsemalla kaksi tulkitsijaa siten, että toinen tulkitsijoista oli saanut vain lyhyen opastuksen tulkintaohjelman käyttöön, kun taas toinen oli erittäin kokenut tulkitsija. Molemmat koehenkilöt segmentoivat kuvioittain latvukset. Toinen tulkitsijoista ei käyttänyt puulajin tunnustusalgoritmia, vaan tulkitsi ainoastaan kuvion pääpuulajin. Siksi molempien tulkitsijoiden osalta päädyttiin tarkastelemaan pääpuulajin tulkintatarkkuutta puulajiositteittaisten puustotunnusten tarkkuuden sijaan.

Puustotunnusten tulkinnan luotettavuutta mitattiin keskivirheellä (RMSE) ja harhalla, jotka laskettiin sekä absoluuttisina että suhteellisina

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (3)$$

$$\text{RMSE}\% = \frac{\text{RMSE}}{\bar{y}} \cdot 100\% \quad (4)$$

$$\text{harha} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)}{n} \quad (5)$$

$$\text{harha}\% = \frac{\text{harha}}{\bar{y}} \cdot 100\% \quad (6)$$

missä y_i on tunnuksen maastossa mitattu arvo kuvioilla i , \hat{y}_i estimaatti, \bar{y} maastomittausten keskiarvo ja n kuvioiden lukumäärä.

Pääpuulajin tulkinnan onnistumista tarkasteltiin virhematriisiin ja siitä laskettujen tunnusten oikeinluokitusprosentti ja K (kappa) avulla. Oikeinluokitusprosentti kertoo oikeiden pääpuulajitulkintojen prosenttiosuuden kaikista tulkituista kuvioista. K :n estimaattori on

$$\hat{K} = \frac{n \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} x_{+i})}{n^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} x_{+i})} \quad (7)$$

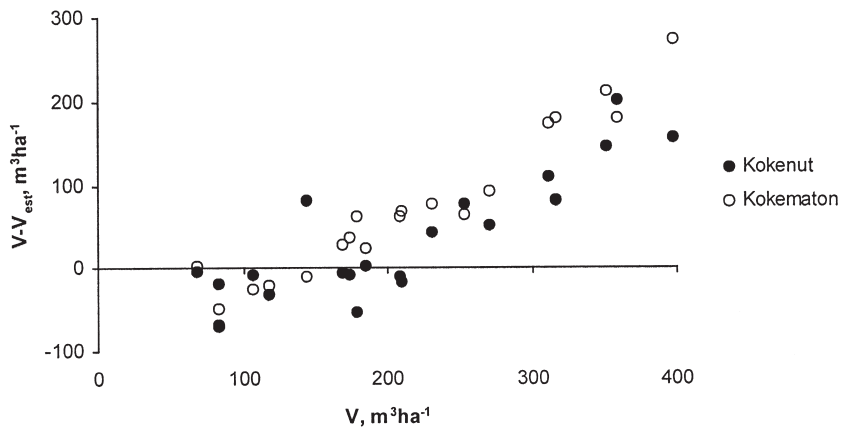
missä r on virhematriisin rivien määrä, x_{ii} kuvioiden määrä rivillä i ja sarakkeella i , x_{i+} rivin i summa ja x_{+i} sarakkeen i summa.

4 Tulokset

Puustotunnusten tulkinnan luotettavuus käy ilmi taulukosta 2. Kokeneemmalla tulkitsijalla ohjelman tuottama keskilämpimittä, keskipituus ja etenkin pohjapinta-ala olivat aliarvioita, mistä johtuen myös tilavuus oli aliarvio. Kokemattomalla tulkitsijalla sen sijaan keskilämpimittän ja keskipituuden estimaatit olivat lieviä yliarvioita, mutta suuri pohjapinta-alan aliarvio johti kokonaistilavuuden aliarvioon. Runkoluvun estimaatit olivat molemmilla aliarvioita.

Kuvasta 4 nähdään, että aliarviot ovat huomattavia varsinkin kuvioilla, joiden todellinen tilavuus on suuri. Kuvioittaisen arvioinnin perusteella Mustinmäen suunnittelualueella 90 %:lla kuvioista kokonaistilavuus on pienempi kuin $250 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Tarkistuskuviot painoutuivat siis selvästi runsaspuustoihin kuvioihin. Kun tulokset laskettiin vain kuvioille, joilla tilavuus oli alle $250 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, pohjapinta-alan keskivirhe putosi kokeneella tulkitsijalla 34,6 %:sta 25,2 %:iin ja tilavuuden keskivirhe 38,4 %:sta 24,6 %:iin. Kokemattoman tulkitsijan pohjapinta-alaestimaatti tarkentui 45,6 %:sta 32,4 %:iin ja tilavuusestimaatti 53,9 %:sta 31,8 %:iin.

Pääpuulajin tulkinnassa mänty ja kuusi sekoituivat usein toisiinsa (taulukko 3). Kokeneella tulkitsijalla viidestä männiköstä kahdella ja 14



Kuva 4. Kokonaistilavuuden estimaatin (V_{est}) poikkeama tarkistusmitatusta kokonaistilavuudesta (V).

Taulukko 2. Tulkinna luotettavuus kokeneella ja kokemattomalla tulkitsijalla.

Tunnus	Yksikkö	Virhe	Kokenut		Kokematon	
			Absol.	Suht.	Absol.	Suht.
Keskiläpimitta	cm	RMSE	4,3	18,4	5,8	25,0
		harha	1,9	8,2	-1,0	-4,3
Keskipituus	m	RMSE	3,2	16,7	4,4	22,6
		harha	1,4	7,1	-1,4	-7,2
Pohjapinta-ala	$m^2 ha^{-1}$	RMSE	8,0	34,6	10,5	45,6
		harha	5,8	25,1	8,5	36,9
Runkoluku	ha^{-1}	RMSE	385,9	43,5	654,3	73,7
		harha	197,2	22,2	468,4	52,8
Kokonaistilavuus	$m^3 ha^{-1}$	RMSE	81,2	38,4	113,7	53,9
		harha	36,4	17,2	68,4	32,4

Taulukko 3. Pääpuulajin tulkinna virhematriisi kokeneella ja kokemattomalla tulkitsijalla.

Tulkinta	Mänty	Kokenut Maastomittaus			Yhteensä	Mänty	Kokematon Maastomittaus		
		Kuusi	Lehtipuu	Yhteensä			Kuusi	Lehtipuu	Yhteensä
Mänty	2	3	0	5	0	0	0	0	
Kuusi	2	11	0	13	5	14	0	19	
Lehtipuu	1	0	1	2	0	0	1	1	
Yhteensä	5	14	1	20	5	14	1	20	
Oikein, %	40,0	78,6	100,0		0,0	100,0	100,0		
Koko aineistossa									
Oikein, %	70,0				75,0				
\hat{K}	0,37				0,25				

kuusikosta 11:llä oli pääpuulaji oikein. Tulkitsijoista kokemattomampi oli merkinnyt kaikki havupuustot kuusikoiksi. Aineiston ainoa lehtipuuvaltainen kuvio oli tulkittu oikein.

5 Tulosten tarkastelu

Tutkimuksessa esiteltiin menetelmä kuvioittaisten puustotietojen tuottamiseen segmentoimalla latvuksia puoliautomaattisesti ilmakuvilta. Koska ohjelmisto mittaa vain latvuksen dimensiot segmentoinnin perusteella, on sovelluksessa päädytty ennustamaan ensin puun rinnankorkeusläpimita, josta johdetaan muut puukohtaiset tunnuksat. Toisaalta ohjelmisto laskee kuviokohtaiset tunnuksat kaikkien segmenttien perusteella, ei esim. koealoittain. Vaikka yksittäisen puun läpimitan ennustaminen on epätarkkaa, mittausten suuren lukumäärän vuoksi kuviotason keskiläpimita voidaan estimoida luotettavammin. Pituus- ja läpimitamallien luotettavuutta ei valitettavasti tiedetä, mutta oletettavasti niiden laadinta-aineisto on ollut varsin pieni ja alueellisesti suppea, mikä osaltaan heikensi luotettavuutta. Malliketjun pituus luonnollisesti aiheuttaa kumulatiivista virhettä malliketjun loppuun mentäessä.

Menetelmän virhelähteitä ovat etenkin:

- 1) Osa latvuksista (aluspuut) jää löytymättä.
- 2) Segmentin koko on väärä (esim. puuryhmä segmentoituu yhteen tai kuusista saadaan segmentoitua vain latvuksen kirkkain osa).
- 3) Segmentille laskettu puulajiestimaatti on väärä.
- 4) Rinnankorkeusläpimitan laskentamalli antaa yli- tai aliarvioita kyseiselle maantieteelliselle alueelle (vrt. Etelä-Suomi–Lappi).
- 5) Puun pituuden laskentamalli ei sovi ko. maantieteelliselle alueelle.
- 6) Puun tilavuuden laskentamalli ei sovi ko. maantieteelliselle alueelle.

Lisäksi tutkimuksen tuloksia tarkasteltaessa on huomattava, että tarkistustuloksista lasketut tosiarvot eivät ole virheettömiä, vaan sisältävät otanta-, mitaus- ja mallivirheitä.

Kokenut tulkitsija on käyttänyt ohjelmaa useamman vuoden ja verrannut tulkintatuloksia aika ajoin maastomittauksiin. Kokemus näkyy selvänä

tasoerona tulkinnan luotettavuudessa verrattaessa kokemattomaan tulkitsijaan. Vaikka tulkitsijoita oli vain kaksi, on selvää, että hyvään tulkintatulokseen vaaditaan henkilökohtaisten taipumusten lisäksi koulutusta, joka sisältää myös maastokäyntejä. Maastokäyntien tarkoituksena on ”kalibroida silmä” alueen puuston ja maaston ominaisuuksiin, minkä jälkeen esimerkiksi puuston suhteellisen koon ja tiheyden hahmottaminen ilmakuvalta on luotettavampaa. Tämä puolestaan auttaa tulkitsijaa löytämään oikeat parametrit luotettavammin ja nopeammin.

Kokeneen tulkitsijan keskiläpimitan ja keskipituuden estimaatit täyttävät metsäsunnittelun lähtötiedoille asetetut tarkkuustavoitteet (vrt. Hiltunen ym. 2002). Sen sijaan kokemattoman tulkitsijan estimaatit eivät yllä laatuvaatimuksiin minkään tunnuksen osalta. Keskipituuden ja tilavuuden ennusteita voitaisiin tarkentaa kalibroimalla pituusmallien parametreja paikallisilla hakkuukonemittauksilla. Sen sijaan läpimitamallien kalibrointiin soveltuva aineistoa ei juuri ole, vaan mallien laadintaan tulisi kerätä kattavampi aineisto.

Kokeneella tulkitsijalla rungoista jäi löytymättä viidennes ja kokemattomalla puolet. Kokeneen tulkitsijan tulosta voi pitää melko hyvänä, sillä Dralle ja Rudemo (1996) saivat numeerisella ilmakuvatulkinnalla runkoluvun harhaksi 10–55 % ja Uuttera ym. (1998) 28–77 %. Analyytisellä stereotyökojeella on saatu ruotsalaistutkimuksissa runkoluvun harhaksi 30–40 % (Talts 1977, Ericson 1984). Runkoluvun aliarviointi onkin erittäin yleistä kuvatulkinnalle, ja siihen liittyviä ongelmia on yritetty ratkaista mm. Maltamon ym. (2002) tutkimuksessa. Usein runkoluvun virhe painottuu läpimitaltaan pieniin runkoihin, joiden vaikutus puolestaan kuvion tilavuuteen on pieni. Toisaalta pelkkä runkoluvun luotettava kalibrointi, kehitysluokasta ja metsikön rakenteesta riippuen, voisi nostaa menetelmän luotettavuutta huomattavasti.

Pohjapinta-alan estimaatit olivat myös huomattavia aliarvioita. Tämä voi johtua siitä, että segmentoimatta jääneet puut eivät olleet pelkkiä aluspuita tai että latvusalan ja rinnankorkeusläpimitan väliset mallit tuottavat läpimitalle aliarvioita. Tilavuuden harha johtuu suurimmaksi osaksi pohjapinta-alan aliarviosta. Samansuuntaisia tuloksia on havaittu myös muissa tutkimuksissa, joissa on käytetty

digitaalista ilmakuvamateriaalia (esim. Lehikoinen 1999). Toisaalta laser-tutkakuvilta on saatu erittäin lupaavia tuloksia sekä tilavuuden, pituuden että pohjapinta-alan arvioinnissa (esim. Hyyppä ja Inkinen 1999).

Tutkimusaineistossa oli muutamia kuvioita, joilla tilavuus oli huomattavan suuri. Jos nämä kuviot jätetään huomiotta, paranevat tulokset olennaisesti. Tällöin kokeneella tulkitsijalla myös tilavuuden tarkkuus mahtuu Hiltusen ym. (2002) esittämiin rajoihin, ja pohjapinta-alan tarkkuus on aivan ylärajalla. Kokemattomankin tulkitsijan tulokset paranevat paljon, mutta ovat silti liian epätarkkoja metsäsunnittelun lähtötiedoiksi. Epätarkoille estimaateille suuripuuosioilla kuvioilla on luonnollinen selitys: Latvuston sulkeutuessa puun tilavuus kasvaa edelleen. Kun latvusala ei kuitenkaan enää kasva, aiheutuu tästä sulkeutuneissa metsiköissä tilavuuden aliarviota.

Yhtenä mahdollisena virhelähteenä pidettiin kuvion sijaintia kuvalla. Koska ilmakuva on keskusprojektiio, puut kuvautuvat suoraan ylhäältä päin ainoastaan nadiiripisteessä; muualla puut näyttävät kallistuvan kuvan reunoilta päin. Kuvion etäisyys kuvan nadiirista ei selittänyt kuitenkaan kuviokohdasta estimaatin poikkeamaa tosiarvosta millään tunnoksella.

Väärävärikuivilta pystytään helposti erottamaan toisistaan havu- ja lehtipuut. Männyn ja kuusen erottaminen sen sijaan näyttää toisinaan olevan vaikeaa ammattilaisellekin. Männyn ja kuusen sävyarvojen erot ovat erittäin pienet, joten jopa puulajien silmävarainen erottaminen saati automaattinen tulkinta on paikoin erittäin hankalaa. Puolen metrin kuva-alkion koolla joidenkin rajattujen latvusten sisälle voi jäädä minimissään 1–10 kuva-alkiota, joiden perusteella on erittäin haasteellista luokitella havainnot läheisiin luokkiin. Kuvien erotuskyvyn parantuessa yhden segmentin alueelle jää useita kuva-alkioita, jolloin voidaan käyttää hyväksi segmentin sisäistä tekstuuria, ja luokittelu onnistuu todennäköisesti paremmin (Brandtberg 1997). Tosin yhdellä kuusikoksi tulkitulla männiköllä kuusen tilavuusosuus oli lähes yhtä suuri kuin männyn ja yhdellä männiköksi tulkitulla kuusikolla päinvastoin. Tällöin olisikin ollut parempi verrata esim. puulajiositteittaisia pohjapinta-alatai tilavuusosuuksia kuin pääpuulajitulkintoja.

Tutkimuksen kuvioaineistossa oli vain 20 kuviota, mikä vaikeutti tulosten tulkintaa. Aineistossa ei ollut

lainkaan taimikoita, mutta niiden tulkintaan oli kuva-alkion kokokin liian suuri. Kun latvus on samaa kokoluokkaa kuva-alkion kanssa, lähes kaikkien kuva-alkioiden sävyarvot ovat itse asiassa sekoitus latvuksen ja maanpinnan sävyarvoista. Myös nuorissa kasvatusmetsiköissä saattaa tulla ongelmia, jos latvusto on hyvin tiheä. Tämän vuoksi kaksi nuorta kasvatusmetsikköä jäi tulkitsematta.

Aikatutkimustarkasteluja ei tehty kuvioaineiston pienuuden vuoksi. Menetelmä on kuitenkin paljon maastotyötä nopeampi. Aineiston koon vuoksi myöskään estimoinnin luotettavuudesta ei voi vetää lopullisia johtopäätöksiä, vaikka tämän tutkimuksen perusteella luotettavuus ei metsäsunnittelun lähtötietojen tuottamiseen riitäkään. Menetelmää tulisi jatkossa kokeilla suuremmalla aineistolla selvittäen myös ajanmenekkiä.

Käytettyä sovellusta tulisi kehittää edelleen käyttäjäystävällisemmäksi, ja sovellukseen pitäisi liittää ominaisuuksia, joiden kautta tulkinnan laatua voitaisiin helpommin kontrolloida eri tulkitsijoiden välillä. Sovelluksen tulostietoihin pitäisi lisätä myös puuston iän arvioiva malli, jotta sovelluksella voitaisiin kattaa koko inventointiketju.

Mahdollisessa operatiivisessa sovelluksessa kannattaisi hyödyntää vanhoja maastoinventointitietoja. Puuston ikä saataisiin tällöin vanhoista tiedoista. Samoin uudistuskypsät metsiköt, joilla menetelmä näyttäisi tuottavan tilavuudelle aliarvioita, voitaisiin rajata ikätiedon perusteella pois tulkinnasta. Toinen mahdollisuus olisi poistaa menetelmän keskiarvoistavaa vaikutusta kaikkien estimoitavien suureiden osalta käyttämällä tulkinnan tukena (ennakkoinformaationa) esimerkiksi vanhasta inventoinnista saatavaa keski-ikäraasteria. Tällä saataisiin apua sekä tulkintaan että tulosten kalibrointiin (erittäin vanhojen metsien puustotunnuksia voitaisiin kalibroida teknisesti ylöspäin). Ongelmakuviot, kuten tiheiköt tai kaksijaksoiset metsiköt, löydettäisiin ilmakuvatiedon ja vanhan inventointitiedon avulla, ja voitaisiin jättää maastossa inventoitaviksi. Edellisen inventoinnin tieto pääpuulajista ja puulajisuhteista auttaisi puulajin tulkinnassa. Hakkuuehdotukset puolestaan johdettaisiin latvusten segmentoinnilla tuotetuista puustotunnuksista. Mikäli kuviotietojen tasalaatuisuusvaatimuksesta luovuttaisiin, voitaisiin suunnittelupinta-alaa kasvattaa inventoimalla menetelmällä esim. välialuetilojen kuvioita.

Kiitokset

Tutkimus toteutettiin Maa- ja metsätalousministeriön rahoittamassa hankkeessa ”Metsätietojen ylläpito”. Kiitämme rahoittajaa, kuvatulkitsijoita sekä professori Matti Maltamoja ja kahta tarkastajaa varteenotetuista kommentteista käsikirjoitukseen.

Kirjallisuus

- Brandtberg, T. 1997. Towards structure-based classification of tree crowns in high spatial resolution aerial images. *Scandinavian Journal of Forest Research* 12: 89–96.
- Dralle, K. & Rudemo, M. 1996. Stem number estimation by kernel smoothing in aerial photos. *Canadian Journal of Forest Research* 26: 1228–1236.
- Ericson, O. 1984. Beståndsinventering med flygbild. *Forskningsstiftelsen Skogsarbeten, Redogörelse* 8. 19 s.
- Gonzales, R. & Woods, R. 1993. *Digital image processing*. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Mass. 716 s.
- Hiltunen, J., Rissanen, P., Uuttera, J., Anttila, P. & Hyvönen, P. 2002. Uudet kuvioittaisen arvioinnin menetelmät – arvio soveltuvuudesta yksityismaiden metsäsuunnitteluun. *Käsikirjoitus*.
- Hyvönen, P. 2002. Kuvioittaisten puustotunnusten ja toimenpide-ehdotusten estimointi k-lähimmän naapurin menetelmällä Landsat TM -satelliittikuvan, vanhan inventointitiedon ja kuviotason tukiaineiston avulla. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2002: 363–379. (Tämä numero).
- Hyypä, J. & Inkinen, M. 1999. Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner. *The Photogrammetric Journal of Finland* 16(2): 27–42.
- Ilvessalo, Y. 1950. On the correlation between the crown diameter and the stem of trees. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 38(2).
- Korpela, I. 2000. 3-D matching of tree tops using digitized panchromatic aerial photos. *Lisensiaatitutkimus*. Helsingin yliopisto, metsävarojen käytön laitos. 109 s.
- Laasasenaho, J. 1982. Taper curves and volume functions for pine, spruce and birch. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 108.
- Lehtikainen, M. 1999. Puustotunnusten arviointi optimoidusta videokuvasta hahmontunnistusmenetelmällä. *Metsäsuunnittelun ja -ekonomian pro gradu*. Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta. 81 s.
- Maltamo, M., Tokola, T. & Lehtikainen, M. 2002. Estimating stand characteristics by combining single tree pattern recognition of digital video imagery and a theoretical diameter distribution model. *Hyväksytyt sarjaan Forest Science*.
- Näslund, M. 1937. Skogsförsöksanstaltens gallringsförsök i tallskog. *Meddelanden från Statens Skogsförsöksanstalt* 29.
- Pitkänen, J. 2001. Individual tree detection in digital aerial images by combining locally adaptive binarization and local maxima methods. *Canadian Journal of Forest Research* 31(5): 832–844.
- Pratt, W. 1991. *Digital image processing*. John Wiley & Sons, Inc., Sun Microsystems, Inc. Mountain View, USA. 698 s.
- Talts, J. 1977. Mätning i storskaliga flygbilder för beståndsdatabasinsamling. *Skogshögskolan, Institutionen för skogsuppskattning och skogsindelning, Rapporter och uppsatser* 6. 102 s.
- Uuttera, J., Haara, A., Tokola, T. & Maltamo, M. 1998. Determination of the spatial distribution of trees from digital aerial photographs. *Forest Ecology and Management* 110: 275–282.

17 viitettä