



Sakari Tuominen



Anssi Pekkarinen

Sakari Tuominen ja Anssi Pekkarinen

Kuvioraja-aineiston virheiden korjaaminen numeeristen ortoilmakuvien ja automaattisen segmentoinnin avulla

Tuominen, S. & Pekkarinen, A. 2007. Kuvioraja-aineiston virheiden korjaaminen numeeristen ortoilmakuvien ja automaattisen segmentoinnin avulla. *Metsätieteen aikakauskirja* 2/2007:87–100.

Tässä tutkimuksessa on pyritty kehittämään menetelmiä kuvioittaisella arvioinnilla tuotettujen vanhojen kuvioiden rajojen korjaamiseen numeeristen ortoilmakuvien automaattisen segmentoinnin avulla. Vanhoissa kuviorajoissa esiintyy paljon erityyppisiä sijaintivirheitä, jotka johtuvat suureksi osaksi siitä, että kuvioinnissa käytetty ilmakehävaikeus-aineisto ei ole ollut riittävän tarkkaa maastossa olevien kohteiden paikantamiseen. Lisäksi osassa kuvioista raja-alue on muuttunut edellisestä inventointiajankohdasta esim. tehtyjen metsänhoitotoimenpiteiden takia.

Kuvioinnin korjaamisessa käytettiin kolmea vaihtoehtoista menetelmää. Ns. moodisegmentti-menetelmässä tutkimusalueelle luotiin suuri joukko pienehköjä segmenttejä, joille annettiin sen vanhan kuvion tunnus, jolle suurin osa segmentistä kuului. Kaikki samaan alkuperäisen kuvioinnin kuvioon kuuluneet segmentit yhdistettiin uudeksi kuvioksi. Toisessa menetelmässä muodostettiin automaattisesti uusi kuviointi, jossa uusien kuvioiden minimikooksi asetettiin 0,2 ha. Kolmannessa menetelmässä segmentit jaettiin kahteen pääryhmään: 1) todennäköisesti oikein rajatuilla alueilla oleviin segmentteihin ja 2) segmentteihin, jotka olivat todennäköisesti virheellisesti rajatulla alueella. Pääryhmässä 1 segmenteille palautettiin sen alkuperäisen kuvion numero, jonka alueella ne sijaitsivat. Pääryhmässä 2 segmentit yhdistettiin ilmakehävaikeus-aineiston perusteella lähimpiin naapurikuvioihin tai segmentteihin.

Esitetyillä menetelmillä voidaan helposti korjata pienet siirtymät selväpiirteisessä kuviorajassa. Täysin automaattinen vanhan kuvioinnin virheiden korjaaminen ei kuitenkaan onnistu kuviointi-virheiden komplisoidun luonteen vuoksi.

Asiasanat: numeeriset ilmakehävaikeudet, automaattinen segmentointi, metsäinventointi
Yhteystiedot: *Tuominen*, Metla, Helsingin toimipaikka, Unioninkatu 40 A, 00170 Helsinki; *Pekkarinen*, Joint Research Centre of the European Commission, Institute of Environment and Sustainability, Land Management and Natural Hazards Unit, T.P. 261, I-21020 Ispra (VA), Italy. Sähköposti sakari.tuominen@metla.fi
Hyväksytty 4.6.2007

I Johdanto

Kuvioittainen arviointi on Suomessa jo pitkään kyllä hallitseva metsätalouden suunnittelun tiedonkeruumenetelmä. Voimassa olevat kuvioittaisen arviointiin perustuvat metsäsuunnitelmat kattoivat vuoden 2001 lopussa noin 67 % yksityismetsien pinta-alasta ja metsäkeskusten ja metsänhoitoyhdistysten vuotuinen kuvioittaisen arvioinnin kattama alue on 2000 luvulla ollut noin miljoona hehtaaria (Metsäsuunnittelun... 2003). Valtion mailla kuvioittain toteutettu metsäsuunnittelun tiedonkeruu ja maastopäivitys puolestaan kattaa noin 0,5 miljoonaa hehtaaria vuosittain (vuodet 1992–2002) (Ismo Minkkinen, Metsähallitus, Metsätalouden keskusyksikkö).

Kuvioittainen arviointi on sekä inventointi- että metsätalouden järjestelymenetelmä (Poso 1994). Sen avulla toteutetun tiedonkeruun tulokset tallennetaan yleensä metsätietojärjestelmään. Tällaisen järjestelmän tietosisältö koostuu tyypillisesti sijainti- ja ominaisuustiedosta. Esimerkkinä näistä tiedoista voidaan mainita kuviorajojen sijainti sekä kuvioiden puustoa ja maaperää kuvaavat ominaisuustiedot. Metsätietojärjestelmien kehityksen sekä paikkatietoaineistojen paremman saatavuuden myötä metsätietojärjestelmiin on varsinaisen inventoinnissa tuotetun tiedon lisäksi mahdollisuus tallentaa myös muuta paikkatietoaineistoa, kuten esimerkiksi numeerisessa muodossa olevaa peruskarttatietoa, sekä orto-oikaistuja numeerisia ilmakuvia. Näiden tietolähteiden integrointi metsätietojärjestelmiin on paljastanut merkittävän puutteen kuvioittaisessa arvioinnissa; sen avulla tuotettujen kuviorajojen sijaintitarkkuus on heikko.

Kuviorajojen sijaintivirheet johtuvat useista syistä. Osa kuvioraja-aineistosta on tuotettu digitoimalla rajat digitointipöytään kiinnitetyltä paperi-ilmakuvasta tai vaihtoehtoisesti läpinäkyvältä kalvolta, jolle rajat on ensiksi piirretty ilmakuvapositiivilta. Tätä tekniikkaa käytettäessä karttaan syntyy helposti asemointivirhettä, jos digitointipöytään kiinnitetty karttaphoja tai kuva pääsee liikkumaan tai irtoamaan kesken digitoinnin. Lisäksi tällä tekniikalla digitoinnin tarkkuus riippuu analogisen ilmakuvatulosteen mittakaavasta. Toinen kuviorajojen sijaintivirheiden merkittävä syy etenkin vanhoissa kuviorajoissa on se, että kuvioita rajattaessa ei ole otettu huomioon kuvauksen keskusprojektiosta ja maaston topogra-

fiasta aiheutuvia säteissiirtymiä. Nämä virheet erottuvat selvästi, kun tarkastellaan kuviointia nykyisin yleisessä käytössä olevien orto-oikaistujen ilmakuvien kanssa. Kolmantena merkittävänä ongelmana ovat kuviorajojen ajantasaisuus. Jos metsätietojärjestelmän ilmakuvamateriaali ja tallennettu kuvioiden rajatieto ovat eri ajankohdalta, niin kuvioiden rajauksen jälkeen tehdyt metsänhoitotoimenpiteet näkyvät loppukäyttäjälle kuviorajan sijaintivirheenä tapauksissa, joissa toimenpiteet eivät tarkasti noudata vanhoja kuviorajoja.

Nykyisin yleisesti käytössä olevia digitaalisia ortoilmakuvia voidaan pitää yhtenä tarkimmista paikkatietoaineistoista ja siten ne sopivat erinomaisesti kuvionraja-aineistossa olevien sijaintivirheiden korjaamiseen. Kuviorajojen manuaalinen korjaaminen ortoilmakuvan mukaiseksi on kuitenkin erittäin työläs ja aikaa vievä tehtävä, varsinkin suurilla metsäpinta-aloilla toimittaessa, eikä useimmilla metsäorganisaatioilla ole siihen tarvittavia henkilöstöresursseja. Toisaalta ilmakuvat sisältävät monenlaista informaatiota, kuten sävy, tekstuuri, muoto, koko jne., jota voidaan käyttää ilmakuvan automaattisessa tulkinnassa (esim. Lillesand ja Kiefer 1994) ja tulkintaan perustuvassa automaattisessa tai puoliautomaattisessa kuvioinnissa (Sell 2002) ja siten myös kuviorajojen sijaintivirheiden automatisoidussa korjaamisessa.

Kuvasegmentoinnilla tarkoitetaan yleensä kuvapikselien ryhmittelyä spatiaalisesti jatkuviksi alueiksi, niin että samaan segmenttiin rajattavat pikselit tai pikseliryhmät täyttävät jonkinlaisen samankaltaisuuden kriteerin, joka voi perustua esim. kuvan sävyyn tai tekstuuriin (Neubert ja Meinel 2003). Kaukokuvien automaattista segmentointia on hyödynnetty metsäninventoinnissa erilaisiin tarkoituksiin. Monilähteisissä metsien inventointisovelluksissa, jotka perustuvat kaukokuvien numeeriseen tulkintaan, kuvasegmentointia on käytetty homogeenisten spatiaalisten yksiköiden luomiseksi kuvapiirteiden irrottamista ja metsikkötunnusten estimointia varten (kuvatulkintayksikköinä) (esim. Pekkarinen 2002, Pekkarinen ja Tuominen 2003). Segmentointia on hyödynnetty myös yksittäisten puiden paikantamisen apuvälineenä (esim. Hyypä ym. 2001, Maltamo ym. 2003, Hyypä ym. 2005). Kolmas merkittävä käyttötapa on ennakkokuvioinnin tuottaminen kuvioittaisen arvioinnin pohjaksi (esim. Sell 2002, Hyvönen ym. 2005).

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää digi-

taalien ilmakuviin automaattiseen segmentointiin perustuvien kuviointimenetelmien käyttökelpoisuutta kuviorajoissa olevien sijaintivirheiden korjaamisessa ja verrata tuotettuja kuviointeja orto-oikaistujen ilmakuviin perusteella tehtyyn manuaaliseen kuviointiin.

2 Aineistot

Tutkimusalueena käytettiin Etelä-Savossa Punkaharjun, Savonlinnan ja Sulkavan kuntien alueella sijaitsevaa Metsähallituksen omistamaa aluetta, jonka kokonaispinta-ala oli 7248 ha (josta vesialuetta 363 ha). Tältä alueelta hankittiin olemassa oleva kuvioraja-aineisto ja ilmakuvat. Tutkimusalueen sijainti on esitetty kuvassa 1.

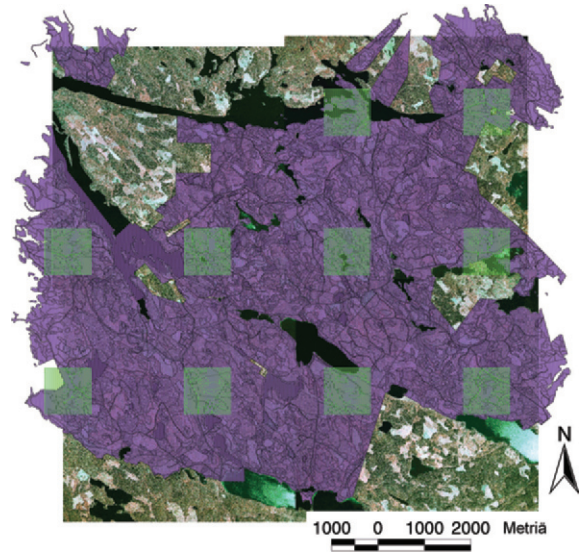
Ilmakuva-aineistona käytettiin neljää vääräväri-ilmakuvaa (NIR, R ja G -kanavat) vuodelta 2002, jotka oli kuvattu 1:30000 mittakaavaan. Alkuperäiset filmit oli skannattu 15 µm:n resoluutiolla, ja digitalisoidut kuvat oli orto-oikaistu 0,5 metrin

maastoresoluutioon. Numeerisista ilmakuvista rakennettiin mosaiikki, jonka kattama alue yhtenäiskoordinaatistossa oli 3594162–3604614 (I) ja 6825681–6836133 (P). Alkuperäinen kuvioraja-aineisto oli ote Metsähallituksen vektorimuotoisesta kuvio- ja kiinteistöraja-aineistosta. Aineiston hankintahetkellä kuvioaineiston edellinen maastoarviointi oli tehty pääosin vuosien 1990–2002 aikana. Alkuperäinen kuviointi ulottui osittain kuvamosaiikin ulkopuolelle, ja tämä osa leikattiin kuviokartasta pois. Tutkimusalue käsitti siis kuvioverkon ja ilmakuviin yhteispeittoalueen. Kuvioverkon ulkorajana olevat kiinteistön rajat oletettiin tarkoituksi, ja näitä ei muutettu kuvioverkon sijaintivirheitä korjattaessa.

Automaattisesti tuotettujen kuviorajojen testauksen varten tutkittavalle alueelle sijoitettiin systemaattisesti 10 testiruutua, joiden koko oli 1 km × 1 km (100 ha). Testiruudut sijoitettiin 3 kilometrin välein sekä pohjois-etelä- että itä-länsi-suunnassa. Tutkimusalueen epäsäännöllisen muodon takia testiruutujen alueelle osui myös tutkimusalueeseen kuulumatonta aluetta. Nämä osat rajattiin tarkastelun ulkopuolelle. Kuvassa 2 on esitetty ilmakuva-peitto, kuvioraja-aineisto sekä kuviointien testauksessa käytetyt 10 testiruutua.



Kuva 1. Tutkimusalueen sijainti.



Kuva 2. Tutkimuksessa käytetyt ilmakuvat, alkuperäisen kuvioinnin kattama alue (violetti varjostus) ja testiruudut (vihreä viivoitus).

3 Menetelmät

3.1 Ilmakuvien automaattinen segmentointi

Segmentointi toteutettiin Metsäntutkimuslaitoksessa kehitetyllä kaksivaiheisella menetelmällä. Menetelmän ensimmäinen vaihe perustuu nk. ohjattujen puiden menetelmän ideaan (Narendra ja Goldberg 1980, Pekkarinen 2002), ja siinä etsitään homogeeniset siemenalueet paikallisten reunanvoimakkuuksien avulla. Siemenalueiden tunnistamisen jälkeen ne kuvaelementit, jotka eivät kuulu niihin, liitetään siemenalueisiin ”vedenjakaja” (watershed) -tyyppisen algoritmin avulla. Näin saatuja segmenttejä kutsutaan aliaalisegmentteiksi. Menetelmän toisessa vaiheessa aliaalisegmentit yhdistellään kuvantulkinnassa käytökelpoisiksi yksiköiksi lähimmän naapurin (nearest neighbour) menetelmällä. Segmenttien yhdistelyä voidaan ohjata kahden parametrin, segmentin minimikoon ja segmenttien kuvapiirteiden välisen minimietäisyyden avulla. Etäisyys d naapurisegmenttien i ja j välillä määritetään segmenttien p :n kanavan kuvapiirteiden x avulla niiden virittämässä kuva-avaruudessa segmenttien kuvapiirteiden välisen euklidisen etäisyyden avulla (kaava 1). Tässä tapauksessa segmenttien kuvapiirteinä käytettiin kunkin ilmakuvakanavan sävykeskiarvoja ja -hajontoja.

$$d(i, j) = \sqrt{\sum_{k=1}^p (x_{ip} - x_{jp})^2} \quad (1)$$

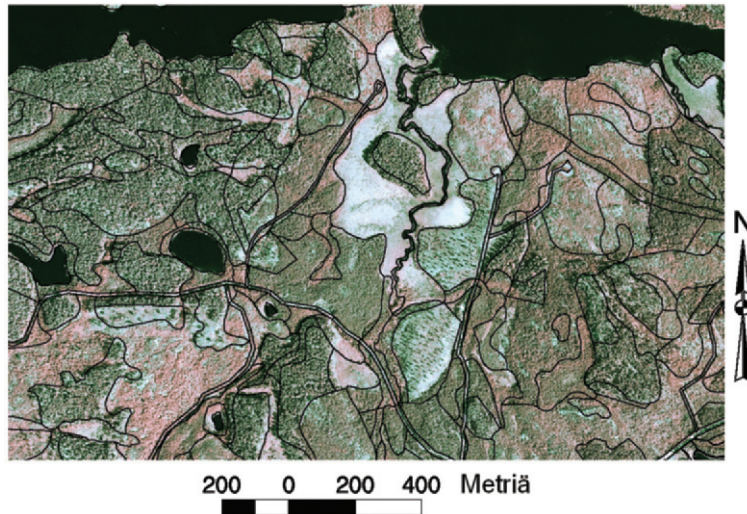
Kaukokartoituskuvioiden automaattisten segmentointimenetelmien käyttökelpoisuutta ennakkokuvioinnissa on vertailtu (Sell 2002), mukaan luettuna tässä tutkimuksessa sovellettu menetelmä, ja vertailun perusteella tässä sovellettua segmentointimenetelmää voidaan pitää yhtenä tähän tarkoitukseen parhaiten soveltuvista. Laajemmin eri segmentointimenetelmien ominaisuuksia ovat tarkastelleet esim. Neubert ja Meinel (2003).

3.2 Sovelletut kuviorajojen korjausmenetelmät

Ilmakuvasegmentointiin perustuvassa kuvioinnin sijaintivirheiden korjauksessa voidaan noudattaa

erilaisia lähestymistapoja, jotka eroavat toisistaan sen suhteen, miten niiden tuottama ja vanha kuviointi vastaavat toisiaan. Tarkastellut lähestymistavat ja niiden edut (+) ja haitat (–) ovat:

- Jokaiselle vanhan kuvioinnin kuviolle tuotetaan vastine korjatussa kuvioinnissa niin, että vanhan ja uuden kuvioinnin kuvionumerot vastaavat toisiaan.
 - + Kuvioiden ominaisuustiedot voidaan suoraan siirtää vanhalta kuviolta sitä vastaavalle uudelle kuviolle
 - + Kuvioverkon korjaamisessa ei synny kuvioita, joille ei ole lainkaan ominaisuustietoja
 - Menetelmä ei pysty erottamaan uusia rajoja, jotka seuraavat käsittelyistä, jotka pilkkovat vanhoja kuvioita
 - Jos sijaintivirheet ovat suuria ja kuvioiden rajat epäselviä, menetelmän automatisointi on ongelmallista ja se todennäköisesti tuottaa heikon tuloksen
- Edellisen muunnelmana voidaan soveltaa lähestymistapaa, jossa pyritään siihen, että uudet ja vanhat kuviot vastaavat toisiaan, mutta ilmakuvan perusteella selvästi heterogeenisiä kuvioita voidaan jakaa kahdeksi tai useammaksi kuvioksi
 - + Uusi kuviointi vastaa kohtalaisesti ilmakuvan kuvausajankohdan tilannetta metsässä
 - + Ilmakuvapiirteiden suhteen jokainen selvästi erotuva kuvioraja voidaan ottaa huomioon
 - + Pääsääntöisesti uusien kuvioiden ominaisuustiedot ovat johdettavissa vanhojen kuvioiden tiedoista
 - + Toimii periaatteessa hyvin tilanteissa, jossa käsittelyt ovat pilkkoneet vanhoja kuvioita ja/tai vanhat kuviot muuten heterogeenisiä
 - Kaikille uuden kuvioverkon kuviolle ei ole suoraan saatavissa ominaisuustietoja
- Muodostetaan automaattisesti täysin uusi kuviointi ilmakuvaan perustuen
 - + Uusi kuviointi vastaa hyvin ilmakuvan kuvausajankohdan tilannetta metsässä
 - + Jokainen ilmakuvapiirteiden perusteella erottuva (potentiaalinen) kuvioraja voidaan ottaa huomioon
 - Uusille kuviolle ei ole suoraan olemassa ominaisuustietoja – ne täytyy tuottaa kuviotietokannasta tai mitata maastossa.
 - Menetelmä ei pysty ottamaan huomioon sellaisia kuvion rajausperusteita, jotka eivät ole johdettavissa ilmakuvapiirteistä



Kuva 3. Ote Metsähallituksen alkuperäisestä kuvioinnista ilmakuvalla

- Menetelmä vaatii jonkin verran käsin tehtyä kuvioiden yhdistelyä käyttökelpoisen lopullisen kuvioinnin aikaansaamiseksi

Tässä tutkimuksessa sovellettiin kolmea vaihtoehtoista menetelmää alkuperäisen Metsähallituksen talouskuvioinnin korjaamisessa (kuva 3). Kaikki sovelletut menetelmät perustuvat ilmakuvasegmenttien käyttämiseen uuden kuvioinnin pohjana, mutta eroavat toisistaan mm. sen suhteen, millä tavalla vanhaa kuviointia tässä käytetään.

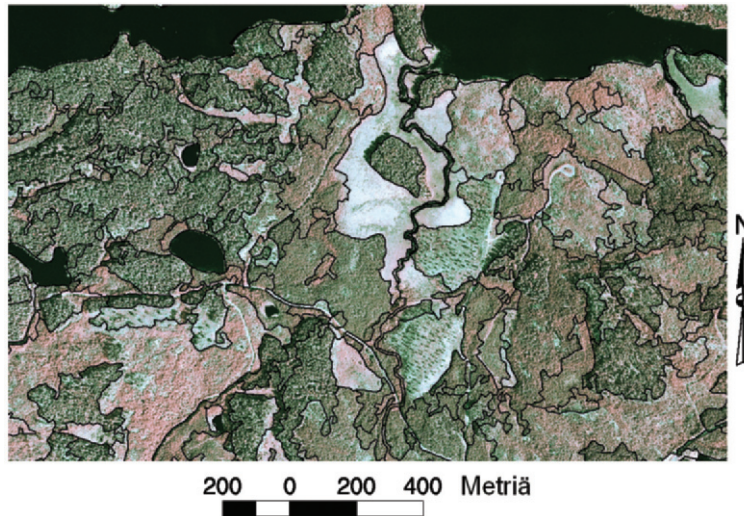
Menetelmä 1: Moodisegmenttimenetelmä

Tämä menetelmä vastaa lähinnä sitä lähestymistapaa, jossa jokaisella vanhan kuvioverkon kuviolla on vastine korjatussa kuvioverkossa ja päinvastoin. Tässä menetelmässä tutkittavalle alueelle luotiin kohdassa 3.1. kuvatulla menetelmällä suuri joukko suhteellisen pienialaisia segmenttejä numeeristen ilmakuvapiirteiden pohjalta. Näistä yhtä aaria pienemmät segmentit yhdistettiin seuraavassa vaiheessa kuvapiirteiltään lähimpään naapurisegmenttiin. Kullekin näin muodostetulle segmentille annettiin sen vanhan kuvion tunnus, jolle suurin osa segmentistä kuului. Tämä tieto talletettiin segmentin omi-

naisuustiedoksi. Tämän jälkeen segmentit, joiden ominaisuustietona oli sama kuviotunnus, yhdistettiin yhdeksi uudeksi kuvioksi. Tällä menetelmällä jokaista vanhan kuvioverkon kuviota vastasi yksi korjatun kuvioverkon kuvio (kuva 3). Moodisegmenttimenetelmää kokeiltiin myös suuremmilla segmenteillä, joiden minimikooksi oli asetettu 0,2 ha. Kuvassa 4 on esitetty ote moodisegmenttimenetelmällä tuotetusta kuvioinnista.

Menetelmä 2: Täysin uusi kuviointi

Samoin kuin moodisegmenttimenetelmässä, tässäkin luotiin tutkittavalle alueelle aluksi suuri joukko pieniä segmenttejä (kuva 5A). Tämän jälkeen segmenttejä yhdisteltiin lähimmän naapurin menetelmällä toisiinsa. Yhdistämisessä testattiin useita eri minimietäisyysparametrien arvoja ja syntyvien segmenttien minimikooksi määrättiin 0,2 ha (kuva 5B). Perusteena tälle oli se, että näin arvioitiin erottuvan omiksi kuvioikseen kaikki sellaiset alueet, joiden erottaminen on kuvioinnissa tarpeen. Toisin sanoen tarkoituksena oli luoda kuvioita, joita yhdistelemällä voidaan saada aikaan käyttökelpoinen lopullinen kuviointi tarvitsematta digitoida uusia rajoja. Tässä menetelmässä ei siis huomioitu vanhoja kuviora-



Kuva 4. Ote moodisegmenttimenetelmällä tuotetusta kuvioinnista

joja lainkaan. Ote uudesta kuvioinnista on esitetty kuvassa 5.

Menetelmä 3: Iteratiivinen virheellisesti rajattujen alueiden uudelleenyhdistely

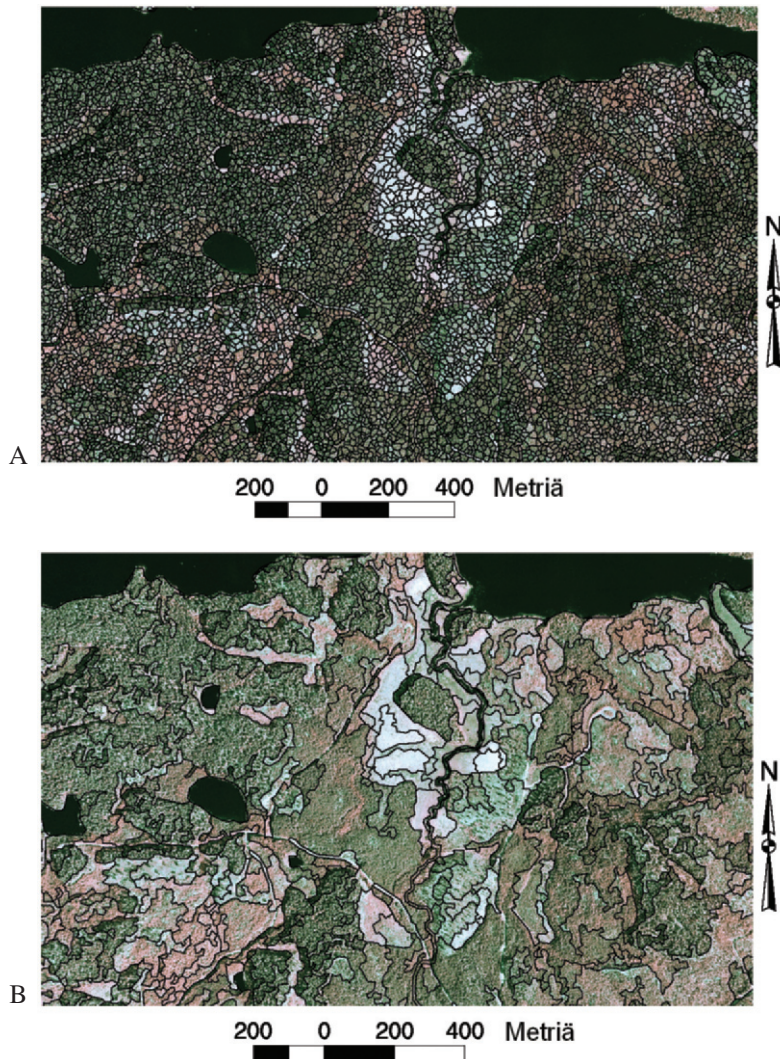
Alustavien ilmakuvasegmenttien luominen suoritettiin tässä menetelmässä samoin kuin edellisissä. Yhdistelyvaiheessa segmenttien minimikooksi asetettiin 0,01 ha.

Vanhan kuvioinnin potentiaalisia virheitä etsittiin erotusmenetelmän avulla. Erotusmenetelmässä jokaiselle segmentille laskettiin ilmakuvan avulla erotusarvo, joka tuotettiin kanavittain vanhan kuvion alueelta lasketun sävykeskiarvon ja segmentin sävykeskiarvon erotuksena. Tämän jälkeen kaikkien kolmen ilmakuvakanavan erotuskeskiarvot summatettiin ja summasta laskettiin itseisarvo.

Tulkinnan helpottamiseksi erotuskuvan jatkuvat itseisarvot jaettiin harvempiin luokkiin yhtäläisen todennäköisyyden (equal probability quantizing) algoritmin avulla (Haralick ym. 1973). Menetelmä tuottaa luokat, joiden esiintymistodennäköisyys kuvalla on yhtä suuri. Luokkien lukumääräksi asetettiin 30. Ne luokat, joiden erotuskuvan itseisarvo on korkea edustavat kuvion rajauksen suhteen epäilyttäviä, siis todennäköisesti virheellisesti rajattuja, alueita.

Luokituksen perusteella segmenttiaineisto voitiin siis jakaa kahteen pääryhmään: 1) todennäköisesti oikein rajatuilla alueilla oleviin segmentteihin ja 2) segmentteihin, jotka olivat todennäköisesti virheellisesti rajatulla alueella (kuva 6A). Pääryhmässä 1 segmenteille palautettiin sen alkuperäisen kuvion numero, jonka alueella ne sijaitsivat. Pääryhmässä 2 segmenttejä alettiin yhdistellä ilmakuvapiirteiden perusteella lähimpiin naapurikuvioihin tai segmentteihin. Yhdistämistä jatkettiin, kunnes kaikki segmentit todennäköisillä virhealueilla oli liitetty kuvapiirteiden suhteen lähinnä samanlaiseen naapurikuvioon (kuva 6B). Tämä menetelmä edustaa siis, samoin kuin moodisegmenttimenetelmä, sitä lähestymistapaa, jossa jokaisella vanhan kuvioverkon kuviolla on vastine korjatussa kuvioverkossa. Menetelmä mahdollistaa myös kokonaan uusien kuvioiden muodostamisen virheellisesti rajatuille alueille, mutta tätä mahdollisuutta ei tässä työssä tutkittu.

Menetelmää testattaessa käytettiin kahta eri vaihtoehtoa, jotka erosivat toisistaan sen suhteen, kuinka suuri osuus segmenteistä (ja kuinka monta luokkaa 30:stä) sijoitettiin potentiaalisiin virheellisesti rajattuihin alueisiin. Ote tällä menetelmällä tuotetusta kuvioinnista on esitetty kuvassa 6.

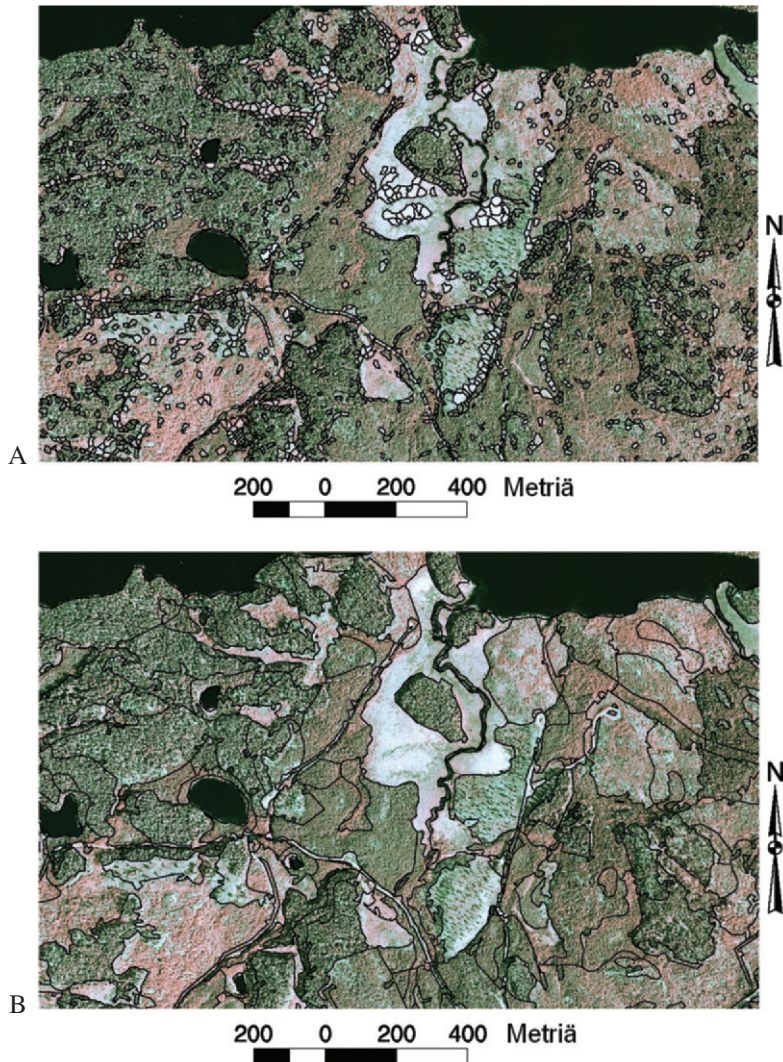


Kuva 5. Täysin uusi automaattisesti tuotettu kuviointi. A) Intiaalisegmentit, B) Lopullinen segmentointi

3.4 Automaattisesti korjatun kuviorajauksen testaus referenssikuvioinnin avulla

Referenssiaineistoksi automaattiselle kuviorajojen korjaukselle tutkimusalueelle muodostettiin manuaalisesti kokeneen ilmakuvatulkitsijan tekemä ns. oikea kuviointi. Tässä kuviorajauksen perusteena käytettiin ilmakuvilta tulkittavissa olevia puustotun-

nuksia, joiden suhteen homogeeniset alueet rajattiin omiksi kuvioiksi. Tulkitut puustotunnukset olivat puuston pituus, kehitysluokka, puulaji ja puuston tiheys. Referenssikuvioinnissa ei huomioitu muita kuin ilmakuvatulkintaan perustuvia rajausperusteita. Manuaalista kuviointia referenssinä käytettäessä on hyväksyttävä se tosiseikka, että oikeaa kuviointia ei voida täysin objektiivisesti määrittellä, ja eri henkilöiden tuottamat kuvioinnit poikkeavat aina

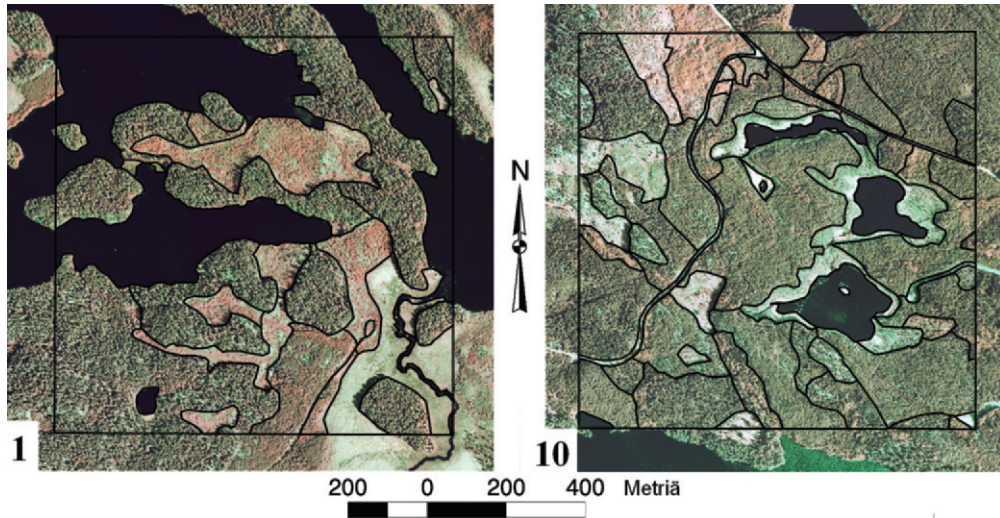


Kuva 6. Todennäköisesti virheellisesti rajatut alueet (segmentit A) ja virhealueiden iteratiivisen uudelleenyhdistelyprosessin tuloksena aikaansaatu kuviointi B).

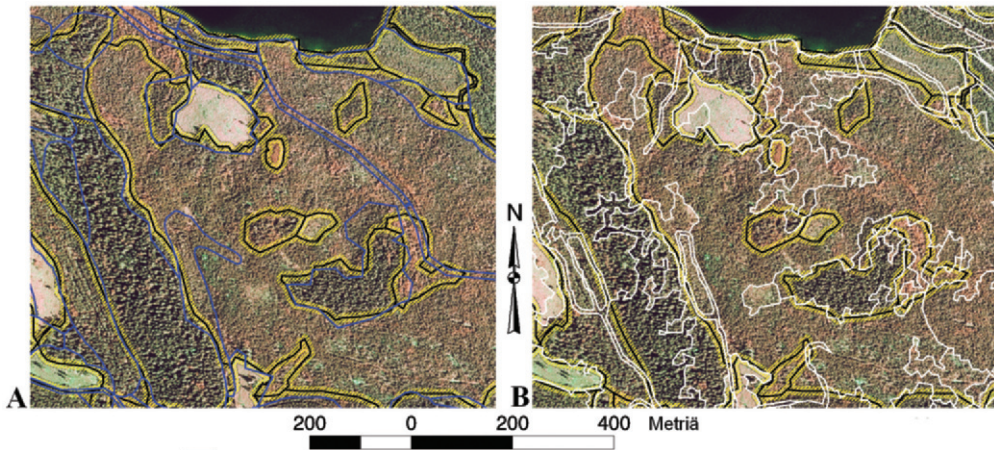
toisistaan jonkin verran (esim. Poso 1983). Ote referenssikuvioinnista (testiruudut 1 ja 10) on esitetty kuvassa 7.

Alkuperäisen kuvioinnin ja automaattisten kuviointimenetelmien tuottamia kuviointeja verrattiin referenssikuviointiin siten, että tarkasteltavan menetelmän tuottaman kuvion rajauksen katsottiin olevan oikea, jos raja oli korkeintaan 10 m päässä referenssikuvioinnin tuottamasta rajasta. Analysoin-

nissa apuna käytettiin referenssikuvioinnin rajojen ympärille muodostettua vyöhykettä (bufferia), jonka alueella oleva osuus vertailtavan kuviointimenetelmän tuottamasta kuviorajasta katsottiin oikein rajatuksi. Vyöhykkeen ulkopuolella oleva osa tarkasteltavan kuviointimenetelmän tuottamasta kuviorajasta katsottiin ns. ylimääräiseksi rajaksi. Mikäli joltakin referenssikuviorajauksen rajan 10 metrin vyöhykkeeltä puuttui automaattisen kuviointimenetelmän



Kuva 7. Referenssikuviointi, testiruudut 1 ja 10.



Kuva 8. Referenssikuviointi (musta viiva), sen ympärille luotu 10 metrin vyöhyke, jonka alueelle osunut osa vertailtavaa kuviorajaa tulkitaan oikein rajatuksi (keltainen viivoitus), alkuperäinen kuviointi (sininen viiva, A) ja uusi kuviointi (valkoinen viiva, B).

tuottama kuvioraja, katsottiin tältä osin oikea kuvioraja puuttuvaksi. Sovellettu menetelmä perustuu ns. epsilon-vyöhykemenetelmään, joka on tarkoitettu viivamaisten kohteiden sijaintitarkkuuden määrittämiseen (Bolstad ja Smith 1992). Kuvassa 8 on havainnollistettu referenssikuviointia ja sen kummallekin puolelle luotua 10 metrin vyöhykettä suhteessa alkuperäiseen (A) ja uuteen (B) kuviointiin.

Voidaan olettaa, että automaattiset kuviointime-

netelmät tuottavat enemmän kuvioita (ja enemmän kuviorajaa) kuin mitä samalle alueelle tehtävässä tyypillisessä metsätalouskuvioinnissa olisi. Tämä johtuu ennen kaikkea siitä syystä, että metsätalouskuvioinnissa kaikkien ilmakuvilta erotettavissa olevien metsiköiden rajaaminen omiksi kuvioiksi ei ole tarkoituksenmukaista. Tämän seikan ottaminen huomioon ilmakuvan perusteella tehtävässä automaattisessa kuvioinnissa on kuitenkin vaikeaa,

joten lopullisen kuvioinnin tuottaminen vaatinee aina jonkin verran manuaalista viimeistelyä. Ylimääräisten kuviorajojen poistaminen ihmistyönä digitointiohjelmalla on hyvin nopeaa verrattuna siihen, että jouduttaisiin digitoimaan käsin uusia rajoja. Automaattista kuvioinnin korjaamismenetelmää kehitettäessä onkin syytä lähteä siitä, että kehitettävän menetelmän herkkyyks löytyä kaikki tarpeelliset kuviorajat on niin suuri, että ylimääräisten kuviorajojen syntyminen on hyväksyttävää. Näin ollen ylimääräinen kuvioraja automaattisessa menetelmässä on paljon pienempi ongelma, kuin täysin väärä tai puuttuva raja, mikä on otettava huomioon sovellettujen kuviointimenetelmien tulosten vertailussa.

4 Tulokset

Kaikki sovelletut korjausmenetelmät tuottivat alkuperäistä kuviointia enemmän kuviorajaa. Referenssikuvioinnissa kuviorajan kokonaispituus oli kuitenkin alkuperäistäkin kuviointia pienempi. Sovelletuista korjausmenetelmistä menetelmä 2 eli täysin uusi, vanhasta kuviorakenteesta riippumaton kuviointi tuotti eniten kuvioita ja kuviorajaa. Syynä tähän on se, että alkuperäinen kuviointi on luonteeltaan metsätalouskuviointi. Sen sijaan menetelmä, jossa tuotetaan täysin uusi kuviointi, erottelee omiksi kuvioikseen kaikki ilmakuviointien suhteen toisistaan eroavat metsiköt. Moodisegmenttimenetelmän

(menetelmä 1) ja iteratiivisen virheellisesti rajattujen alueiden uudelleenyhdistelymenetelmän tuottamissa kuvioinneissa (menetelmä 3), jotka molemmat perustuvat vanhojen kuvioiden uudelleen asemointiin, kuviorajan määrä oli likimain sama mutta selvästi suurempi kuin alkuperäisessä kuvioinnissa. Tämä johtuu lähinnä siitä, että automaattinen kuviointi noudattaa tarkemmin ilmakuvaan mukaista rajausta kuin alkuperäinen manuaalinen kuviointi, jossa rajaviiva on jonkin verran yleistetty (ks. kuva 8B).

Täysin uusi kuviointi tuotti kaikkein eniten oikeaa kuviorajaa suhteessa referenssikuviointiin, ja siitä puuttui vähiten oikeaa kuviorajaa. Toisaalta tämä menetelmä tuotti kaikkein eniten myös ylimääräistä kuviorajaa. Toiseksi eniten oikeaa kuviorajaa tuotti iteratiivinen virhealueiden uudelleenyhdistelymenetelmä, jonka tuottamassa kuvioinnissa puuttui myös toiseksi vähiten oikeaa kuviorajaa. Siinä oli myös uusi kuviointi -menetelmää huomattavasti vähemmän ylimääräistä kuviorajaa. Kolmanneksi parhaan tuloksen oikean ja puuttuvan kuviorajan määrien suhteen antoi moodisegmenttimenetelmä, jonka ero edelliseen verrattuna oli hyvin pieni yhtäläillä oikean, puuttuvan kuin ylimääräisenkin kuviorajan määrien suhteen. Alkuperäinen kuviointi oli kaikkia automaattisesti tuotettuja kuviointeja huonompi oikean ja puuttuvan kuviorajan määrien suhteen, tosin siinä oli myös kaikkein vähiten ylimääräistä kuviorajaa. Eri kuviointimenetelmien tuottamien kuviorajojen määrät on esitetty taulukossa 1.

Tulosten mukaan täysin uusi kuviointi -menetelmä tuotti enemmän oikeaa kuviorajaa kuin mikä ku-

Taulukko 1. Alkuperäisen ja automaattisten kuviointimenetelmien tuottaman kuvioraja-aineiston ominaisuudet referenssikuviointiin verrattuna.

	Kuviorajaa yhteensä, m	Oikeaa kuvio-rajaa, m ^{a)}	Ylimääräistä kuviorajaa, m ^{b)}	Puuttuvaa kuviorajaa, m ^{c)}
Alkuperäinen kuviointi	185029	101795	83234	52081
Moodisegmenttimenetelmällä korjattu kuviointi	218047	121497	96549	42150
Täysin uusi kuviointi	334256	160423	173833	22828
Iteratiivisen virheellisesti rajattujen alueiden uudelleenyhdistelyn avulla korjattu kuviointi	221934	125006	96928	38708
Referenssikuviointi (= ”oikea kuviointi”)	151768	151768	0	0

^{a)} kuviorajaa, joka on korkeintaan 10 m sivussa referenssikuvioinnin mukaisesta rajauksesta

^{b)} kuviorajaa, jota ei ole rajattu referenssikuvioinnissa

^{c)} kuvioraja, joka puuttuu tai on väärässä paikassa

viorajan kokonaismäärä referenssikuvioinnissa (eli oikeassa kuvioinnissa) oli. Tämä tulos johtuu siitä, että referenssikuvioinnin rajaviiva oli huomattavasti yleistetty verrattuna automaattisiin kuviointeihin, joissa raja noudatti pikkutarkasti ilmakuviointien mukaista vaihtelua, ja teki paljon mutkia, jolloin kuviorajan pituus tuli hyvin suureksi verrattuna manuaalisiin kuviointeihin.

Kuviorajan määrien suhteen myös manuaalisesti tuotetut kuvioinnit, alkuperäinen kuviointi ja referenssikuviointi, poikkesivat toisistaan; referenssikuvioinnissa oli selvästi vähemmän kuviorajaa kuin alkuperäisessä kuvioinnissa. Tämä johtuu siitä, että alkuperäisessä kuvioinnissa on kuvioita, joiden rajausperuste ei ole nähtävissä ilmakuvalta, ja siten nämä kuvat luonnollisestikin puuttuvat referenssikuvioinnista.

5 Tulosten tarkastelu

Testiaineiston kuvioiden rajauksessa oli runsaasti erilaisia virheitä. Nämä virheet voidaan jakaa kolmeen luokkaan:

1. Kuviorajan sijaintivirheet, joissa kuvioinnin kohde eli metsikkö(kuvio) on selkeästi tunnistettavissa ilmakuvalta
2. Kuviointivirheet, joissa kuvioita ei voitu tunnistaa ilmakuvalta eikä niiden rajaukselle voitu erottaa selkeää perustetta.
3. Muuttuneet kuvat, joiden rajaus oli selkeästi muuttunut esimerkiksi kuvioinnin ja ilmakuvan kuvausajankohdan välillä toteutetun hakkuun vuoksi.

Ainoastaan täysin uuden kuvioinnin tuottamisella voidaan ratkaista kaikkien edellä mainittujen virhetyyppien ongelmat. Kuviorajan sijaintivirheiden korjaamiseen sopivat moodisegmenttimenetelmä ja iteratiiviseen virhealueiden yhdistämiseen perustuva menetelmä. Moodisegmenttimenetelmässä käytettävien parametrien valinta vaikuttaa ratkaisevasti menetelmällä tuotetun kuvioinnin laatuun. Suurten sijaintivirheiden korjaaminen edellyttää suurten segmenttien käyttöä, koska rajaa voidaan siirtää korkeintaan yhden segmentin alueella. Iteratiivinen yhdistelymenetelmä puolestaan edellyttää, että suurin osa alkuperäisestä kuvioista sijaitsee ilmakuvalta oikean kuvion alueella.

Muussa tapauksessa kuvioilta laskettu sävykeskiarvo ei ole edustava ja menetelmän avulla tuotettu arvio virheellisesti rajattujen kuvioiden määrästä ja sijainnista on altis virheille. Menetelmä kuitenkin korjaa moodisegmenttimenetelmää paremmin suuremmatkin poikkeamat rajan sijainnissa.

Saatujen tulosten perusteella voidaan todeta, että esitetyillä menetelmillä voidaan automaattisesti korjata pienet siirtymät selväpiirteisessä kuviorajassa. Yksinkertaisimmillaan tällaiset tapaukset koskevat tilannetta, jossa selvä kuvioraja on digitointivaiheessa siirtynyt väärään paikkaan esimerkiksi ilmakuvan asemointivirheen vuoksi. Täysin automaattinen vanhan kuvioverkon virheiden korjaaminen ei esitetyillä menetelmillä kuitenkaan onnistu, koska osa kuviointivirheistä on luonteeltaan sellaisia, ettei niitä voi kuvatiedon perusteella automaattisesti korjata. Lievemässä tapauksessa kuvio voi esimerkiksi olla selvästi tunnistettavissa ilmakuvalta, mutta sen rajaus on siinä määrin virheellinen, että suurin osa kuvion alueesta sijaitsee toisen kuvion alueella. Tämä ongelma on tavallinen esimerkiksi tapauksessa, jossa on kapeita pitkänomaisia kuvioita vierekkäin. Tällaisessa tapauksessa vanhan kuvion ja segmentin vastaavuutta on vaikea havaita automaattisesti. Toinen, automaattisilla menetelmillä vielä vaikeammin ratkaistavissa oleva tapaus on sellainen, jossa vanhan kuvion rajaus on siinä määrin epämääräinen, että ilmakuvan visuaalisellakaan tarkastelulla ei välttämättä voida tunnistaa kuvioita, jolle rajaus on tarkoitettu. Tällaisessa tapauksessa kuvioinnin automaattinen korjaaminen siten, että vastaavuus vanhoihin kuvioihin säilyisi, ei ole mahdollista. Tällaisessa tapauksessa kokonaan uuden kuvioinnin tuottaminen antaisi todennäköisesti paremman lähtökohdan kuvioinnin korjaamiselle, mutta silloin ratkaistavaksi ongelmaksi jää ominaisuustiedon siirtäminen uusille kuvioille.

Vaikka segmentointia voidaan suhteellisen helposti hyödyntää pienten sijaintivirheiden korjaamisessa, on sillä muutamia rajoitteita. Menetelmällä tuotettujen rajojen sijaintitarkkuutta voivat heikentää esimerkiksi kuvilla esiintyvät varjot. Varjojen aiheuttamat ongelmat konkretisoituvat aukeiden alueiden ja varttuneen puuston raja-alueella, jos puuston varjot lankeavat aukealle alueelle. Tällöin varjostettu osa liitetään segmentoinnissa virheellisesti yhteen suuriuustoisen kuvion kanssa, koska varjosegmenttien

spektriset ominaisuudet muistuttavat enemmän vartuneeseen metsään muodostuvia segmenttejä. Näin aukean alueen muodostaman kuvion pinta-alaa aliarvioidaan ja suuripuustoisien kuvion pinta-alaa vastaavasti yliarvioidaan. Varjoalueiden lisäksi ilmakuville esiintyy eri tekijöistä johtuvaa sävyarvojen vaihtelua, joiden takia samantyyppiset metsiköt näyttävät erilaisilta eri puolilla kuvaa. Näihin kuuluu esim. epäsymmetrinen heijastus (bidirektionaalinen reflektanssi), jonka vaikutuksesta auringon puoleinen osa kuvaa näyttää tummemmalta, ja auringosta pois päin oleva kuva kirkaammalta myötä- ja vastavalon vaikutuksesta (esim. Li ja Strahler 1992, Holopainen ja Wang 1998, Pellikka ym. 2000).

Kuvioiden jakamisesta syntyneet uudet kuviot (esim. tilanteessa, jossa vain osa kuviosta hakattu) olisi mahdollista ottaa huomioon myös moodisegmenttimenetelmässä ja iteratiiviseen virhealueiden yhdistämiseen perustuvassa menetelmässä, mikäli ilmakuvan segmenttikohtaisen sävykeskiarvon perusteella voitaisiin tunnistaa uudet (hakkuu) kuviot, esim. käyttämällä sopivaa kynnyksiarvoa segmenttien sävyeroille tunnistamaan todelliset muutokset. Epäsymmetrisen heijastuksen aiheuttama sävyarvojen vaihtelu ilmakuvan eri osissa on kuitenkin merkittävä ongelma pikselien sävyihin perustuvalla kuvien numeeriselle tulkinnaalle. Ongelma on ratkaistavissa käyttämällä radiometrisesti korjattua kuvaa. Automaattinen segmentointi on taas luonteeltaan paikallinen operaatio, joten epäsymmetrisestä heijastuksesta johtuvan sävyarvovaihtelun merkitys segmentoinnin tulokseen on vähäinen. Segmentoinnin kannalta ongelma on pikemminkin sen herkkyyks kuvapiirteiden paikalliselle vaihtelulle. Tämän vuoksi esimerkiksi harvapuustoisien kuvion sisällä olevat aukot rajautuvat helposti omiksi segmenteikseen. Paikallisen vaihtelun vaikutusta voidaan kuitenkin lieventää kuvan esikäsittelyllä ja varsinaisessa segmentoinnissa käytettäviä parametreja, mm. segmentin minimikokoa, säätämällä. Segmentoinnin tulosta voidaan myös parantaa kiinnittämällä suurempaa huomiota niiden kuvapiirteiden valintaan, joita käytetään segmentoinnin perusteena. Tyypillisiä automaattisessa kuvatulkinnaassa käytettäviä piirteitä ovat kovalta irrotetut sävy- ja tekstuuripiirteet. Tekstuuripiirteinä voidaan käyttää pikselien sävyarvojen hajontoja tai tunnuksia, jotka perustuvat pikselien sävyarvojen semivariansseihin (semivariance) tai yhteismatriiseihin

(co-occurrence matrix) (esim. Woodcock ym. 1988, Hyppänen 1996, Holmgren ym. 1997, Wulder ym. 1998). Esim. Tuominen ja Pekkarinen (2005) ovat soveltaneet eteenpäinvalintaa (sequential forward selection) valittaessa kuvapiirteitä suuresta joukosta ilmakuvalla erotettuja sävy- ja tekstuuritunnuksia. Eteenpäinvalinnassa ensimmäisellä iteraatiolla poimitaan piirteiden joukosta paras piirre (joka maksimoi annetun valintakriteerin), ja kullakin seuraavalla iteraatiolla lisätään piirre, joka maksimoi annetun valintakriteerin jo poimitujen kanssa. Tällöin piirrevalinnalla saatiin aikaan huomattavaa parannusta metsikkötunnusten estimointitarkkuuteen.

Automaattisen kuvioinnin muodostamisessa olisi myös mahdollista hyödyntää kaukokuvatiedon lisäksi muuta digitaalista paikkatietoa. Monilähteisessä valtakunnan metsien inventoinnissa metsätalouden maa erotetaan muista maankäyttöluokista erilaisten numeeristen maastokarttaelementtien avulla (esim. Tomppo 1993), jolloin maaluokan raja muodostaa pakollisen kuviorajan. Esimerkiksi maaperäkarttatietoa kangasmaiden ja soiden rajoista tai kallioista voidaan käyttää pakollisena kuviorajana metsätalouden maan sisällä, koska näiden rajojen voidaan olettaa pysyvän maastossa paikallaan inventoinnista toiseen. Sama koskee esim. myös lainsäädännöllisesti määriteltyjen arvokkaiden luontokohteiden rajausta. Metsätalouden uudemmissa kaukokartoitusaineistoista laserkeilausaineisto soveltuisi erittäin hyvin automaattisen kuvioinnin pohjaksi. Laserkeilausaineistossa kuviointi muodostuu lähinnä puuston pituuden perusteella, jolloin puulajierojen tunnistamista varten tarvittaisiin lisäksi esim. optisen alueen kaukokuva-aineistoa. (Esim. Naeset ja Bjerknæs 2001, Naeset 2004, Uuttera ym. 2006)

Useissa tapauksissa kuvioverkon rajojen sijaintivirheiden korjaaminen edellyttää automaattisen menetelmän tuottamien rajojen korjailua käsityönä. Koska vaadittavan digitointityön määrä vaihtelee kuvioinnin laadusta ja kohteen ominaisuuksista riippuen, saattaa täysin uuden kuvioinnin tuottaminen olla useimmissa tapauksissa mielekkäin ratkaisu. Tällaisessa tapauksessa ennakkokuviointi voidaan nähdäksemme toteuttaa automaattisen segmentoinnin avulla. Segmentointi ja segmentoinnin tuloksen sujuva jalostaminen varsinaiseksi kuvioinniksi edellyttää kuitenkin erityisesti näihin tarkoituksiin kehitettyjen ohjelmistojen käyttöä.

Kirjallisuus

- Bolstad, P.V. & Smith, J.L. 1992. Errors in GIS. *Journal of Forestry* 90(11): 21–29.
- Haralick, R., Shanmugam, K. & Dinstein, I. 1973. Textural features for image classification. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* 3: 610–621.
- Holmgren, P., Thuresson, T. & Holm, S. 1997. Estimating forest characteristics in scanned aerial photographs with respect to requirements for economic forest management planning. *Scandinavian Journal of Forest Research* 12: 189–199.
- Holopainen, M. & Wang, G. 1998. The calibration of digitized aerial photographs for forest stratification. *International Journal of Remote Sensing* 19(4): 677–696.
- Hypänen, H. 1996. Spatial autocorrelation and optimal spatial resolution of optical remote sensing data in boreal forest environment. *International Journal of Remote Sensing* 17: 3441–3452.
- Hyvönen, P., Pekkarinen, A. & Tuominen, S. 2005. Segment-level stand inventory for forest management. *Scandinavian Journal of Forest Research* 20(1): 75–84.
- Hyypä, J., Kelle, O., Lehtikoinen M. & Inkinen M. 2001. A segmentation-based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 39: 969–975.
- , Mielonen, T., Hyypä, H., Maltamo, M., Yu, X., Honkavaara, E. & Kaartinen, H. 2005. Using individual tree crown approach for forest volume extraction with aerial images and laser point clouds. *Julkaisussa: Vosselman, G. & Brenner, C. (toim.). Proceedings of the ISPRS Workshop Laser scanning 2005, Enschede, Alankomaat, 12.–14. syyskuuta 2005. s 144–149.*
- Li, X. & Strahler, A.H. 1992. Geometric-optical bidirectional reflectance modeling of the discrete crown vegetation canopy: effect of crown shape and mutual shadowing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 30: 276–292.
- Lillesand, T. & Kiefer, R. 1994. *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons, Inc. New York. 750 s.
- Maltamo, M., Tokola, T. & Lehtikoinen, M. 2003. Estimating stand characteristics by combining single tree pattern recognition of digital video imagery and a theoretical diameter distribution model. *Forest Science* 49: 98–109.
- Metsäsuunnittelun uudistamistarpeet. 2003. Esiselvitys. Tapio, Maa- ja metsätalousministeriö, Metsäkeskukset, Metsäntutkimuslaitos. Raportti. 26 s. + liitteet.
- Narendra, P. & Goldberg, M. 1980. Image segmentation with directed trees. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 2(2): 185–191.
- Naasset, E. 2004. Practical large-scale forest stand inventory using small-footprint airborne scanning laser. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19: 164–179.
- & Bjercknes, K.O. 2001. Estimating tree heights and number of stems in young forest stands using airborne laser scanning data. *Remote Sensing of Environment* 78: 328–340.
- Neubert, M. & Meinel, G. 2003. Evaluation of segmentation programs for high resolution remote sensing applications. *Julkaisussa: Proceedings: Joint Workshop of ISPRS WG I/2,I/5 and IC WG II/IV and EARSeL Special Interest Group 3D Remote Sensing October 6–8, 2003, Hannover, Germany.*
- Pekkarinen, A. 2002. Image segment-based spectral features in the estimation of timber volume. *Remote Sensing of Environment* 82(2–3): 349–359.
- & Tuominen, S. 2003. Stratification of a forest area for multisource forest inventory by means of aerial photographs and image segmentation. *Julkaisussa: Corona, P., Köhl, M. & Marchetti, M. (toim.). Advances in forest inventory for sustainable forest management and biodiversity monitoring. Forestry Sciences 76. Kluwer Academic Publishers. s. 111–123.*
- Pellikka, P., King, D.J. & Leblanc, S. 2000. Quantification and reduction of bidirectional effects in aerial CIR imagery of deciduous forest using two reference land surface types. *Remote Sensing Reviews* 19: 1–4: 259–291.
- Poso, S. 1983. Kuvioittaisen arvioinnin perusteita. *Silva Fennica* 17(4): 313–349.
- 1994. Metsätalouden suunnittelun perusteet. Helsingin yliopiston metsävarojen käytön laitoksen julkaisuja 5. 155 s.
- Sell, R. 2002. Segmentointimenetelmien käyttökelpoisuus ennakkokuvioinnissa. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2002: 499–507.
- Tomppo, E. 1993. Multi-source national forest inventory of Finland. *Julkaisussa: Nyssönen, A., Poso, S. & Rautala, J. (toim.). Proceedings of Ilvessalo Symposium on National Forest Inventories, 17–21 Aug. 1992, Finland. The Finnish Forest Research Institute*

Research Papers 444. s. 52–60.

- Tuominen, S. & Pekkarinen, A. 2005. Performance of different spectral and textural aerial photograph features in multi-source forest inventory. *Remote Sensing of Environment* 94: 256–268.
- Uutera, J., Anttila, P., Suvanto, A. & Maltamo, M. 2006. Yksityismetsien metsävaratiedon keruuseen soveltuvilla kaukokartoitusmenetelmillä estimoitujen puustotunnusten luotettavuus. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2006: 507–519.
- Woodcock, C.E., Strahler, A.H., & Jupp, D.L.B. 1988. The use of variograms in remote sensing: I. Scene models and simulated images. *Remote Sensing of Environment* 25: 323–348.
- Wulder, M.A., LeDrew, E.F., Franklin, S.E. & Lavigne, M.B. 1998. Aerial image texture information in the estimation of northern deciduous and mixed wood forest leaf area index (LAI). *Remote Sensing of Environment* 64: 64–76.

27 viitettä