

**Metsätehon raportti 197
2.11.2006**

ISSN 1459-773X (Painettu)
ISSN 1796-2374 (Verkkajulkaisu)



Puun laatutiedon mittaaminen kuvasta

**Tampereen teknillisen yliopiston osaprojekti
Puun laadun mittaus ja lajittelu -hankkeessa**

***Petri Österberg
Heimo Ihalainen***

Puun laatutiedon mittaaminen kuvasta

**Tampereen teknillisen yliopiston osaprojekti
Puun laadun mittaus ja lajittelu -hankkeessa**

**Petri Österberg
Heimo Ihalainen**

Metsätehon raportti 197
2.11.2006

ISSN 1459-773X (Painettu)
ISSN 1796-2374 (Verkkajulkaisu)

Asiasanat: kuvankäsittely, puun laatu, vuosirenkaat, 2D-spektri

© Metsäteho Oy

Helsinki 2006

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	4
1 TAUSTA JA TAVOITTEET	4
2 AINEISTO JA MENETELMÄT	5
3 TULOKSET	7
3.1 Puun päätykuvista tehty analyysi.....	7
3.1.1 Lustonpaksuuskartta	7
3.1.2 Lustojen suuntakartta.....	10
3.1.3 Rungon ytimen haku.....	11
3.1.4 Päätykuvan polaarimuunnos	12
3.1.5 Kuoren paksuuden sekä päädyn halkaisijoiden mittaus	13
3.1.6 Laho ja lyly	14
3.1.7 Väri- ja mittakaavakalibrointi.....	14
3.2 Puulajin tunnistus kuoren päältä otetun kuvan perusteella	15
4 TULOSTEN TARKASTELU JA PÄÄTELMÄT	20
KIRJALLISUUS	21

TIIVISTELMÄ

Tampereen teknillisen yliopiston Mittaus- ja informaatiotekniikan laitoksen osuus PUULA – Puun laadun mittaus ja lajittelu -hankkeesta keskittyi tutkimukseen, jossa hyödynnetään pystytuusta, kaadetusta rungosta tai sahatarasta otettuja digitaalikuvia. Tutkimuksessa kehitettiin konenäkösovelluksia varten menetelmiä, joissa runko- ja katkaisupintakuvista tuotetaan puun laatutietoa digitaalista kuvankäsittelyä apuna käyttäen.

Tutkimuksessa pääpaino oli rungon katkaisupinnasta otetuissa kuvissa, joista pyrittiin selvittämään laatutietoja esimerkkeinä lustotiedot, kuoren paksaus ja laho. Rungon sivukuvia käyttäen tehtiin puulajin tunnistusta.

Tutkimus osoitti, että useimpia visuaalisella tarkastelulla havaittavia laatu-
piirteitä ja vikoja voidaan tunnistaa ja mitata kuvaan perustuvilla menetel-
millä laboratorio-olosuhteissa. Rajoituksia asettavat kuvattavan kohteen laatu
(sahajäljen sileys, kuvattavan pinnan puhtaus, valaistuksen tasaisuus
jne.). Kameran etäisyys kohteesta sekä kameran kennon resoluutio määrittä-
vät mittauksessa saatavan tarkkuuden. Karkeana esimerkkinä 3 megapikselin
kennolla varustetulla järjestelmäkameralla erottelukyvyyksi voidaan saada
 $\pm 0,5$ mm, kun kuvausetäisyys on metrin luokkaa. Tämä edellyttää melko
selvää värirajaa esimerkiksi lustojen tai kuoren ja puun välillä.

1 TAUSTA JA TAVOITTEET

Raportti on selvitys PUULA – Puun laadun mittaus ja lajittelu -hankkeen osaprojektista ”Puun laatutiedon mittaaminen kuvasta”. Projektissa tutkittiin ja kehitettiin menetelmiä puun laadun määrittämiseksi kuvasta. Projektissa tutkittiin myös tekstuuri- ja värianalyysimenetelmiä ja mittakaava- sekä väri-
kalibrointia. Kehitetyjä menetelmiä testattiin laboratorio-olosuhteissa kuvatuilla kuvasarjoilla. Tarkoituksena oli luoda perustaa varsinaisissa tuotekehityshankkeissa tehtävään kehitystyöhön. Tehtävänä oli siis selvittää uusien digitaalikuva-analyysitekniikoiden antamia mahdollisuuksia puun laadun mittauksessa. Tutkimus on suoritettu Tampereen teknillisessä yliopistossa Mittaus- ja informaatiotekniikan laitoksella. Tutkimus on suoraa jatkoa samalla laitoksella tehdylle PUUMI-projektille, jossa tutkittiin puutavar-
an mittauksen mahdollisuuksia digitaalikuvista. Edeltäneestä PUUMI-projektista valmistui diplomityö (Österberg 2002) ja se keskittyi lähinnä dimensiomittauksiin. Työssä myös kokeiltiin useita digitaalikuva-mittausmenetelmiä, esimerkiksi puulajin tunnistamista kyljestä otetun digitaaliku-
van perusteella. Muun muassa tätä aihetta tutkittiin lisää PUULA-hankkeessa.

Projekti sisälsi kaksi osaa. Tutkija, DI Petri Österbergin tehtävänä oli kehittää sekä viedä eteenpäin puun laadun mittauksessa tarvittavia menetelmiä. Tässä volyymiltään suuremmassa osuudessa keskityttiin pääosin puun pää-
dystä otetuista digitaalikuvista saatavaan informaatioon. Raportin luku 3.1 kuvaa tätä osiota. Tekn. yo. Tiina Suomela teki projektissa opinnäytetyönsä, joka käsitteli puulajin tunnistamista rungon kyljestä otettujen digitaaliku-
vien perusteella. Tutkimus on kuvattu raportin luvussa 3.2, ja tyhjentävästi tut-

kimus on raportoitu diplomityössä (Suomela 2005b). Projektin johtajana toimi professori Risto Ritala, ja laboratorioinsinööri, DI Heimo Ihalainen on ollut mukana sekä projektin käytännön johtamisessa että asiantuntijana menetelmäkehityksessä.

TTY:n osaprojektin tavoitteena oli siis tutkia digitaalikuva-analyysin mahdollisuuksia tulevaisuuden metsäteollisuussovelluksia silmällä pitäen. Sovellusmahdollisuuksia on olemassa koko logistisessa ketjussa hakkuukoneilta sahoille ja massatehtaille asti. Monet data-analyysimenetelmät ovat jo olemassa olevaa tietoa. Näistä tutkimuksemme kannalta merkittävimmät olivat tekstuurianalyysiin kuuluva 2D-spektri eli kuvalle pysty- ja vaakasuuntiin tehtävä Fourierin menetelmiin perustuva taajuusanalyysi sekä liukuva ikkuna, jossa kuvan eri alueita analysoidaan erikseen pienissä paloissa. Projektissa analyysimenetelmiä yhdisteltiin ja sovellettiin puun rungosta otetuille digitaalikuville. Analyysin tarkoituksena oli kehittää menetelmiä metsäpuolen konenäkösovelluksia varten. Tavoitteena oli myös saada joku/joitakin menetelmiä sellaiselle asteelle, että prototyypikokeiluja voitaisiin tehdä.

Varsinkin sahausuksessa tärkeä ominaisuustieto on pölkyn kuoreton läpimitta tai kuoren paksuus. Muita laatuksiteerejä ovat mm. laho ja väriviati, lyly, lenkous, oksaisuus, murtumat, rungon pyöreys, ytimen paikka, luston paksuus sekä näiden jakauma, sydän- ja mantopuuosuudet, kevät- ja kesäpuuosuudet tai rungossa olevat vieraat esineet.

2 AINEISTO JA MENETELMÄT

Tutkimuksen aineisto käsittää digitaalikameroilla otettuja puunrunkojen poikkileikkaus- ja pintakuvia. Poikkileikkauksia otettiin varastopinoista, ajoneuvokuormista ja laboratoriokuvauksia varten sahatuista puukiekoista. Aineisto käsitti sekä tervettä että lahoa, värivikaa ja lylypuuta sisältävää materiaalia. VTT:n Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan johtaman sahatavaran lujuusluokitusprojektin käyttöön kuvattiin lankkujen katkaisupintoja ja kuvista määritettiin lustotiedot lujuusanalyysia varten. Näytteitä käsiteltiin tarvittaessa, esimerkiksi pintoja hiottiin ja kasteltiin piirteiden paremman erottamisen onnistumiseksi. Kokonaisuudessaan kuvia tuli noin 15 000 kappaletta ja määrä vei yli 40 gigatavua levytilaa. Kuvapankista valittiin sopivia kuvia ja sarjoja analyysimenetelmien kehitystä ja testausta varten.

Käytössä oli kolme kaupallista digitaalijärjestelmäkameraa: Canon EOS D30, Nikon D70 ja Sigma SD10. Canonissa on anturina 3,1 megapikselin CMOS-kenno ja Nikonissa 6,1 Megapikselin CCD-kenno. Näissä punaista, sinistä ja vihreää valoa aistivat anturit (vrt. pikselit) ovat limittäin, jolloin jokaisen eri värikanavan pikseleiden välissä olevat puuttuvat kohdat laskeetaan Bayer-interpoloinnin avulla ympäröivistä pikseleistä. Sigmassa on Foveonin kehittämä 3,4 megapikselin kolmikerroksinen CMOS-kenno, jossa punaista, sinistä ja vihreää väriä aistivat anturit ovat päällekkäin. Jokainen pikselikenno aistii kaikkia värejä, toisin kuin kahdessa edellisessä, joten Foveonin 3-kerroksinen kenno vastaa perinteisellä tavalla toteutettua 10,2 me-

gapikselin kennoa. Foveonin kennoratkaisussa värien toisto ei kuitenkaan yllä vielä vanhempien menetelmien tasolle. Kaikki digitaalivalokuvassa esiintyvät värit ovat siis kohteesta heijastuneiden ja kameran kennon antureiden mittaamia punaisen, vihreän, ja sinisen värin kombinaatioita. Analyysiohjelmistona käytettiin MatLabia ja siinä useita ohjelmakirjastoja.

Käyttämämme kuvankäsittelymenetelmät perustuvat sekä tekstuuri- että värianalyysimenetelmiin. Koska kuva on aina kaksiulotteinen, ovat useimmat analyysimenetelmät myös kaksiulotteisia. Tekstuurimenetelmät perustuvat kohteen pinnan näkyvien piirteiden analysointiin eli tässä projektissa tekstuurit ja ovat esimerkiksi lustorakenne tai kuoren kuviointi. Merkittävin yksittäinen käytetty menetelmä oli tekstuurimenetelmiin kuuluva liukuva 2D-spektri, jota on käytetty useimpien tuloksien laskennassa. Kaksiulotteinen spektri esittää digitaalikuvaan taajuuskomponentteina ja esimerkiksi lustot aiheuttavat taajuuspiikin spektriin kohtaan, joka riippuu lustojen välisestä etäisyydestä ja suunnasta.

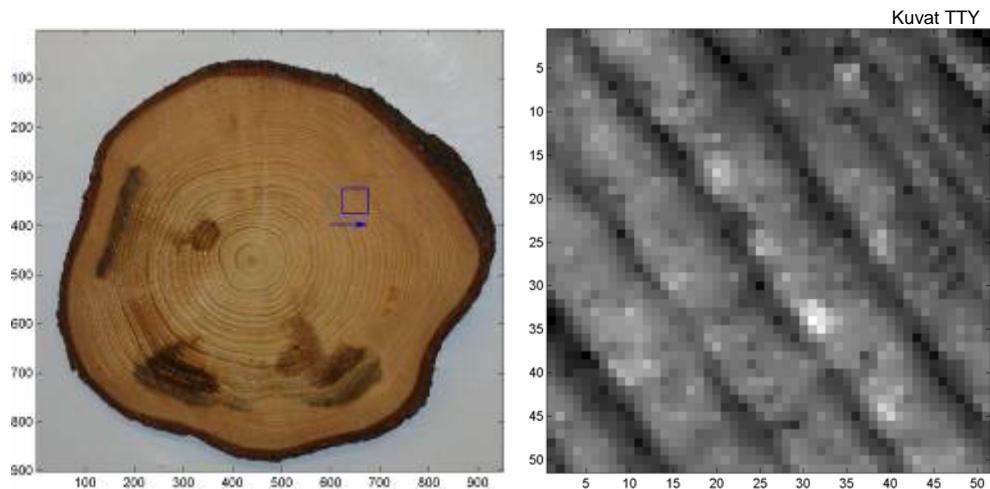
Digitaalikuvioiden tutkiminen aloitettiin kokeilemalla yksinkertaisia värianalyysimenetelmiä, kuten värikanavien jakoa komponentteihinsa, värikanavien muunnoksia sekä näiden kynnystystä. Hankaluutena havaittiin värin ja valaistuksen voimakkaatkin vaihtelut, joten värianalyysin tehokkaaseen käyttöön vaadittiin värikalibrointimenetelmiä. Niinpä siirryttiin kehittämään tekstuuri eli piirreanalyysimenetelmiä, koska tekstuurianalyysimenetelmät ”sietävät” paremmin värin ja valaistuksen vaihteluita eikä tällöin värikalibrointi ole tavallisesti välttämätöntä. Sekä puun päätykuvien että kuorikuvioiden kanssa käytimme useita tekstuuripohjaisia menetelmiä ja täydensimme niitä väriin perustuvilla menetelmillä.

Analyseissa käyttämiemme kuvien koko vaihteli, mutta monet puukiekoille tehdyistä analyyseistä suoritettiin kokonaisesta kuvasta leikatuille noin 1000×1000 pikseliä oleville kuville, jotka otettiin saharajälkisistä lahokiekoista. Tämän kuvasarjan kuvausväli (n. 130 cm) valittiin siten että jokainen (n. 300 kpl) kuvausjakson aikana tullut tyvikiekko mahtui kameran kuva-alueelle. Tässä kuvasarjassa yksi pikseli vastasi noin 0.3 millimetriä. Tavanomaisissa CCD- ja CMOS-kennoissa (Canon ja Nikon) oikea resoluutiotarkkuus ei ole aivan tätäkään Bayer-interpoloinnin vuoksi. Sigmakamerassa olevaa Foveonin kennoa käytettäessä interpolointia ei tarvitse tehdä. Todettakoon, että ohuimmat vuosirenkaat eivät aina erottuneet hyvin, joten resoluutio voisi olla parempi, vaikka tälläkin resoluutiolla saatiin mainioita tuloksia. Lankunpäätyjä kuvattaessa kamera voitiin asentaa noin 40 cm:n etäisyydelle. Useimmat lankun päätykuvat otettiin Sigmalla, jolloin päästiin hyvin tarkkaan resoluutioon: millimetrille mahtui 13 pikseliä ja tämä resoluutio on täysin riittävä lähes kaikkiin lustoanalyyseihin.

3 TULOKSET

3.1 Puun päätykuvista tehty analyysi

Puun päätykuville kokeilimme muutamia liukuvia tekstuurimenetelmiä ja liukuva 2D-spektri osoittautuikin hyväksi keinoksi useissa tapauksissa. Menetelmä sietä hyvin puun katkaisupinnan kuvassa olevia häiriöitä ja se toimi hyvin myös sahajälkisille kiekkoille. 2D-Spektriä käyttäen saatiin kuvatuksi lustorakenne, vaikka lustot saattoivat olla siellä täällä poikki tai näkymättömissä. Menetelmällä ei voitu analysoida yksittäisiä lustoja, mutta sillä voitiin määrittää keskimääräisiä piirteitä jokaisen puun päädyn alueella olevan pisteen ympäristöstä (kuva 1).

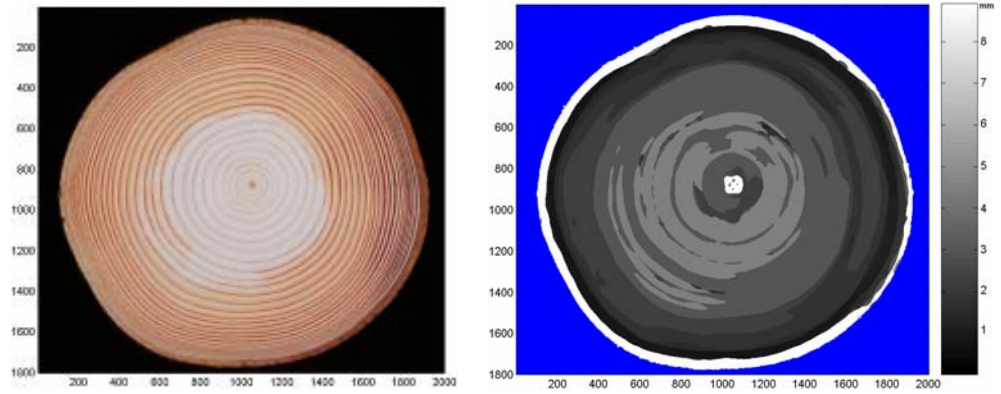


KUVA 1. Liukuvaan 2D-spektriin perustuvat menetelmät laskevat lustoparametreja pieniltä alueilta. Oikealla vasemmanpuoleisesta kuvasta leikatun palan yksi värikanava, josta piirteitä voidaan laskea. Kuvien akselit ovat pikseleitä.

3.1.1 Lustonpaksuuskartta

Ensimmäinen tekstuurianalyysiin perustuva tulos oli lustonpaksuuskartta. Puun vuosirengasanalyysi tehtiin liukuvalla 2D-spektrillä. Analyysi tehtiin pienelle alueelle kerrallaan, ja tärkeimpänä tuloksena spektristä saatiin keskimääräinen lustonpaksuus minkä tahansa pisteen ympäristössä. Kun laskenta tehdään koko kuvan yli ja lasketaan parametreja satojen tai tuhansien pisteiden ympäristöstä, saadaan lustonpaksuus- tai lustotiheyskartta (kuva 2). Laskennassa käytettävien pisteiden lukumäärä on valittavissa. Mitä useampi piste otetaan laskentaan mukaan, sitä parempi on lustonpaksuuskartan resoluutio. Vastaavasti laskenta-aika myös kasvaa.

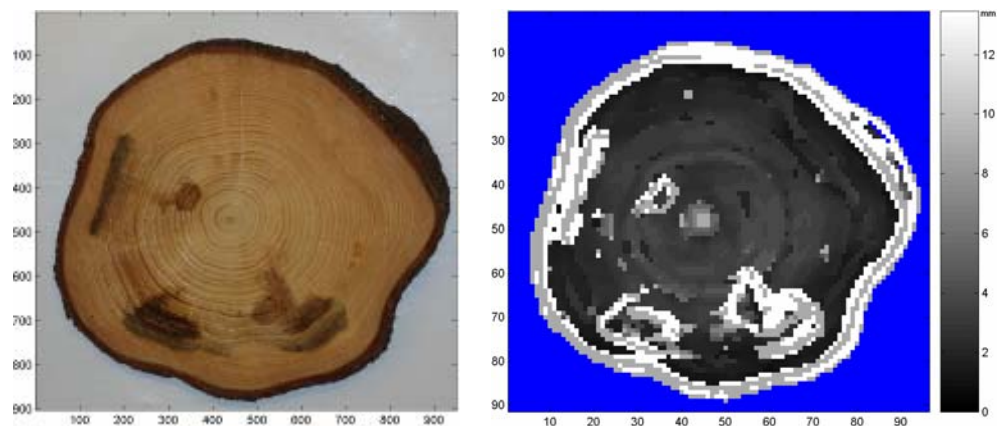
Lustonpaksuuskarttaa käyttäen voidaan puun laadulle määrittää erilaisia ja tarkempia laatutunnuksia. Esimerkiksi keskimääräinen lustonpaksuus koko sydänpuualueella voidaan määrittää. Myös poikkeavat lustojen tihentymät tai harvat alueet voidaan löytää.



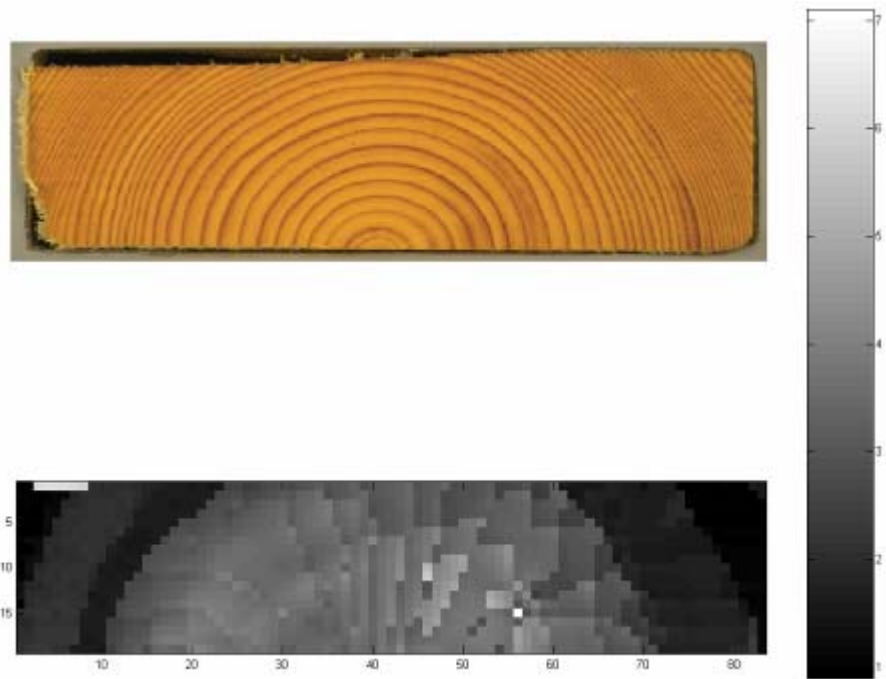
KUVA 2. Vasemmassa kuvassa on hiottu puun pääty ja oikealla siitä laskettu lustonpaksuuskartta täydellä resoluutiolla. Värin tummuus kertoo keskimääräisen lustonpaksuuden millimetreinä. Kuvan akselit ovat pikseleinä.

Lustonpaksuuskarttaa voidaan käyttää myös häiriöiden tunnistamiseen. Kuvassa 3 nähdään, että lahoalueilla laskettu keskimääräinen lustonpaksuus poikkeaa huomattavasti terveissä kohdissa lasketuista lukuarvoista. Myös halkeamissa ja oksankohdissa tapahtuu useimmiten samantyyppisiä ilmiöitä. Menetelmällä voidaan siis tunnistaa häiriöalueet ja terveen puun alueelta menetelmä laskee lustonpaksuudet. Lustonpaksuuskartan laskeminen on hyvin robusti eli häiriöitä sietävä menetelmä, sillä kuvassa 3 oleva puun pääty on sahattu moottorisahalla ja sahausjälkinen pääty kuvattu muutamia tunteja sahauksen jälkeen. Laskenta ei siis välttämättä tarvitse mitään valmisteluja sahauksen jälkeen, silti kuva-analyysi saadaan suoritettua melko hyvin.

Kuvan 3 lustonpaksuuskartta on laskettu joka kymmenennessä pisteessä, jolloin resoluutiota on vähennetty kymmenesosaan molempien akselien suhteen.



KUVA 3. Moottorisahajälkinen puun pääty ja siitä pienemmällä resoluutiolla laskettu lustonpaksuuskartta. Kartassa näkyvät selvästi lahon aiheuttamat häiriöt. Kuvan akselit ovat pikseleinä.



KUVA 4. Yllä lankun päätykuva. Alla lustonpaksuuskartta laskettuna ylempästä kuvasta kymmenesosan resoluutiolla alkuperäisestä. Oikealla olevat värisävyt esittävät alemman kuvan lustonpaksuudet millimetreinä.

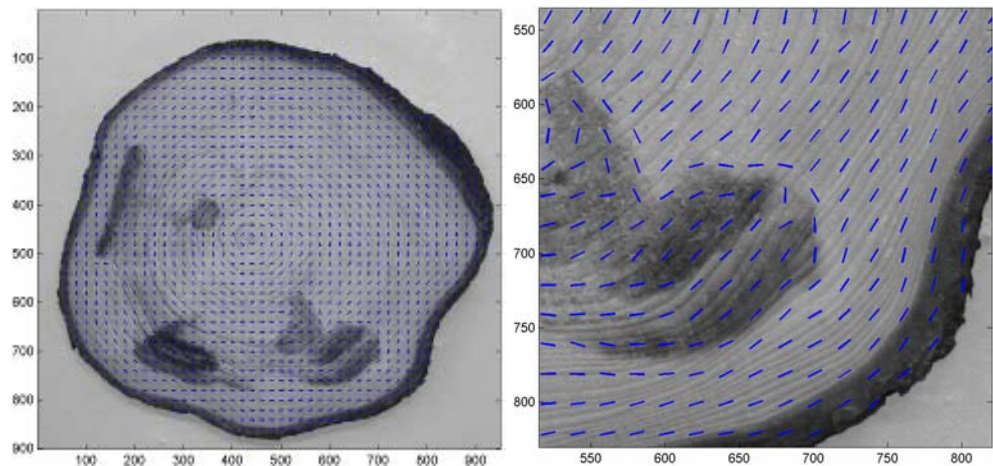
Puula-projektin puitteissa osallistuttiin myös VTT:n johtamaan Combigrade-projektiin. Projektissa tutkittiin lankkujen murtolujuutta. Yhtenä projektissa käytettynä mittausmenetelmänä oli em. lustonpaksuuden laskenta, joka tehtiin nyt lankkujen päätykuvista. Tämä tutkimus suoritettiin TTY:n mittaus- ja informaatiotekniikan laitoksen toimesta. Tulosten mukaan lustonpaksuus yksinään ei korreloinut hyvin lujuuden kanssa, mutta kun tämä tieto yhdistettiin muihin tietoihin, esim. oksien paikkatietoon, selitti menetelmä melko hyvin sahatavaran lujuutta. (Hanhijärvi 2005). Seuraavassa esimerkkikuvia Combigrade-projektin omasta osuudestamme (kuva 4). Ylempänä on värikuva lankun päädyistä, ja alla siitä laskettu lustonpaksuuskartta. Kartasta näkyy selvästi että sydänalueella lustot ovat huomattavasti paksumpia kuin muualla. Combigrade-projektissa lustonpaksuuskartan tarjoamasta informaatiosta käytettiin vain koko päädyn alueella olevien luston paksuuksien keskiarvoa. Lustonpaksuuksien yksityiskohtainen analyysi voisi tuottaa tärkeitä laatuparametreja lankkujen lujuuslajitteluun.

3.1.2 Lustojen suuntakartta

Liukuvaa 2D-spektriä käyttämällä saatiin lustokarttaa laskettaessa samalla myös toinen tulos, lustojen suuntakartta. Kartta kertoo lustojen pääkulkusuunnan yksittäisessä pisteessä (kuva 5). Jälleen jyrkät muutokset lustojen suuntakuvaajissa kielivät puuaineen häiriöstä. Esimerkiksi lahot, oksankohdat ja halkeamat aiheuttavat jyrkkiä poikkeamia viereisistä pisteistä laskeutuissa luston suunnissa. Myös tätä menetelmää käytettiin häiriöiden tunnistamiseen. Yhdistämällä tämä ja lustonpaksuuskarttaan perustuva häiriön

tunnistus, voidaan menetelmää tarkentaa. Lustonsuuntakartta voi olla myös hyödyllinen yksittäisten lustojen etsinnässä, sillä menetelmällä on mahdollista arvioida luston suuntaa häiriöalueillakin, mikäli lustot ovat osittain näkyvissä. Mainittakoon, että menetelmä toimii, vaikka yksittäiset jatkuvat vuosirenkaat olisivat tuhoutuneetkin. Jos lustojen suunta keskimäärin on silmin havaittavissa, menetelmä useimmissa tapauksissa kykenee sen määrittämään.

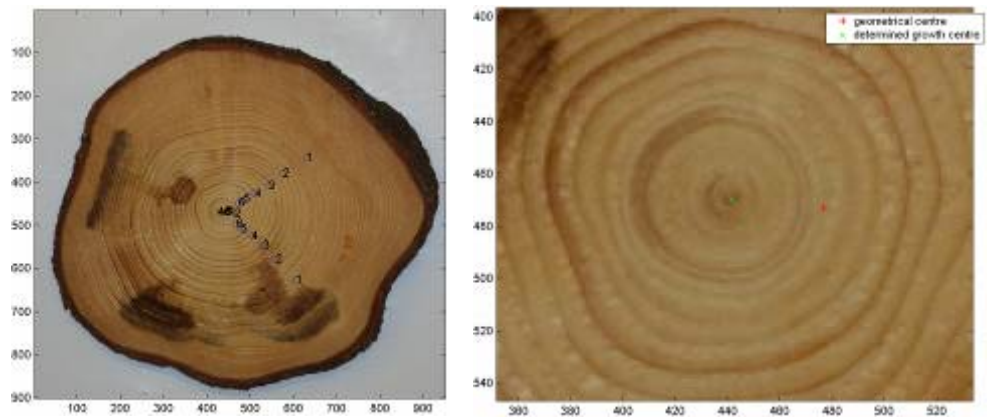
Menetelmää käytettiin myös menestyksekkäästi em. Combigrade-hankkeen lankunpäätyanalyyseissa tunnistamaan oksankohdat, jolloin näistä kohdista lasketut lustonpaksuudet voitiin jättää huomiotta.



KUVA 5. Vasemmalla kuvan yli laskettu lustojen suuntakartta. Oikella suurennettu kuva lahoalueella. Analyysimenetelmä havaitsee luston suunnasta jyrkästi poikkeavan muutoksen tultaessa lahoalueelle. Kuvien akselit pikseleinä.

3.1.3 Rungon ytimen haku

Kolmas 2D-spektriin perustuva menetelmä on puun ytimen eli kasvukeskipisteen automaattinen haku päätyleikkauksuvasta. Ytimen etsimiseen ei käytetty liukuvaa spektriä, vaan spektri laskettiin kussakin silmukassa vain kahdessa pisteessä, joten se on hyvin nopea menetelmä. Pisteissä lasketun 2D-spektrin avulla saatiin luston suunnat, joiden perusteella arvioitiin ytimen paikkaa. Silmukassa edettiin lähemmäksi arvioitua paikkaa ja laskettiin tarkempi arvio. Viisi–kuusi silmukkaa riitti ytimen paikan riittävän tarkkaan määrittämiseen. Kuvassa 6 vasemmalla on esitetty ytimen haun eteneminen kuudella silmukalla. Jokaisessa silmukassa laskettu ytimen paikka osuu hyvin lähelle ydintä. Oikealla on menetelmän määrittämä lopullinen ytimen paikka merkitty vihreällä ja vertailun vuoksi kappaleen geometrinen keskipiste punaisella rastilla. Ytimen paikka voi jo sinänsä olla hyödyllinen parametri, esimerkiksi puun elliptisyyttä tai epäkeskisyyttä määrittäessä. Ytimen paikkaa tarvitaan myös esimerkiksi yksittäisten lustojen etsinnässä. Ja kun ydinalueen lustojen lukumäärä halutaan laskea, tulee ytimen paikka silloinkin tietää. Ruotsissahan 2–8 cm etäisyydellä ytimestä olevien lustojen lukumäärä on yksi laatuparametri. Edelleen luvussa 3.1.4. selitetty polaari-muunnos tarvitsee ytimen paikkatiedon.



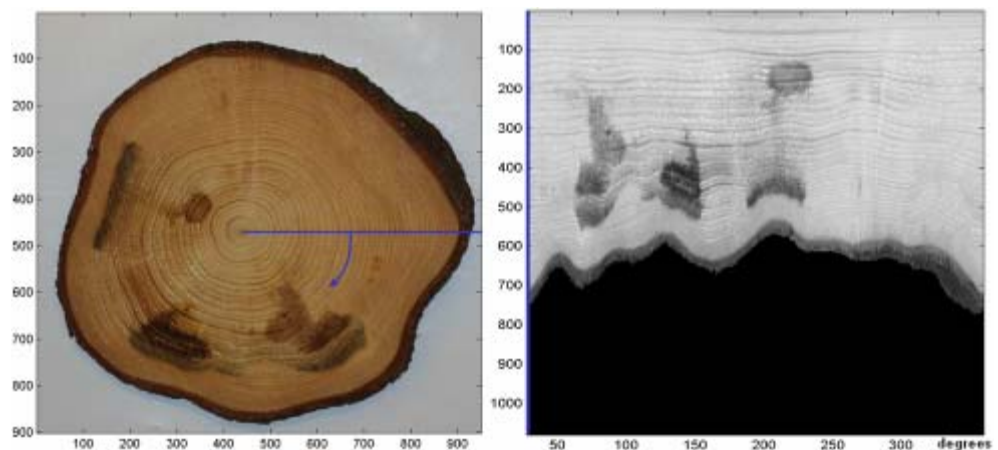
KUVA 6. Vasemmalla keskipistehakualgoritmin eteneminen ja oikealla suurennettu kuva tuloksesta. Tässä tapauksessa ohjelma haki ytimen paikan aivan tarkasti. Kuvien akselit ovat pikseleinä.

3.1.4 Päätykuvan polaarimuunnos

Päätykuvan polaarimuunnos tarkoittaa digitaalikuvas muuntamista polaarikoordinaatistosta xy-koordinaatistoon. Tässä tapauksessa muunnos tehtiin ytimen eli kasvukeskipisteen suhteen, joka asetetaan polaarikoordinaatiston nollapisteeksi. Käytännössä tämä tarkoittaa puun päätykuvan avaamista tasoon ytimen ympäri (kuva 7). Menetelmä pohjautuu METLA:ssa tehtyyn tutkimukseen puun vuosirengasanalyysistä.

Kuvassa ydin, eli piste jossa kasvukeskipiste sijaitsee, venyy viivaksi vaak akselille oikean puoleisen kuvan yläreunaan (kuva 7). Alkuperäisestä kuvasta siis otetaan säteitä ytimestä kuvan reunaan halutun kulman välein. Tämä kulma määrää tasokuvan resoluution. Säteet (suorat) järjestetään toiseen kuvaan vierekkäin, jolloin puukiekkoonkin tasossa, ja vuosirenkaat lähes vaakatasossa.

Muunnos antaa mielenkiintoisia näkökulmia puun lustoanalyysiin sekä puun päädyn muodon määrittämiseen. Jos tasokuvassa reunaviiva on suora, niin puun pääty on ollut pyöreä ja symmetrinen kasvukeskipisteen suhteen. Samoin suorat lustoviivat kertovat pyöreistä lustorengaista. Jos puu on pyöreä mutta ydin ei ole keskellä, niin ytimen suhteen muunnetussa kuvassa reunaviiva vaihtelee tasaisen sinimuotoisesti. Pisteksi, jonka suhteen muunnos tehdään, voidaan myös haluttaessa valita puunpäädyn geometrinen keskipiste, joka lähes aina poikkeaa ytimen paikasta. Tällöin pyöreän päädyn reunaviivan muunnos tasokuvassa on aina suora. Puun päädyn geometrisen keskipisteen määrittäminen kuvasta on jopa helpompaa kuin kasvukeskipisteen, jos tätä halutaankin käyttää muunnospisteenä. Puun reunakäyrä tasokuvassa osoittaa puun päädyn muotoa. Tämä voidaan parametroida laskemalla reunakäyrälle Fourier-muunnos. Jo kymmenkunta sinitermin kerrointa approksimoi reunakäyrää hyvin. Myös minimi- ja maksimisäteet sekä halkaisijat on helposti saatavissa tasokuvasta.

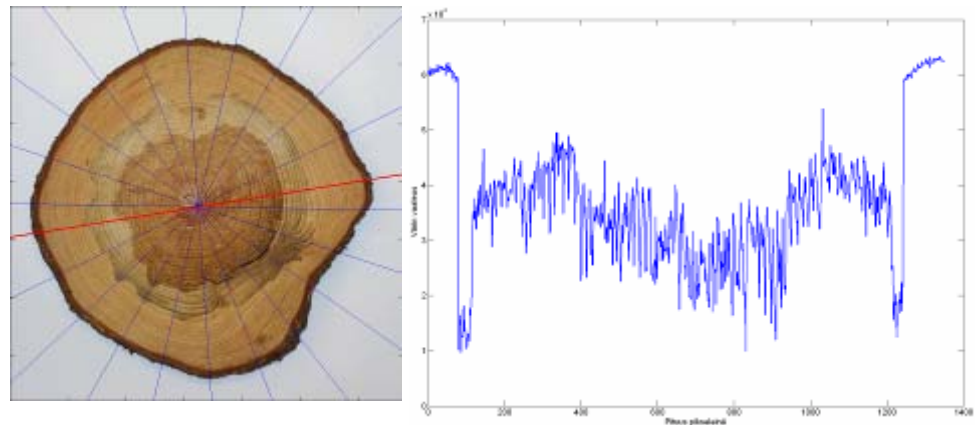


KUVA 7. Vasemmalla puun päätykuva ja oikealla sen yhdelle värikanaalle tehty koordinaatistomuunnos. Ydin on venytetty viivaksi ylhäällä olevalla vaak akselilla. Kierto (ja muunnos) on aloitettu sinisen viivan kohdalta. Vasemmassa kuvassa akselit pikseleinä, oikeassa pysty akseli on pikseleitä, vaak akseli kertoo kulman asteina.

3.1.5 Kuoren paksuuden sekä pään halkaisijoiden mittaus

Kuoren paksuuden mittaukseen kehitettiin yksinkertaista värisävyanalyysiä viivalta. Kuvaan ”piirretään” haluttu määrä suoraa, jotka kulkevat rungon geometrisen keskipisteen kautta. Jokaisesta suorasta saadaan kaksi kuoren-paksuustietoa. Mitä useammasta suorasta kuoren paksuus lasketaan, sitä useammasta kohdasta mittaustuloskin saadaan. Jokaisen suoralla olevan pisteen värisävy (halutuilta kanavalta) otetaan talteen, jolloin saadaan kuvassa 8 oleva oikeanpuoleinen käyrä. Käyrän analysointi on enää yksiulotteisen signaalin käsittelyä. Signaalia käsittelemällä saadaan kuoren paksuustieto luet-tua kuvasta. Samalla saadaan myös pään halkaisija kuoren alta eli kuore-ton läpimitta.

Menetelmä on hyvin nopea, koska analysoinnissa ei käytetä läheskään kaik-kia kuvassa olevia pikseleitä. Nopeuteen vaikuttaa haluttu mittaustarkkuus. Mitä useammasta kohdasta kuoren paksuus halutaan mitata, sen useampia suoraa tarvitaan, ja sitä kauemmin mittaus kestää. Menetelmä on huomatta-vasti nopeampi kuin liukuvaan 2D-spektriin perustuvat operaatiot. Lika ja väri-vika voivat aiheuttaa määrittämisvirheitä. Mikäli kuoren ja puun reuna-alueella on tummaa likaa, tulkitsee menetelmä sen kuoreen kuuluvaksi. Me-netelmän tarkkuus riippuu tässäkin pääasiassa kameran etäisyydestä ja ken-non koosta. Esimerkiksi kuvassa 8 se oli 1 millimetrin luokkaa.



KUVA 8. Kuoren paksuuden mittaus. Kuvassa punaisella merkityllä viivalla olevat sinisen värikanavat värisävyt on piirretty käyränä oikealle. Valkoinen tausta näkyy reunoilla korkeina arvoina ja tumma kuori hyvin matalina luku-arvoina. Käyrän voimakas heilunta johtuu yksittäisistä vuosirenkaista. Oi-kean kuvan pystyakseli siis kertoo kuvan värin bitteinä vaaka akseli pikselin paikan vasemman kuvan punaisella viivalla.

3.1.6 Laho ja lyly

Lahon tunnistamista teimme alussa mainitulla yksinkertaisella värianalyysillä eri värikanavia tai niiden muunnoksia kynnystämällä. Monissa tapauksissa lahoalue saatiin erotettua, mutta tämä menetelmä on valaistukselle, ja lahotyypin värille hyvin altis. Laho saatiin tunnistettua häiriönä 2D-spektriin perustuvilla tekstuuripohjaisilla menetelmillä, kuten luvuissa 3.1.1 ja 3.1.2 kerrottiin. Menetelmä siis tunnistaa vian rungon päädyistä. 2D-spektriin perustuvalla menetelmällä ei kuitenkaan aina voida yksilöidä sitä, mikä milloinkin on havaitun häiriön aiheuttaja. Tarkempaan lahontunnistukseen tuotantokäytössä menetelmiä tulisi vielä kehittää, varsinkin värianalyysipuolella.

Lylyn tunnistamista kokeilimme lahon tunnistuksen tavoin värikanavia ja niiden muunnoksia kynnystämällä. Tämä vaikutti huomattavasti vaikeamalta ja oletammekin, että tarkka värin mittaaminen on ehdoton edellytys lylypuun tunnistamiselle. Sekään ei välttämättä riitä, vaan luultavasti lylyn kohtuullisen luotettavaa tunnistusta varten pitää kehittää tekstuurimenetelmiä, joilla kyetään erottamaan kevät/kesäpuualueet yksittäisistä lustoista. Se vaatii hyvää kuvaresoluutiota sekä hyvälaatuista katkaisupintaa. Yksittäisestä kiekosta lylyalue kyettiin erottamaan, mutta menetelmä ei vielä toiminut luotettavasti useamman kuvan sarjalle. Luston suuntaan ja paksuuteen perustuva häiriötunnistus kappaleissa 3.1.1 ja 3.1.2 selitetyillä menetelmillä ei lylyalueille toiminut lahontunnistuksen tavoin, koska lustorakenne lylyalueella on selvä. Perusvikojen tunnistamistehtävistä lylyn tunnistaminen lieenee hankalin.

3.1.7 Väri- ja mittakaavakalibrointi

Kehitimme värikalibrointia ja värimittausta sekä tutkimme kuinka kuvaan aiheutuvia värien ja valaistuksen vaihteluita sekä kameran omia optimointeja voidaan hallita. Mittasimme kuvankäsittelymenetelmin digitaalikuvista lahon värin muuttumista sen edessä rungon sisällä. Tämä tehtiin sahaamalla lahopuu kiekkoiksi ja analysoimalla kiekot. Lahon väri kertoo rungon lahoasteesta ja siitä, kuinka syvälle laho voi edetä rungossa.

Värikalibroinnin tutkimuksessa saatuja tuloksia voidaan käyttää useisiin värimittaustehtäviin, esimerkkinä värimerkkauksien tunnistaminen rungoissa. Värikalibroinnin teimme ohjelmallisesti. Värikalibrointia varten tarvitaan kuvaan mukaan harmaasävyinen tähyys tai väripaletti. Kuvassa 9 on esimerkki kalibrointitähystä, josta saadaan värikalibroinnin lisäksi myös mittakaavakalibrointi kuvaan. Teoriassa valkoisen värin pitäisi heijastaa kaikki valo kohteesta kameran kennolle, mustan absorboida kaikki, ja keskiharmaan heijastaa puolet jokaisesta valon aallonpituudesta. Eri kuvissa kalibrointiliuskan ruuduista mitatut värit poikkesivat toisistaan johtuen kameran automaattisista värikorjauksista tms. Tiedämme, että niiden tulisi olla samat joka kuvassa, mikäli kuvaolosuhteet eivät ole muuttuneet. Niinpä jokaisen kuvan jokaisen pikselin R-, G-, ja B-komponentin kombinaationa muodostuva väri korjataan siten, että kalibrointitähystä korjauksen jälkeen mitatut värit ovat joka kuvassa samat. Tällöin kuvat ovat keskenään vertailukelpoisia. Mitä useammasta tunnetusta harmaasävyalueesta kalibrointi tehdään, sitä tarkempi värikalibroinnista saadaan.



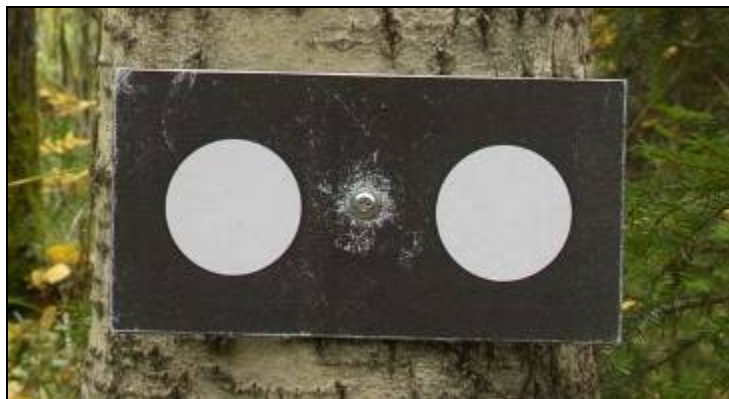
KUVA 9. Esimerkki värikalibrointiin käytettävästä kalibrointiliuskasta oikealla. Kalibroinnin jälkeen nämä liuskat ”leikataan” ohjelmallisesti kuvasta irti, jolloin ne eivät häiritse puukuvan analysointia.

Mittakaavakalibrointi laskentaa varten on tehty lähikuvissa olevaa tähyistä käyttäen. Tähyksessä on jokin tunnettu mitta, esimerkiksi kuvassa 9 mustan ja valkoisen ruudun koko on aina 10,0 mm. Tästä saadaan selville kuinka monta pikseliä on millimetrillä tai toisinpäin. Tähyksiä on hyvä olla joka puolella kuvattavaa kohdetta, jolloin kuvatason kaltevuuskin voidaan ottaa huomioon tarvittaessa. Mittakaava voidaan saada selville myös jonkin tunnetun etäisyyden kautta tai lasermittarilla. Ennen tarkan mittatuloksen saamista pitää kameran optiikan aiheuttamat vääristymät korjata. Tämä on tehty valmiilla MatLab-ohjelmistolla. Kamerajärjestelmällä kuvattiin shakiruudukkoa eri kulmista. Normaalisti optiikka aiheuttaa sen, että suorat linjat vääristyvät etenkin kuvan reuna-alueilla. Vääristymän aiheuttavat virheet laskeaan ja tämän jälkeen kaikki järjestelmällä otettavat kuvat voidaan korjata.

3.2 Puulajin tunnistus kuoren päältä otetun kuvan perusteella

Puun laatuun liittyviä mittauksia tehtiin myös kuoren päältä otetuista sivukuvista. Ensisijainen tutkimuskohde oli puulajin tunnistus. Työ on raportoitu seikkaperäisesti diplomityönä (Suomela 2005b).

Tavoitteeksi asetettiin Suomen metsätalouden tärkeimpien puulajien, kuusi, mänty, koivu ja haapa, tunnistaminen. Hankkeessa kuvattiin n. 150 rungon aineisto puulajitunnistuksen kehittämistä varten. Kuvaukset tehtiin pääasiassa kasvavista puista (kuva 10). Osa kuvista kuvattiin tehtaiden lajittelukentillä, jolloin saatiin aineistoon kuvia likaantuneista ja kuorivaurioisista puista. Kuvauksissa käytettiin kolmea eri digitaalikameraa (Canon EOS D30 – CMOS-3MP, Sigma SD10 – Foveon 3MP, Nikon D60 – CCD 6MP), joissa käytettiin samanlaista (Sigma 50 mm macro) objektiivia vertailukelpoisen materiaalin saamiseksi. Lisäksi kerättiin erilaisilla – lähinnä kompaktikameroilla – otettuja kuvia rungoista.



KUVA 10. Näytekuva kustakin tutkittavasta puulajista ennen resoluution alinäytteistystä (yläkuva). Käytetty pyörylätähys ruuvattuna haavan kuoreen (alakuva).

Luokitteluanalyysiä varten kuvista alinäytteistettiin 1 mm resoluution versiot. Tähän resoluutioon päädyttiin kokeilujen jälkeen – se riitti lajitunnistukseen. Muihin laatumittauksiin riittää joskus huonompikin resoluutio (esim. kuorettoman osuuden arviointi), joskus tarvitaan parempaa resoluutiota (esim. puiden loishyönteisten tuhot). Luokittelussa käytettiin pääasiassa 10 cm x 10 cm aluetta kuoresta, näin saatiin analyysistä melko nopea.

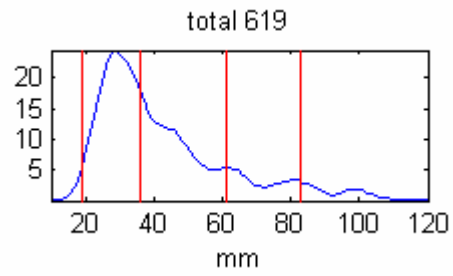
Myös pienempää aluekokoa, 8 cm x 8 cm, kokeiltiin, ja siltäkin puulajitunnistus onnistui. Tarkoitukseen kehitettiin MATLAB ohjelmisto, jolla kameran kalibrointi (kolme eri tähystyyppiä) ja näytteiden leikkely alkuperäisistä kuvista suoritettiin interaktiivisesti.

Näytealoilta muodostettiin laskennallisesti kuoren väriin ja tekstuuriin perustuvia parametreja (tilastollisia mittalukuja), joiden perusteella puulajien tunnistus suoritettiin. Luokittelun virittämiseen käytettiin menetelmiä, joissa tarkasteltiin yksittäisen ja kahden eri parametrin jakaumia yhdessä runkokuviasta leikattujen näytteiden kanssa (kuvat 11 ja 12). Merkittävimmiksi tekstuuriparametreiksi havaittiin 2D-spektristä laskettavat aallonpituuden (tai aaltoluvun) jakaumaa kuvaavat parametrit. Väriparametreista merkittävimpiä olivat vaaleutta ja värijakaumaa puna-viher-akselilla kuvaavat parametrit.

Paras luokitustulos saavutetaan käyttämällä useita laskettuja parametreja – sekä värejä että tekstuureja tarvitaan. Lopullista parametrien viritystä ei suoritettu, koska varsinaista sovellusta ei haluttu spesifioida. Yleensä puulajin luokittelussa on kyse vieraan puulajin poimimisesta pois suurehkoista joukosta oikeaa puulajia. Tällöin luokitus yleensä viritetään 'varovaiseksi', koska oikeiden puulajien satunnainen poimiminen aiheuttaa pienemmät kustannukset kuin vieraan puulajin päästäminen läpi.

Kehitettyjä esikäsittelyn, tekstuurianalyysin ja luokittelun menetelmiä voidaan käyttää muihinkin sovelluksiin, joissa puun laatuun vaikuttava seikka on nähtävissä sivukuvasta. Joitakin tällaisia sovellusideoita kokeiltiin, mm. kuorettoman osuuden analyysi ja puun kaarnaisuuden analyysi (Suomela 2005a).

Horisontaalinen keskimääräinen aallonpituus



horizontal average wavelength



horizontal average wavelength



horizontal average wavelength

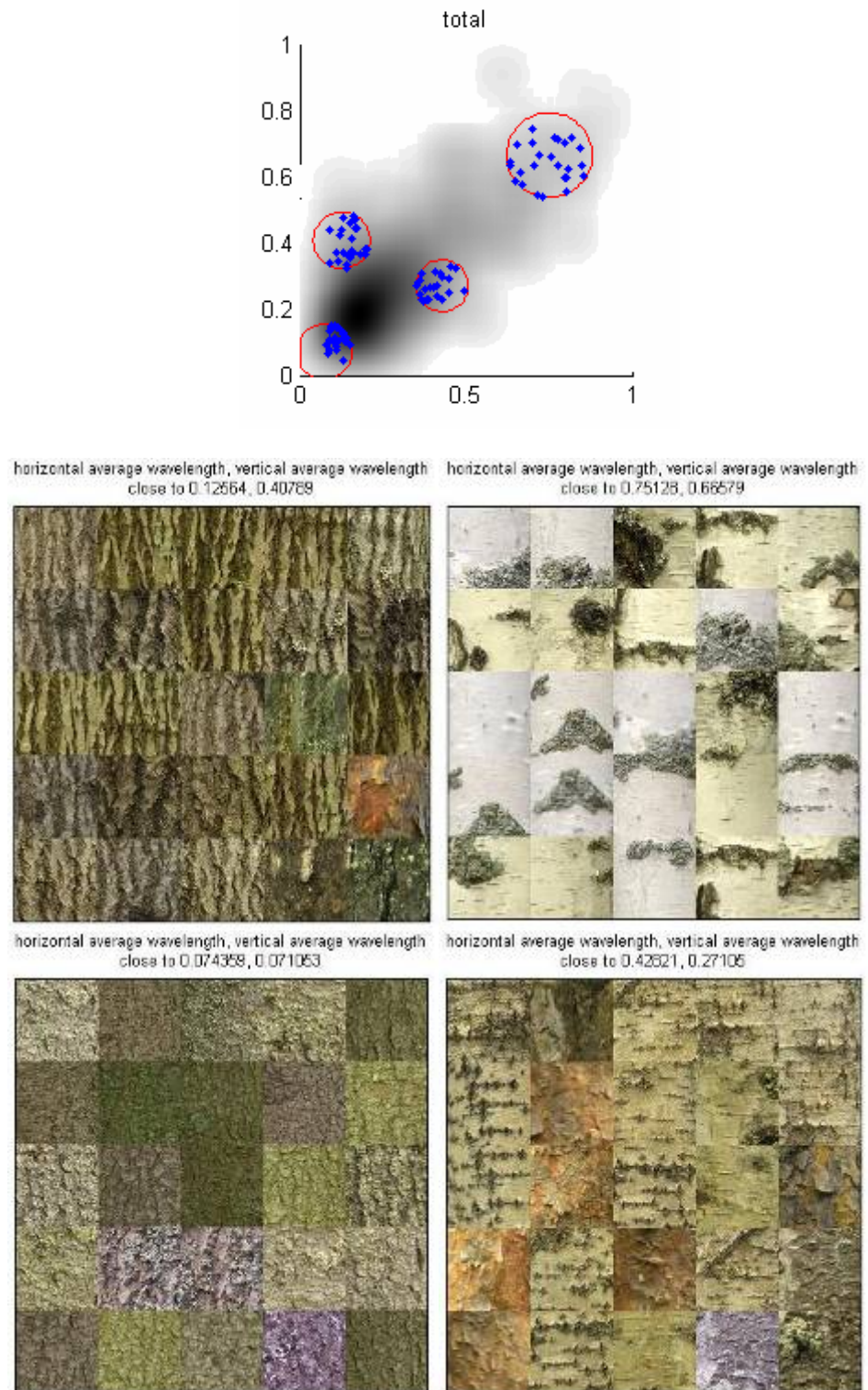


horizontal average wavelength



KUVA 11. Esimerkkinä yksittäisten parametrien luokittelukyvyistä horisontaalinen keskimääräinen aallonpituus. Jakaumakuvaan on piirretty neljä punaista viivaa merkiksi kohdista joiden läheisyydestä alemmat kuvat on poimittu

Horisontaalinen ja vertikaalinen keskimääräinen aallonpituus



KUVA 12. Esimerkkinä kahden eri parametrin, horisontaalinen ja vertikaalinen keskimääräinen aallonpituus, luokittelukyvyistä. Jakaumakuvassa on ympyröity punaisella ne alueet joiden läheisyydestä alemmat kuvat on poimittu.

4 TULOSTEN TARKASTELU JA PÄÄTELMÄT

Projektissa tutkittiin digitaalisia kuvankäsittelymenetelmiä, joiden tarkoituksena oli tuottaa laatumittaustietoa puutavarasta. Ratkaisut perustuivat pääosin tekstuuripohjaisiin menetelmiin ja värianalyysiä käytettiin tukevana menetelmänä. Tähän päädyttiin siitä syystä, että tekstuurimenetelmät sietävät paremmin kuvien välillä olevia muutoksia esim. valaistusolosuhteissa. Yleisesti ottaen tekstuurimenetelmät tarvitsevat kuitenkin enemmän laskentatehoa ja vievät siten myös aikaa. Tutkimusaineistona käytettiin digitaalikuvia, joita tutkimuksen kuluessa tuotettiin huomattava määrä. Pääsääntöisesti tutkittiin rungon katkaisupinnasta otettuja digitaalikuvia, jotka oli joko kuvattu sellaisenaan tai hiottu ja/tai kasteltu piirteiden erottumisen parantamiseksi. Rungon kyljestä otettuja kuvia käytettiin puulajin tunnistamiseen

Tutkitut menetelmät tuottavat ratkaisuja puun laadun mittaukseen tulevaisuudessa konenäön avulla. Mahdolliset sovellusalueet voivat olla niin sahoilla, sellutehtailla kuin hakkuukoneessakin. Sovellusympäristönä hakkuukone on varmasti kaikista hankalin, sillä valaistus ja kuvien taustat voivat vaihdella huomattavasti. Lisäksi laitteiden kestävyydelle asetetaan monta kertaluokkaa suuremmat vaatimukset tehdasympäristöön verrattuna.

Menetelmien käyttöönotossa suurin ongelma on saatavan kuvan laatu. Puun päädyn tulisi olla ainakin sellainen, että halutut piirteet siitä pystyy erottamaan silmin. Muutoin digitaalikamerakuvasta luotettava analyysi on lähes mahdoton. Muilla kuvantamismenetelmillä on kyllä mahdollista saada käsiteltäväksi informaatiota ja jopa kuvia, joita ihmissilmällä ei voi nähdä. Näitä menetelmiä ovat esimerkiksi röntgen, ultraääni, magneettikuvaus ja lämpökuvaukset ja niillä saatavia kuvia voidaan käsitellä samantyyppisin menetelmin kuin digitaalivalokuvia. Osaa näistä on tutkittu mm. Metlan ja Kajaanin mittalaitelaboratorion tahoilla. Puun päätyyn kertyy usein likaa, kuraa tai lunta. Sahajälkikin voi olla niin huono, ettei analyysiä päätykuvasta voi tehdä. Kaikki nämä ongelmat on kuitenkin mahdollista eri järjestelyin poistaa. Puun pääty voidaan puhdistaa, hakkuukoneen sahanterien kuntoon voidaan kiinnittää huomiota ja puun pääty on mahdollista jopa hioa. Mikäli kuva-analyysistä saatava informaatio koetaan tarpeeksi hyödylliseksi, näitä myös tehdään tulevaisuudessa. Ongelmina voidaan myös nähdä joidenkin kuvankäsittelymenetelmien hitaus. Algoritmeja voidaan kuitenkin nopeuttaa, ja yhä nopeampia prosessoreita tulee markkinoille. Mahdollista on käyttää useaa prosessoria ajamaan rinnakkain samaa analyysiä, jolloin nopeutta saadaan lisää.

Analyysimenetelmistämme lustojen suunnan määrittäminen, kasvukeskipisteen paikan määrittäminen ja lahon, oksan tms. aiheuttaman häiriön tunnistaminen häiriöksi sekä päädyn muodon määrittäminen onnistuvat hyvin melko huonostakin moottorisahan katkaisujäljestä. Häiriöiden luokittelemiseksi, luston ja kuoren paksuuden mittaamiseksi tarkasti pölkyn katkaisusahauksen pinnan tulisi olla tasainen ja hyvin leikkautunut.

Jotta resoluutio ja edelleen mittaustarkkuus saataisiin riittävän suureksi, tulisi kamera asettaa mahdollisimman lähelle kuvauskohdetta. Esimerkiksi lankunpäätyanalyysissä käytetty Sigman 3,4 megapikselin digitaalijärjestel-

mäkamera (Foveon kennolla) oli asennettu noin 40 cm:n etäisyydelle. Kuvan erottelukyky oli loistava kaikkiin lustoanalyysiin. 130 cm etäisyydeltä Canonin 3,1 megapikselin kameralla kuvatuissa puukiekkokuvissa resoluutio oli useimmiten riittävä mittauksen kannalta, mutta ohuimpia lustoja ei tältä etäisyydeltä luotettavasti kyetty tunnistamaan ja analyysit näiltä osin jäivät epäluotettaviksi. Tavallisesti tällaiset alueet olivat kiekkoissa lähinnä ulkokehällä kuoren alla ja pääosalle kiekon poikkipinta-alasta lustoanalyysit kuitenkin onnistuivat.

Johtopäätöksenä useat puutavaran päällepäin (etenkin päädyssä) näkyvät laatupiirteet voidaan tunnistaa ja mitata tulevaisuudessa digitaalikameroihin perustuen edellyttäen, että ihmissilmälläkin ne on mahdollista luotettavasti tunnistaa.

Vastaavia tutkimuksia on valmistunut vähän, mutta ainakin Ruotsissa on aloitettu vastaavanlainen tutkimushanke. Digitaalikuviin perustuvia rungon dimensiomittauksen sovelluksia on tehty muutamia vuosia useammankin yrityksen toimesta. Digitaalikuvaan perustuva laatulajittelu lienee rajoittunut sahatavaran vikaisuusien tunnistamiseen lappeilta. Digitaalikuvaan perustuvaa lustoanalyysiä on kuitenkin tehty dendrokronologian piirissä, ja siihen tarkoitukseen on olemassa valmiita ohjelmistoja.

Projektiin seurauksena on käynnistynyt tuotekehityshanke Finnskan Oy:n kanssa, jossa kehitetään digitaalikuvasta laskettavaan lustonpaksuuteen perustuvaa mittaria lankkujen murtolujuuden määrittämiseen. Apuna käytetään yrityksen nykyisillä laitteistoilla saatavia oksatietoja. Myös hakkuukonepuolella on suunniteltu soveltamishankkeita.

KIRJALLISUUS

- Hanhijärvi A., Ranta-Maunus A., Turk G. 2005. Potential of strength grading of timber with combined measurement techniques – Report of the Combi-grade project – phase 1. VTT publications.
- Suomela, T. 2005a. Puun kaarnaisuuden tunnistus sivukuvasta, Kuvaan perustuva mittaus 2 harjoitustyö, Tampereen teknillinen yliopisto. Mittaus- ja Informaatiotekniikan laitos.
- Suomela, T. 2005b. Puulajin tunnistus rungon värin ja tekstuurin perusteella. Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto.
- Österberg, P., Ihalainen H., Ritala R. 2004. Method for Analyzing and Classifying Wood Quality through Local 2D-spectrum of Digital Log End Images. Konferenssijulkaisu. International Conference on Advanced Optical Diagnostics in Fluids Solids and Combustion, December 4-6, 2004, Tokyo, Japan.
- Österberg, P. 2002. Digitaalikuvaan perustuva puutavaranmittaus. Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto. Mittaus- ja Informaatiotekniikan laitoksen raportti nro 49.