

Toni Huotari

PUUN DIMENSIOIDEN MÄÄRITTÄMINEN KONENÄÖLLÄ

Insinööri  
Kajaanin ammattikorkeakoulu  
Tekniikan ja liikenteen ala  
Tietotekniikankoulutusohjelma  
Kevät 2005



Osasto	Tekniikka	Koulutusohjelma	Tietotekniikka
Tekijä(t) Toni Huotari			
Työn nimi Puun dimensioiden määrittäminen konenäöllä			
Vaihtoehtoiset ammattiopinnot Konenäkö ja mittaustekniikka		Ohjaaja(t) Pentti Romppainen Jorma Heikkinen	
Aika	Kevät 2005	Sivumäärä	53+4
Tiivistelmä <p>Insinöörityö on tehty Oulun yliopiston mittalaitelaboratoriolle. Insinöörityön tehtävä oli tutkia konenäköjärjestelmän mahdollisuuksia puukappaleen dimensioiden määrittämisessä. Järjestelmän tuli pystyä mittaamaan dimensioiden lisäksi puukappaleen pinta-ala sekä tilavuus.</p> <p>Nykyiset mittaukset tehdään työntömitan avulla. Sillä ei kuitenkaan päästä tarvittavaan tarkkuuteen mitattavan puukappaleen ollessa turvonnut. Ongelmana on puun erisuuruinen turpoaminen eri suunnissa.</p> <p>Työssä suunniteltiin konenäköjärjestelmä, jossa mitattavasta puukappaleesta otetaan kuva digitaalisella harmaasävykameralla. Tämän jälkeen suoritettavan digitaalisen kuvankäsittelyn avulla saadaan kuvasta erottumaan puukappaleen reunat tarkasti. Kuvasta saadaan halutut mitat LabVIEW- ohjelmointikielellä tehdyllä ohjelmalla.</p>			
Luottamuksellinen Kyllä Ei      X			
Hakusanat Konenäkö, valaistus, LabVIEW			
Säilytyspaikka			



Faculty <b>Faculty of Engineering</b>	Degree programme <b>Information Technology</b>
Author(s) <b>Toni Huotari</b>	
Title <b>Determining Wood Dimensions with Machine Vision</b>	
Optional professional studies <b>Machine Vision and Measurement Technology</b>	Instructor(s) / Supervisor(s) <b>Pentti Romppainen Jorma Heikkinen</b>
Date <b>Spring 2005</b>	Total number of pages <b>53+4</b>
Abstract <p>This Bachelor's thesis was done for Mittalaitelaboratorio (the Measurement and Sensor Laboratory of the Oulu University). The purpose was to examine the possibilities of using a machine vision system in measuring wood dimensions. The system has to measure the surface and volume of the wood particle.</p> <p>The measuring is carried out today by using a caliper rule. This is not an accurate system if the wood particle is swollen. Besides that, the system is too slow and the measuring result depends on the person who is measuring.</p> <p>The result of the thesis was a machine vision system where images are taken with a digital camera. The border of the wood particle is separated by using image processing. Finally, the wood dimensions are measured a program written in LabVIEW programming language.</p>	
Confidential Yes No <input checked="" type="checkbox"/>	
Keywords <b>Machine vision, light, LabVIEW</b>	
Deposited at	

## Alkusanat

Insinööriyö tehtiin Oulun yliopiston mittalaitelaboratoriolle Kajaanin ammattikorkeakoulun sekä Oulun yliopiston konenäkölaboratoriotiloissa. Erityisesti haluan kiittää mittalaitelaboratorion projekti-insinööri Jussi Ala-Hiiraa asiantuntemuksesta insinööriyöhön liittyneissä asioissa. Lisäksi haluan esittää kiitokset mittalaitelaboratorion tutkimusjohtajalle Juha Kalliokoskelle sekä henkilöille, jotka olivat edistämässä ja tukemassa työn onnistumista. Kiitokset kuuluvat myös työn ohjaajalle insinööri Jorma Heikkiselle mittalaitelaboratoriosta sekä työn valvojalle yliopettaja Pentti Romppaiselle Kajaanin ammattikorkeakoulusta.

Kajaanissa 8.4.2005

## SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO .....	7
2 PUUN RAKENNE .....	8
2.1 Kosteuden aiheuttama turpoaminen.....	9
2.2 Puun kuivuminen.....	10
2.3 Lämpölaajeneminen .....	11
2.4 Vuosilusto.....	11
3 KONENÄKÖJÄRJESTELMÄ .....	12
3.1 Kamerateat.....	13
3.2 Kuvausoptiikka .....	14
3.3 Valaistus.....	17
3.4 Tiedonsiirto.....	18
4 OHJELMISTOT .....	20
4.1 Graafinen LabVIEW-ohjelmointikieli .....	20
4.2 Measurement & Automation Explorer MAX .....	20
4.3 IMAQ Vision Assistant.....	21
5 DIGITAALINEN KUVANKÄSITTELY .....	22
5.1 Kuvankäsittelyn perusasioita .....	22
5.2 Kuvan esikäsittely.....	24
5.3 Segmentointi .....	26
5.4 Morfologiset operaatiot.....	27
6 TYÖSSÄ KÄYTETYT LAITTEISTOKOMPONENTIT .....	30
6.1 Digitaalinen kamera.....	31
6.2 Optiikka .....	31
6.3 Valaistus.....	32
6.4 Kuvankaappauskortti.....	33
7 TOTEUTETTU KONENÄKÖJÄRJESTELMÄ.....	34
7.1 Ohjelman toiminta .....	34
7.2 Ohjelman toteutus .....	37
7.3 Konenäköjärjestelmän testaus .....	46

8 TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU .....	48
9 YHTEENVETO.....	51
LÄHDELUETTELO .....	53

LIITTEET

## 1 JOHDANTO

Kajaanin yliopistokeskuksen mittalaitelaboratorio (MILA) on perustettu 1.10.1991. MILA toimii osana Kajaanin yliopistokeskusta. Mittalaitelaboratorio tuottaa mittaustekniikan osaamista. Reilussa kymmenessä vuodessa mittalaitelaboratoriosta on kehittynyt ammattilaisten piirissä valtakunnallisesti tunnettu ja tunnustettu tutkimus- ja testausympäristö. Painopisteenä mittalaitelaboratoriossa on puunjalostusteollisuuden piirissä toimivia yrityksiä hyödyttävä optinen mittaustekniikka.

Puun dimensio-, pinta-ala ja tilavuusmittauksia tarvitaan puun mekaanisen lujuuden, koostumuksen, kosteuden ja lämpötilakäyttäytymisen tutkimuksissa. Tällä hetkellä puukappaleen dimensiot mitataan työntömitalla, jolla ei kuitenkaan päästä riittävän tarkkoihin arvoihin ja mittaustulokset ovat riippuvaisia mittaajasta. Ongelma tässä on puun erimuotoinen turpoaminen ja puun pehmeys. Insinööriyön tavoitteena oli kehittää konenäköjärjestelmä, jonka avulla kyetään mittaamaan puukappaleesta tarkat dimensiot kosketuksettomasti.

Konenäköjärjestelmän rakentamiseen vaikutti muutamat sille asetetut ehdot. Järjestelmän tuli pystyä mittaamaan dimensiot  $\pm 0,05$  mm:n epätarkkuudella. Dimensioiden mittaus tuli tapahtua kuudesta eri kohdasta. Saadut mittaustulokset piti pystyä tallentamaan myöhempää tarkastelua ja vertailua varten. Järjestelmästä täytyi löytyä myös kalibrintoiminto. Vaatimusten perusteella työssä päädyttiin suunnittelemaan ja toteuttamaan PC-perustainen konenäkösovellus.

## 2 PUUN RAKENNE

Puun tärkeimmät rakenneosat ovat selluloosa, hemiselluloosa ja ligniini. Ne muodostavat puusolukon kolmiulotteisen rakenteen. Näiden kolmen komponentin lisäksi puussa on runsaasti pienempiä komponentteja, joita kutsutaan ryhmänä uuteaineiksi. Ne ovat esimerkiksi rasvoja, hartseja, vahoja, öljyjä ja tärkkelyksiä. Kolmiulotteisen rakenteen seurauksena puun ominaisuudet ovat erilaiset eri suunnissa. Tämän takia puuta kutsutaan anisotrooppiseksi materiaaliksi. Suhteellisen avoimen rakenteensa takia puu mukautuu melko voimakkaasti ympäristönsä muutoksiin. Muutokset kosteudessa ovat hyvin olennaisia puun käytön kannalta. [1]

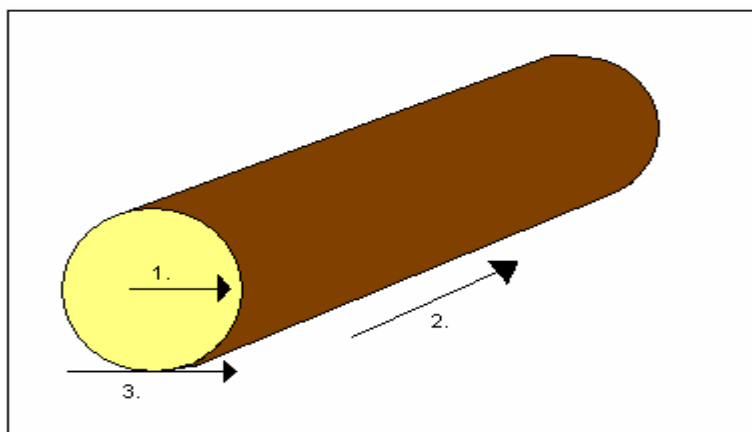
Edullisen solurakenteensa eli geometrisen lujittumisen sekä orgaanisten perusmateriaaliensa ansiosta puun tiheys jää pieneksi. Kun lujuus ja jäykkyys, ainakin tietyissä tapauksissa, voivat saavuttaa suhteellisen hyviä arvoja, puun ominaislujuus- ja jäykkyys voivat saavuttaa hyvin kilpailukykyisiä arvoja muihin materiaaleihin verrattuna. Ominaisjäykkyys voi olla samaa suuruusluokkaa kuin alumiiniseoksilla tai niukkahiihisellä teräksellä ja korkeampi kuin betonilla.[2]

Sydänpuulla tarkoitetaan puun rungon sisintä osaa, joka voi olla väriltään tummempaa kuin pintapuu. Sydänpuun solut ovat yleensä kuolleita kasvavassakin puussa. Sydän ja pintapuun välillä voi olla myös kosteusero. Männyllä sydänpuuta alkaa muodostua 30 – 40 vuoden iässä ja sen osuus kasvaa iän myötä. Eräillä lehtipuilla sydänpuu on sitä tummempaa, mitä enemmän siinä on uuteaineita. Monilla havupuilla on sydänpuussa runsaasti pihkaa. Usein uute- ja pihka-aineet tekevät sydänpuusta kestäväen ulkoisia rasituksia vastaan.[3]



## 2.1 Kosteuden aiheuttama turpoaminen

Puu on kosteutta imevä materiaali ja siksi sen kosteus muuttuu ympäristön kosteuden muuttuessa. Puu kutistuu ja turpoaa eri suunnissa eri tavoin. Tavallisesti puusta erotetaan säteen, tangentin ja syiden suuntainen turpoaminen (kuva 1).



*Kuva 1. Puukappaleen turpoamissuunnat (1. Säteen suuntainen 2. Syiden suuntainen 3. Tangentin suuntainen)*

Kosteus voi siirtyä solukkoon kahta reittiä, joko suoraan fyysisessä kontaktissa tai ilman kautta vesihöyrynä. Kosteus sitoutuu puusolukkoon kahdella tavalla: soluseinämiin ja rakenneosien väliin jääviin onteloihin. Vesi sitoutuu soluseinämiin, kunnes saavutetaan niin kutsuttu puun syiden kyllästymispiste. Tämän jälkeen materiaaliin sitoutuva vesi täyttää siinä olevan tyhjän tilan. Puusolukon seinämät turpoavat, kun niihin sitoutuu vettä, tämän takia puukappaleen dimensiot muuttuvat kosteuden lisääntyessä. Puun syiden kyllästymispisteen jälkeen tilavuuden muuttumista ei luonnollisesti enää tapahdu.[1] Kyllästymispisteellä on huomattava rakenteellinen merkitys, koska sen alapuolella puun useimmat fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet muuttuvat paljon ja sen yläpuolella useimmat pysyvät suunnilleen vakioina.

Puuaineen tiheys vaikuttaa puun erisuuntaiseen turpoamiseen. Tilavuuden kutistuminen ja turpoaminen tavallisesti lisääntyy puuaineen tiheyden kasvaessa. Tämä sama säännönmukaisuus sopii myöskin säteen ja tangentin suuntaiseen elämiseen. Sen sijaan monilla puulajeilla syiden suuntainen kutistuminen ja turpoaminen vähenee tiheyden kasvaessa.[3]

Puutavaraa voidaan stabiloida kosteuden aiheuttamaan dimension muutosta vastaan monella eri tavalla, esimerkiksi impregnoimalla, lämpökäsittelmällä, kuumamuokkaamalla tai näiden menetelmien erilaisilla yhdistelmillä.[2] Impregnointi tarkoittaa kemikaalien kuljettamista puun kuituihin.

## 2.2 Puun kuivuminen

Puun kuivuessa sen kutistuminen alkaa puun syiden kyllästymispistettä vastaavassa kosteudessa. Tavallisesti runkokuuissa pitempien eli syiden suuntainen kutistuminen sen kuivuessa tuoreesta absoluuttisen kuivaksi on vähäinen. Se on puulajista riippuen 0,1-0,6 %. Säteen suuntainen kutistuminen on 3-6 % ja vastaavasti tangentin suuntainen 6-12 %.[3]

Taulukossa 1 on esitetty käytetyimpien puulajien pyöristettyjä kutistumiskertoimia.

*Taulukko 1. Eri puulajien kutistumiskertoimet*

	Koivu	Mänty	Punapyökki	Tammi
Syiden suunnassa	0,6	0,4	0,3	0,4
Säteen suunnassa	5	4	6	4
Tangentin suunnassa	8	8	12	8

### 2.3 Lämpölaajeneminen

Puun lämpölaajeneminen on anistrooppista, kuten monet muutkin puun ominaisuudet. Aineen lämpötilan noustessa molekyylien liike-energia kasvaa. Tämä aiheuttaa sen lämpölaajenemista. Puukappaleen pituuden suhteellinen muutos on suoraan verrannollinen lämpötilan muutokseen. Lämpötilan vaikutus on vähäisin syiden suunnassa ja suurin tangentin suunnassa. Täysin kuivan männyn syiden suuntainen lämpötilakerroin on  $3,4 \cdot 10^{-6}$  1/K ja tangentin suuntainen  $35,0 \cdot 10^{-6}$  1/K. Syiden suuntaisella lämpölaajenemisella ei ole juuri käytännön merkitystä. Säteen suuntainen kerroin on lähes yhtä suuri kuin tangentin suuntainenkin. [3]

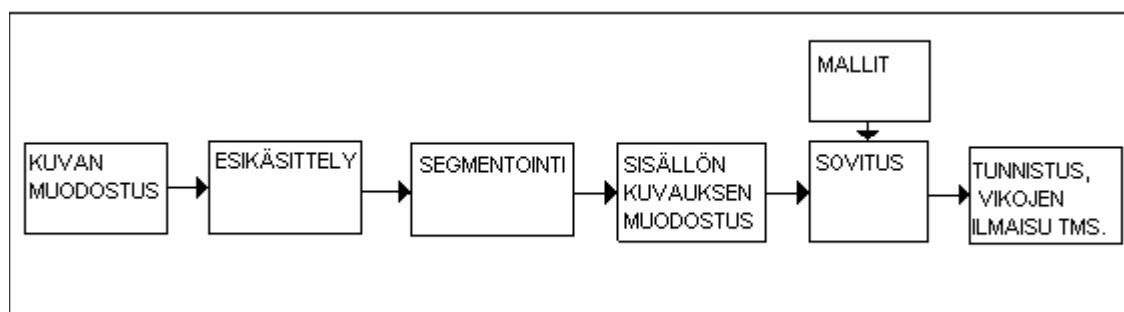
### 2.4 Vuosilusto

Kasvukauden aikana puu kasvattaa ympärilleen uuden vuosiluston. Havupuilla se muodostuu vaaleasta, rakenteeltaan harvasta kevätpuusta sekä tummasta tiiviistä kesäpuusta. Kevätpuun solut ovat ohutseinäisiä ja suurionteloisia, kun vastaavasti kesäpuun solut ovat paksuseinäisiä ja pienionteloisia. Havupuilla kevät- ja kesäpuun väriero on selvä.[3]

Monilla lehtipuilla voidaan erottaa samanlainen vuosilusto kuin havupuillakin. Sellaisilla puulajeilla, joilla ei ole kasvuaikana lepokausia, ei vastaavia lustoja synny. Tällöin ei yleensä puhuta erikseen kevät- ja kesäpuusta, koska rajan vetäminen voi olla hyvin vaikeaa.[3]

### 3 KONENÄKÖJÄRJESTELMÄ

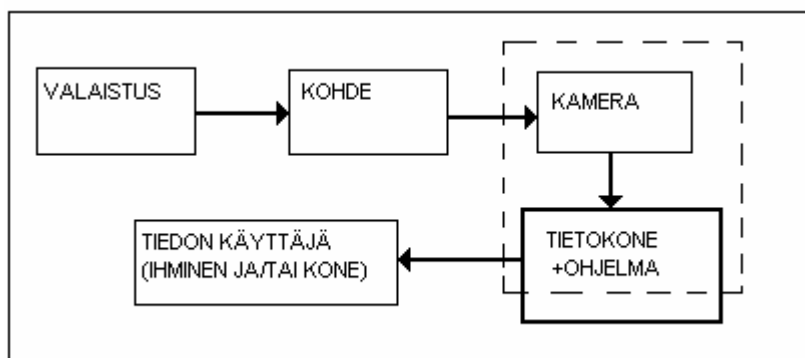
Tavallisesti konenäöllä ymmärretään kuvien tuottamista halutusta kohteesta, niiden käsittelyä ja hyödynnettävissä olevan kuvauksen muodostamista kuvien sisällöstä. Tätä käsittelyä kutsutaan kuva-analyysiksi (kuva 2). Tärkein tavoite suurimmalle osalle konenäkösovelluksia on löytää kuvista oleellisia piirteitä, joiden selitys, tulkinta tai ymmärtämys voidaan suorittaa automaattisesti tietokoneella. Konenäköjärjestelmä voi pelkän kuvan muodostamisen ja esityksen lisäksi myös analysoida kuvaa.



*Kuva 2. Yksinkertaistetun kuva-analyysiprosessin vaiheet*

Konenäköjärjestelmän edut ovat moninaiset. Teollisessa tuotannossa konenäön käyttö johtaa raaka-aine- ja energiakulutuksen vähenemiseen sekä hyvin käytettynä korkeaan laatuun koko tuotantoprosessin aikana. Reaaliaikainen konenäköjärjestelmä tekee laadunvalvonnasta nopeampaa ja tarkempaa. Suuria säästöjä tulee, kun viat voidaan tunnistaa reaaliajassa ja niihin voidaan reagoida jo tuotannon ollessa käynnissä.

Konenäköjärjestelmä koostuu usein CCD-kamerasta, valonlähteestä ja tietokoneesta, joka sisältää kuvankaappauskortin (kuva 3). Kameraksi voi valita joko harmaasävy- tai värikameran, joita molempia saa analogisena ja digitaalisena.



Kuva 3. Konenäköjärjestelmän yleinen koostumus

### 3.1 Kameran

Konenäkösovelluksiin on valittavana monentyyppisiä kameroita. Kameroiden ominaisuuksien mukaan niillä kuvataan kohteesta eri tyyppisiä ominaisuuksia.

#### Analogiset kamerrat

Perinteinen videokamera, joita käytetään myös konenäkösovelluksissa, tuottaa analogisen videosignaalin. Videosignaali sisältää kaiken kuva- ja synkronointi-informaation. Tällaista kameraa sanotaan ns. komposiittivideokameraksi. Konenäkösovelluksissa käytetään paljon myös kameroita, joissa synkronointisignaalit ovat omissa johtimissaan. Tällaisilla kameroilla kuvan muodostaminen voidaan aloittaa ulkoisella pulssilla.[4]

#### Digitaaliset kamerrat

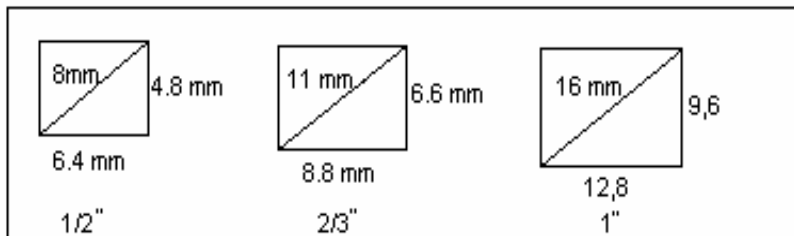
Uusimmat kamerrat siirtävät tiedon kameralta kuvankaappauskortille digitaalimuodossa. Digitaalikameran etuja ovat yksinkertaisempi kaapelointi, pienemmät liittimet sekä parempi resoluutio ja kuvataajuus. Vaikka kameroilla olisi sama liityntästandardi se ei silti takaa, että kamerrat olisivat vaihtokelpoisia, koska kaapelointitapaa ei ole standardoitu. Jotkut digitaalikamerrat käyttävät liityntätapana FireWire IEEE1394-standardinmukaista liittymää. Halvimmat digitaalikamerrat käyttävät esimerkiksi USB-liityntää.[4] Camera Link -väylää käytetään suurta tiedonsiirtonopeutta vaativissa digitaalisissa kameroissa.

## CCD-kennotekniikka

Nykyisin käytettävissä, sähköisen kuvasignaalin tuottavissa kameroissa kuvan muodostus perustuu miltei poikkeuksetta CCD-tekniikkaan (charge-coupled device). Tekniikasta johtuen kameroita kutsutaankin yleisesti CCD-kameroiksi. CCD-kennojen peruselementti on yleisesti MOS-kondensaattori (metal oxide semiconductor). Nykyisin MOS-kondensaattoreita käytetään usein varausmuodossa olevan kuvausinformaation siirtoon. CCD-kennotekniikassa itse ilmaisinalkiot ovat useimmiten valodiodeja.

CCD-kenno koostuu pienestä, valoherkästä piikennostosta. Kennosto muodostuu pienistä pikseleistä, joita nykyajan kameroissa on parhaimmillaan jopa miljoonia. Fotoni aiheuttaa piissä valosähköisen reaktion, jossa vapautuu elektroni. Elektronit ovat varauksellisia hiukkasia ja ne varautuvat valon vaikutuksesta. Varaus/jännitemuuntimella varaus muutetaan analogiseksi signaaliksi jonka avulla kuva muodostetaan.

Fyysisesti kennojen koko määritellään sen lävistäjän pituuden avulla (kuva 4).



Kuva 4. Kennokokojen määrittely

### 3.2 Kuvausoptiikka

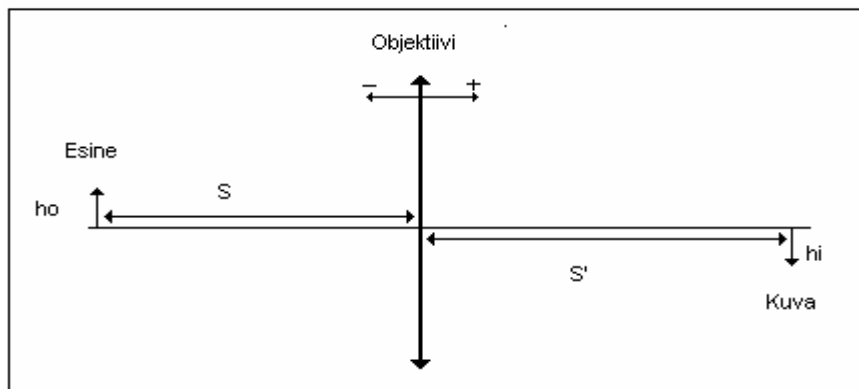
Kameran optiikka määrää paljolti saatavan kuvan laadun. Käytetyn optiikan laatu vaikuttaa kameras valoherkkyyteen, kuvakulmaan ja kuvan terävyyteen. Vääristymät optiikassa aiheuttavat saatavaan kuvaan vastaavan virheen. Kameran tarkennusetäisyyden, kuvausaukon koon sekä kameras etäisyyden muutokset aiheuttavat kuvaustulokseen muutoksia. Asetusten on oltava stabiileja. Jos asetukset muuttuvat, on järjestelmä kalibroitava uudelleen.[4]

## Gaussin kuvausyhtälö

Gaussin kuvausyhtälön mukaan esineen etäisyys, kuvan etäisyys ja objektiivin polttoväli riippuvat toisistaan. Kuvan 4 perusteella voidaan Gaussin kuvausyhtälö esittää muodossa

$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{1}{f}, \quad (1)$$

missä  $s$  on kohteen etäisyys objektiivista,  $s'$  on kuvan etäisyys objektiivista ja  $f$  on objektiivin polttoväli.



Kuva 4. Esineen, objektiivin ja kuvan suhde toisiinsa Gaussin kuvausyhtälön mukaisesti [5].

Suurennus  $m$  saadaan kaavasta

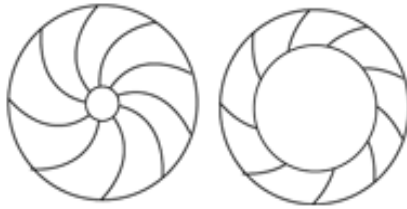
$$m = \frac{h_i}{h_o} = \frac{s'}{s}, \quad (2)$$

missä  $h_i$  on kuvan korkeus ja  $h_o$  on esineen korkeus.

On huomioitava, että todellinen kuva on ylösalaisin, mistä johtuen  $m$  saa negatiivisen arvon.

## f-luku

Kameran optiikan valovoimalla kuvataan, kuinka paljon linssistö kykenee siirtämään valoa filmille tai kennolle. Objektiivissa valon kulkua niiden läpi kontrolloidaan himmentimellä. Yksi käytetyistä himmenninaukkorakenteista on esitetty kuvassa 5.



*Kuva 5. Himmenninaukot*

Valovoima esitetään ns. f-lukuina (f-number, f-stop). Kirjain f on lyhenne sanoista *focal length* eli polttoväli. Mitä pienempi f-luku, sitä paremmin linssistö läpäisee valoa. Valovoimaisempaa optiikkaa voidaan käyttää hämärämmässä tai pienemmällä suljinajoilla. Optiikan parhaimpaan valovoimaan vaikuttavat pääasiassa linssien koko, mutta myös materiaalit, linssigeometria ja hionnan laadukkuus.[6]

f-luku määritellään

f-luku=(efektiivinen polttoväli):(tulopupillin halkaisija)

himentimen ollessa täysin auki.

## Aukkoluku

Aukkoluku kontrolloi esineestä kuvaan pääsevän valon määrää. Se vaikuttaa kameras objektiivissa olevaan himmentimen aukkoon, jonka läpi valo kulkee (kuva 5). Aukon kokoa säätämällä pienemmälle valoa tulee vähemmän, suuremmalla enemmän. Aukkoluku esitetään f-luvun avulla. Se määritellään samalla tavalla



kuin f-luku, paitsi himmennin ei ole täysin auki. Luku ilmaisee polttovälin suhteen käytettyyn aukon läpimittaan ja se merkitään usein tyyliin f:2.8 tai f/2.8. Pienempi luku merkitsee suurempaa aukkoa.

Himentimen aukko vaikuttaa myös syväterävyyteen. Pienemmällä aukolla kuva on terävämpi pitemmältä matkalta, suurella aukolla kohdistusetäisyyden edessä ja takana olevat kohteet sumentuvat. Tavallisesti konenäkökameroiden objektiivissa aukkolukua säädetään käsin. Avaamalla ja sulkemalla aukoa voidaan säätää objektiivi toimimaan muuttuviin valaistusolosuhteisiin.

### 3.3 Valaistus

Valolähteet voidaan jakaa niistä tulevan valon suuntautuneisuuden perusteella kahteen ryhmään. Diffuusit valolähteet hajottavat valoa tasaisesti kaikkiin avaruuskulmiin, mihin vain valaisimen fyysiset ominaisuudet pystyvät. Kollimoidut valolähteet tuottavat mahdollisimman yhdensuuntaista valoa. Tämä saadaan aikaan sijoittamalla pistemäinen valolähde valaisuoptyikan polttopisteeseen.

Valaistuksen avulla pyritään kontrastin muodostukseen, jotta kohde saadaan erottumaan taustasta. Valonlähteen valinta on tehtävä harkiten, sillä valaistus on konenäössä yksi tärkeimmistä osa-alueista. Valolähteen valintaa varten on testattava erilaisia valaisimia, koska niiden ominaisuudet vaihtelevat paljon.

Riittämättömässä valaistuksessa terävän ja laadukkaan kuvan saaminen on vaikeaa, kun taas liian suuri valaistus aiheuttaa heijastumia sekä usein haitallisia varjoja. Onnistuneen valaistuksen valinnan avulla kuvien esikäsittely on paljon helpompaa ja tehokkaampaa. Oikean valaistusvoimakkuuden lisäksi myös kameran ja valaisimien keskinäisellä sijoittamisella on erittäin suuri merkitys kuvan muodostuksessa.

Jos valaistustaso muuttuu, se aiheuttaa kuvainformaatioon ennalta arvaamattomia muutoksia. Valaistussuunnan tai kappaleen asennon muutos aiheuttaa varjojen muuttumista, jotka kamera saattaa nähdä kappaleen koon muutoksina. [4]

Viime vuosien aikana on LED-valaisimien laatu parantunut. Nykyään niitä käytetään laajasti erilaisissa kuvankäsittelyn teollisissa sovelluksissa ja konenäössä. LED-valaistuksella saadaan välkkymätön ja suuri-intensiteettinen valaistus. Niillä on mahdollisuus toteuttaa monenlaisia rakenteita, kuten taustavalo, valaistus sivulta tai ylhäältä ja valon diffusoiminen. LED-valaisimia on useita eri väreisiä, kuten sinisiä, keltaisia, valkoisia ja punaisia.[6]

#### Pimeän kentän valaisin

Pimeän kentän valaisin voidaan toteuttaa LED-valaisimilla sekä halogeenivalaisintekniikalla valokuituun johdettuna. Sillä on erittäin pieni valaistuskulma, ja sillä voidaan valaista myös dimensioiltaan pieniä kappaleita. Valaisin voidaan sijoittaa pienelle etäisyydelle, tai kohde voi olla jopa valaisimen sisällä. Pimeän kentän valaistusta käytettäessä virheet ja painaumat erottuvat CCD-kennolla kirkkaina ja tausta tummana. Menetelmä soveltuu hyvin erilaisten vikojen, kuten naarmujen tai tekovikojen paikantamiseen kohteesta.

#### 3.4 Tiedonsiirto

Digitaalinen tiedonsiirtotapa ja kaapelointi eivät vielä ole standardoituneet. Usein käytetään RS422- tai EIA644-standardien mukaisia tiedonsiirtotapoja ja siirretään kuvan yhden pikselin tieto rinnakkaismuotoisen liitännän kautta kerrallaan kuvankaappauskortille. Näitä perinteistä tiedonsiirtotapoja ei voida kuitenkaan nopeuttaa äärimmäisyyksiin asti, sillä signaali tulee entistä herkemmäksi häiriöille ja varma toimintaetäisyys lyhenee. Seuraavassa on käsitelty muutamia yleisimmin käytettyjä digitaalisia tiedonsiirtotapoja.

#### FireWire

FireWire on IEEE1394-standardin mukainen liittymä, jossa käytetään parikaapelilähiverkoista tuttua differentiaalteknikkaa. Siinä kaksi johdinta kierretään yhteen ja data tulkitaan näiden johtimien jännitteiden erotuksesta. Näin

päästään eroon kaapeliin mahdollisesti indusoituvasta tasajännitevirheestä. FireWiressä pareja on kaksi: lähtevälle ja saapuvalla datalle omansa. Molemmat parit on päällystetty omilla suojafolioillaan ja käyttöjännitejohtimet ovat niiden ulkopuolella. Uloimpana on vielä yksi suojafolio. FireWire -liittymällä päästään siirtonopeuteen 400 Mb/s.

## USB 2.0

USB (Universal Serial Bus) on uudehko sarjaväyläarkkitehtuuri oheislaitteiden liittämiseksi tietokoneeseen. USB 2.0 -liitännässä käytetään myös differentiaalitekniikkaa. USB:ssa pareja on yksi, jonka datasiinaalit muodostavat. Kaikki johtimet ovat saman suojafolion sisällä. Parin toisella puoliskolla on vastakkainen suunta. Vastaanottopäässä käänteisvaiheinen signaali käännetään takaisin, ja signaalit summataan, jolloin matkan aikana syntynyt häiriö kumoutuu. USB 2.0 -liittymällä päästään jopa 480 Mb/s siirtonopeuteen.

## Camera Link-väylä

Camera Link -väylä on liittymä konenäkösovelluksiin. Se on nopein tiedonsiirtotapa, ja sitä käytetään suurta tiedonsiirtonopeutta tarvittavissa sovelluksissa silloin, kun tarvitaan suurta resoluutiota ja/tai suurta kuvausnopeutta. Erilaisten kameroiden, kehittyneiden signaalien ja tiedonsiirtotarpeiden takia Camera Link -väylä on tullut todelliseen tarpeeseen.

## Kuvankaappauskortti

Kuvankaappauskortti nimensä mukaisesti kaappaa kuvan. Analogisten kameroiden tapauksessa kortti vastaanottaa ensin kuvan ja digitoi sitten. Se konvertoi kameralta tulevan PAL- tai CCIR-signaalin digitaaliseksi kuvaksi, joka on tallennettavissa tietokoneen muistiin. Digitaalisen kamerasovelluksissa kuvankaappauskortti ainoastaan vastaanottaa kuvan. Ennen kameralta tulleen kuvan varsinaista käyttöä on huomattava, että se saattaa vaatia esikäsittelyä virheiden poistamiseksi.

## 4 OHJELMISTOT

Konenäköjärjestelmän toiminnassa tarvitaan erilaisia ohjelmia. Seuraavassa on esitetty National instrumentin tuoteperheen eri ohjelmia.

### 4.1 Graafinen LabVIEW-ohjelmointikieli

Graafinen NI LabVIEW on vuodesta 1986 vaikuttanut merkittävästi mittausten ja automaation ohjelmointiin. Nimensä LabVIEW-ohjelma saa englanninkielisistä sanoista Laboratory Virtual Engineering Workbench. LabVIEW'n lähestymistapa mittaustiedon tehokkaaseen keruuseen, käsittelyyn ja esittämiseen on intuitiivinen, ja se soveltuu kaikkiin tuotekehityksen vaiheisiin tuote- ja prototyypisuunnittelusta aina tuotantotestaukseen asti. [7]

#### LabVIEW 7.0

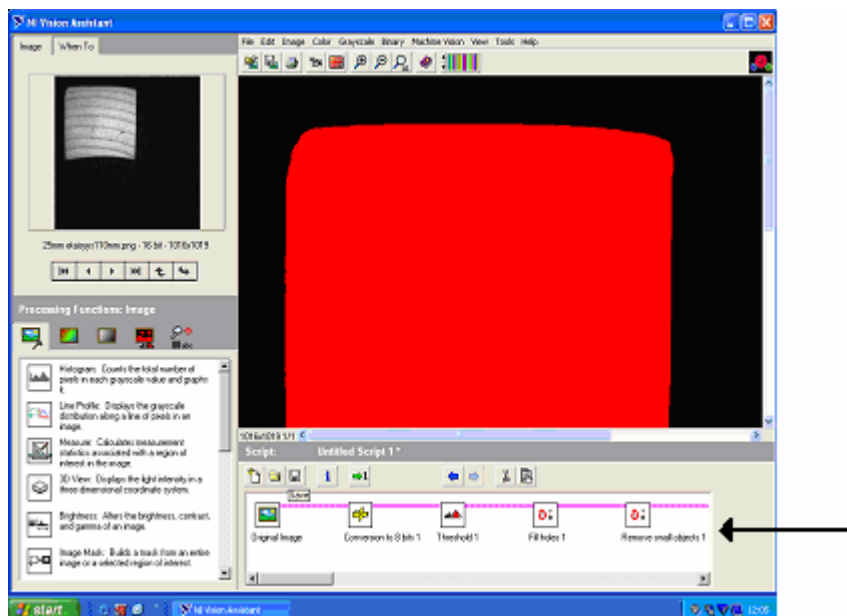
LabVIEW on kautta aikain helpottanut tiedonkeruusovellusten toteuttamista, mutta LabVIEW 7.0 versio sisältää täysin uudenlaiset määrittelyt tavalle tehdä mittauksia ja analysoida niitä. Uudesta versiosta löytyy mm. kaksi uutta interaktiivista apuohjelmaa mittauslaitteiden ohjaus- ja tiedonkeruusovellusten kehittämiseen. [8]

### 4.2 Measurement & Automation Explorer MAX

Measurement & Automation Explorer (MAX) on National instrumentin (NI) tuoteperheen ohjaimille suunniteltu ohjelmisto. Se on käytännössä rajapinta ohjelmistojen ja laitteistojen välille. MAX ja LabVIEW-ohjelmistoympäristö ovat sidoksissa toisiinsa. Jos kuvankaappaus ei toimi MAX:issa, ei se toimi LabVIEW-ohjelmassakaan. MAXin avulla on mahdollista muokata NI:in DAQ-, GPIB-, IMAQ-, IVI-, Motion-, VISA- JA VXI-ohjaimia. [9]

### 4.3 IMAQ Vision Assistant

Vision Assistant on konenäön ja kuvankäsittelyn testaus- ja kehitysympäristö, joka pohjautuu LabVIEW-ohjelmaan. Vision Assistantilla voidaan kaapata harmaasävy- tai värikuvaa sekä suorittaa yksittäisiä kuvankäsittelyoperaatioita ja varioida niiden parametrejä.[8] Lisäksi Vision Assistant-ohjelmalla voidaan suorittaa peräkkäisiä kuvankäsittelyoperaatioita ja muodostaa niistä ajettava skriptitiedosto. Tällaisen skriptitiedoston pohjalta voidaan muodostaa LabVIEW-ohjelma, jota voidaan käyttää sellaisenaan tai räätälöitynä konenäköongelman ratkaisussa. Kuvassa 6 on esitetty nuolella kohta skriptitiedoston muodostumisesta Vision Assistant-ohjelmassa.



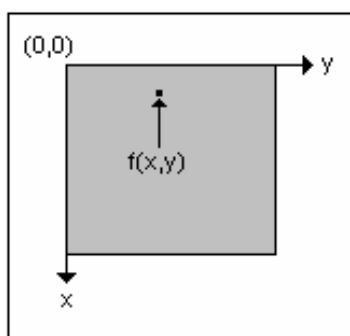
Kuva 6. Skriptitiedoston luominen IMAQ Vision Assistant -ohjelmalla

## 5 DIGITAALINEN KUVANKÄSITTELY

Digitaalisella kuvalla tarkoitetaan sähköisessä muodossa olevaa kuvaa, jota voidaan käsitellä ja muokata tietokoneen ja tarkoitukseen sopivien kuvankäsittely- ja grafiikkaohjelmien avulla.

### 5.1 Kuvankäsittelyn perusasioita

Kuvalla tarkoitetaan kaksiulotteista funktiota  $f(x,y)$ , missä  $x$  ja  $y$  viittaavat spatiaalikoordinaatteihin ja funktion arvo on verrannollinen luminanssiin kussakin pisteessä. Jatkossa käytetään kuvan 7 mukaista spatiaalikoordinaattikonventiota.

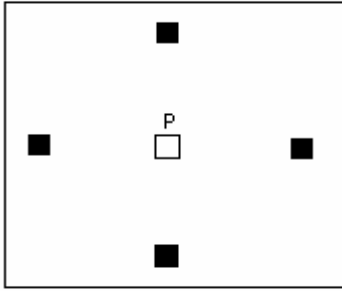


*Kuva 7. Spatiaalikoordinaattikonventio*

Digitaalisessa kuvassa sekä  $x$ ,  $y$  että  $f(x,y)$  esitetään diskreetissä muodossa. Kuvaa voidaan pitää matriisina, jonka rivi- ja sarakeindeksit osoittavat kuvapisteen ja vastaavat matriisielementit harmaatason arvon kyseisessä pisteessä.[5]

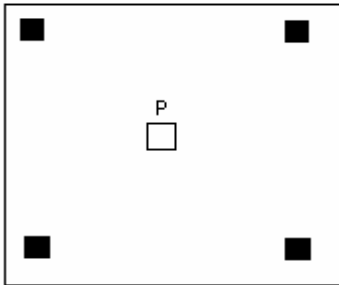
#### Kuvapisteen naapurit

Kun pikseli  $p$  on varustettu koordinaateilla  $(x,y)$ , on sillä neljä horisontaalista ja neljä vertikaalista naapuria. Näitä kutsutaan pikselin 4-naapureiksi ja niitä merkitään  $N_4(p)$ . Naapuripikselit ovat yhden yksikköpituuden päässä  $p$ :stä. Kuvassa 8 on esitetty 4-naapureiden sijainti.



*Kuva 8. 4-naapureiden sijainti pikseliin  $p$  nähden*

Diagonaalinaapurit sijaitsevat kuvan 9 mukaisesti. Diagonaalinaapurit merkitään  $N_D(p)$ .



*Kuva 9. Diagonaalinaapureiden sijainti pikseliin  $p$  nähden*

4-naapurit ja diagonaalinaapurit muodostavat  $p$ :n 8-naapurit. Niitä merkitään  $N_8(p)$ .

### Liittyvyys

Pikseleiden liittyvyyden avulla määritellään esineen tai sen osien ääri viivoja kuvasta. Liittyvyyden selvittämiseksi täytyy tietää ovatko pikselit jollakin tavalla vierekkäin. Lisäksi täytyy tietää täyttääkö pikseleiden harmaasävy jollakin tapaa määritellyn samankaltaisuuden.

Seuraavassa pikselin  $p$  naapurista käytetään kirjainta  $q$

1. 4-liittyvyys toteutuu, kun pikseli  $q$  on 4-naapuri ja harmaasävyt täyttää samankaltaisuuden.
2. 8-liittyvyys toteutuu, kun pikseli  $q$  on 8-naapuri ja harmaasävyt täyttää samankaltaisuuden.
3.  $m$ -liittyvyys toteutuu kun pikseli  $q$  on 4-naapuri tai diagonaalinaapuri ja  $N_4(p):n$  ja  $N_4(q):n$  leikkaus on tyhjä. Lisäksi harmaasävyjen tulee täyttää samankaltaisuus.

## 5.2 Kuvan esikäsittely

Kuvan esikäsittelyn tarkoituksena on parantaa kuvan laatua. Esikäsittelyssä mm. parannetaan kuvan kontrastia, suodatetaan kohinaa ja poistetaan häiritsevää kuvatausta. Kuvankäsittelyyn on kaksi menetelmää. Nämä ovat spatiaalialueen- ja taajuusalueen menetelmä. Spatiaalialueen menetelmässä kuvan esikäsittely toteutetaan maskien avulla. Menetelmässä käytetään spatiaalisuodattimia.

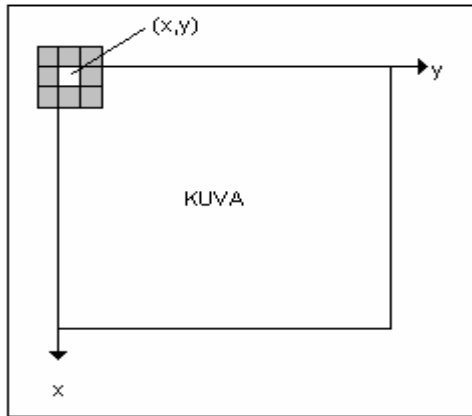
Spatiaalialueen menetelmissä kuvankäsittelyoperaatiot kohdistuvat suoraan kuvapikseleihin. Matemaattisesti operaatio voidaan esittää muodossa

$$g(x,y)=T[f(x,y)] \quad (3)$$

missä  $f(x,y)$  on lähtökuvaa,  $g(x,y)$  on prosessoitu kuva,  $T$  on kuvaoperaattori

Spatiaalialueen menetelmissä kullekin prosessoidun kuvan pisteelle saadaan uusi arvo. Tämä onnistuu liikuttamalla alikuvan keskustaa kuva-alueen yli (kuva 10).





*Kuva 10. Alikuvan liikuttaminen kuva-alueen yli*

Spatiaalisuodatuksiksi kutsutaan maskin käyttöä, jonka avulla kuvalle voidaan suorittaa erilaisia operaatioita. Näiden avulla kuvasta saadaan haluttu tieto paremmin irti. Spatiaalisuodattimilla voidaan mm. pienentää kohinaa, rajata yksityiskohtia tai terävöittää kuvaa. Käytettävät maskit ovat pieniä matriiseja joiden painokertoimet vaikuttavat suodatuksen lopputulokseen.

Nth Order -suodatin on yksi spatiaalisuodattimista. Se on epälineaarinen alipäästösuodatin, joka on jatkokehitemä mediaanisuodattimesta. Suodatin asetetaan käsiteltävän naapuruston intensiteettiarvot suuruusjärjestykseen. N-luvun avulla määrätään arvo prosessoitavalla pikselille. N-luku tarkoittaa lukua, joka valitaan asetetuista intensiteettiarvoista. Nth Order-suodatus määritellään

$$P_{(i,j)} = N[P_{(n,m)}], \quad (4)$$

missä  $[P_{(n,m)}]$  on  $n \times m$  -naapuruston pikselien intensiteettiarvot suuruusjärjestyksessä.

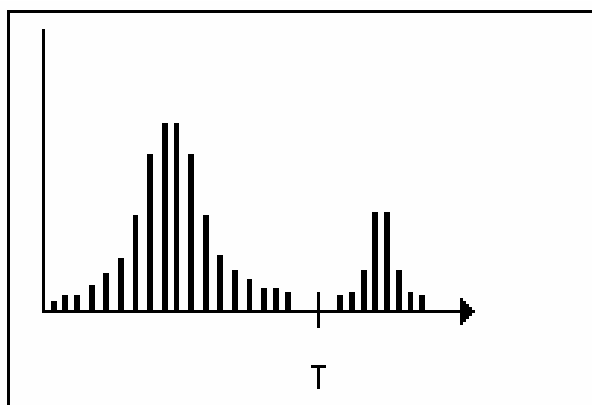
### 5.3 Segmentointi

Jotta kuvan erityyppiset alueet voitaisiin koodata juuri niille suunnitelluilla menetelmillä, on ne voitava jotenkin erotella toisistaan. Tällöin puhutaan kuvan segmentoinnista. Segmentointi on kuva-analyysin ensimmäinen osa (kuva 2). Segmentointi on yleisesti ottaen kuva-analyysin vaikein osa. Tunnettaessa ympäristö voidaan esimerkiksi valaistuksella tai kuvaustekniikalla vaikuttaa segmentoinnin onnistumiseen.

Harmaasävykuvien segmentoinnissa käytetään yleisesti kahta periaatetta: epäjatkuvuuden ja samanlaisuuden havaitseminen. Edellisen ryhmän piiriin kuuluvat erillisten pisteiden viivojen ja reunojen havaitseminen. Jälkimmäisen piiriin kuuluvat kynnystys, alueiden kasvattaminen, erottaminen ja yhdistäminen.[5]

#### Kynnystäminen

Kynnystäminen on piirreirrotustekniikka, joka on erityisen hyödyllinen segmentointia ajatellen. Kynnystäminen jakaa kuvan segmentoimisessa kahteen osaan, joita ovat kohteet ja tausta. Kuvasta muodostuu binäärikuva, jossa kohteet erottuvat taustasta.[9] Yksinkertaisin kynnystystapa on globaalikynnystäminen, missä kynnysarvo  $T$  riippuu vain  $f(x,y)$ :stä. Kynnystyksessä on kylläkin mahdollista käyttää myös useampia kynnystysarvoja. Tämä on kuitenkin paljon epäluotettavampi tapa kuin yhdellä kynnystysarvolla kynnystäminen. Yleensä parhaisiin tuloksiin päästään yhdellä, muuttuvalla kynnysarvolla, mutta tämän arvon valitseminen on usein vaikeaa. (kuva 11).



Kuva 11. Kuvasta muodostettu histogrammi yhden kynnsarvon perusteella

Kynnystetty kuva määritellään

$$g(x,y) = \begin{cases} 1, & \text{kun } f(x,y) > T \\ 0, & \text{kun } f(x,y) \leq T \end{cases} \quad (5)$$

missä  $T$  = kynnsarvo,  $g(x,y)$  = kynnistyksen jälkeinen pikseliarvo,  $f(x,y)$  = pikselin arvo ennen kynnistystä

Kun  $T$  riippuu vain  $f(x,y)$ :stä, kynnystämistä kutsutaan globaaliksi. Mikäli  $T$  riippuu sekä  $f(x,y)$ :stä että  $p(x,y)$ :stä, kutsutaan kynnystämistä paikalliseksi. Mikäli lisäksi  $T$  riippuu  $x$ :stä ja  $y$ :stä, kutsutaan kynnystämistä dynaamiseksi.[5]

#### 5.4 Morfologiset operaatiot

Morfologisilla operaatioilla on laaja käyttö kuvankäsittelyssä. Niiden avulla kohteita voidaan laajentaa tai supistaa. Niillä voidaan myös täyttää reikiä, tasoittaa reuna- viivaa, poistaa pieniä kohteita, erottaa toisiaan koskettavia kohteita, muodostaa luuranko yms. Morfologiset operaatiot voidaan jakaa binäärikuvaoperaatioihin ja harmaasävykuvaoperaatioihin.[5] Binäärikuvaoperaatioissa kuvan tulee olla mustavalkokuva eli harmaasävykuvat pitää kynnystää ennen morfologisia operaatioita. Harmaasävykuvaoperaatioita käytetään suoraan harmaasävykuvaan. Seuraavaksi tutustutaan paremmin binäärikuvaoperaatioihin.

## Binääriset operaatiot

Binäärinen morfologinen operaatio muuttaa pikseliarvoja nolasta ykköseen tai ykkösestä noltaan tai säilyttää pikseliarvon entisellään. Morfologisissa operaatioissa tarvitaan strukturointielementti, jonka pikseliarvot voivat saada vain arvoja nolla ja yksi. Elementtiä liikutetaan kuva-alueen yli, jolloin kuvan pikseleiden ja niiden päällä olevien strukturointielementtien pikseleiden tulee täyttää jokin looginen ehto, jonka avulla saadaan pikselin arvo prosessoidussa kuvassa. Koska morfologiset operaatiot ovat riippuvaisia prosessoitavan pikselin ympäristössä olevista pikseleistä, täytyy lähtökuvalla varata reuna-alue. Joidenkin morfologisten operaatioiden tapauksessa neliömäisen muodon sijasta strukturointielementti voi olla myös kuusikulmainen.[9] Binäärisistä morfologisista operaatioista perusoperaatioita ovat eroosio, dilaatio ja hit-miss-funktio, joiden avulla voidaan kombinoida muut operaatiot. Jotkin kombinoitavista operaatioista vaatii onnistuakseen myös alkuperäisen kuvan.

### Eroosio

Eroosio poistaa taustassa olevia pieniä pikseliryhmiä ja kohteiden reunoilla olevia pikseleitä riippuen strukturointielementin koosta ja siinä olevien ykkösten paikan valinnasta. Vain ne pikseliarvot kuvassa, joiden päällä olevan strukturointielementin arvo on yksi, huomioidaan muodostettaessa pikselille uusi arvo prosessoidussa kuvassa. [5]

### Dilaatio

Dilaation vaikutus on päinvastainen eroosiolle, koska dilaatio vastaa taustan eroosiota. Operaatio poistaa kohteissa olevia pieniä reikiä ja kasvattaa kohteita reuna-alueiltaan riippuen strukturointielementin koosta ja ykkösten paikan valinnasta. Vain ne pikseliarvot kuvassa, joiden päällä olevan strukturointielementin arvo on yksi, huomioidaan muodostettaessa pikselille uusi arvo prosessoidussa kuvassa.[5]

## Hit-mis-operaatio

Hit-mis-operaation avulla voidaan paikallistaa kuvasta tietyn konfiguraation omaavia pikseleitä. Se jättää kuvaan vain ne pikselit, joilla on täsmälleen sama naapurikonfiguraatio kuin strukturointielementin keskimmaisella pikselillä. Riippuen strukturointielementistä hit-mis-operaatiota voidaan käyttää mm. eristettyjen yksinäisten pikseleiden havaitsemiseen taustassa, yksittäisistä pikseleistä koostuvien reikien havaitsemiseen kohteista, vaaka- tai pystysuorien reunojen havaitsemiseen ja nurkkien havaitsemiseen. Tulos riippuu strukturointielementin koosta.[5]

## Reikien täyttäminen

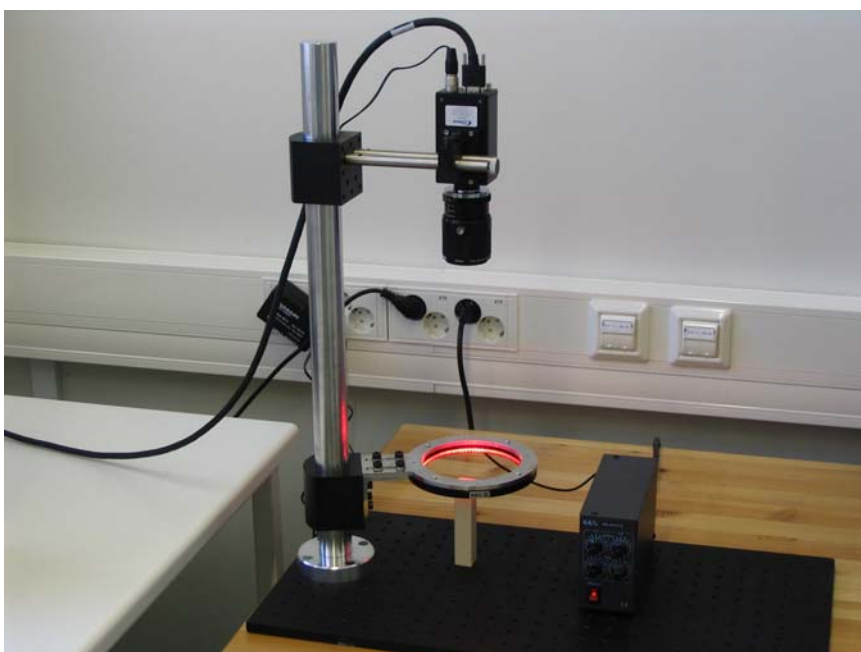
Reikien täyttäminen tarkoittaa kuvassa olevien partikkeleiden sisällä olevien reikien täyttämistä. Reiän kuvassa voi aiheuttaa kappaleessa oleva tummempi kohta tai epäonnistuneesta valaistuksesta aiheutunut varjo.

## Pienten kohteiden poistaminen

Pienten kohteiden poistamisella kuvasta poistetaan pieniä kuvattavan kohteen ulkopuolisia kohteita. Ne voivat esimerkiksi vaikuttaa kuvattavan kappaleen pinta-alan laskentaan.

## 6 TYÖSSÄ KÄYTETYT LAITTEISTOKOMPONENTIT

Työn tavoitteisiin pääsemiseksi oli työssä käytetyille laitteistokomponenteille tiettyjä vaatimuksia. Riittävään  $\pm 0,05$  mm epätarkkuuteen pääsemiseksi työssä vaadittiin suuresoluutiokameraa. Kohteesta ei tarvittu väritietoa eikä työssä kuvattu liikkuvaa kohdetta, joten kameraksi sopi digitaalinen harmaasävykamera. Myös objektiivin valinnassa asetetut vaatimukset täytyi ottaa huomioon. Laitteita valittaessa ajateltiin myös järjestelmän jatkokehitystä, minkä vuoksi valaistuksessa päädyttiin pimeän kentän valaisimeen. Valaistuksen teholähde oli laitteistosta ainoa, jota ei tarvinnut työtä varten tilata koska sellainen löytyi työntilaaajalta valmiiksi. Kuvassa 12 on esitetty osa työssä käytetyistä laitteistosta johon kuuluu digitaalinen konenäkökamera, pimeänkentän valaisin sekä telesentrinen objektiivi.



*Kuva 12. Konenäköjärjestelmän tornirakenne*

## 6.1 Digitaalinen kamera

Kameran valinnassa päädyttiin tarjouskilpailun jälkeen Sonyn digitaaliseen XCL-U1000-harmaasävykameraan, jonka tiedonsiirto tapahtuu Camera Link- väylän kautta. Kamera perustuu CCD-kennotekniikkaan, ja sen resoluutio on 1200x1600. Valitun kameras ominaisuuksia on esitetty taulukossa 2.

*Taulukko 2. Sony XCL-U1000-digitaalikameran ominaisuuksia*

Kennon koko	1/1,8
Resoluutio	1200x1600
Pikselin koko	4,4x4,4 μm
Linssin kiinnitys	C
Lähtö	Camera Link

Kuvassa 13 on esitetty työhön valitun harmaasävykameran ulkoiset muodot.



*Kuva 13. Sony XCL-U1000-digitaalikamera*

## 6.2 Optiikka

Työssä käytetyn objektiivin polttoväli laskettiin Gaussin kuvausyhtälöiden (1) ja (2) avulla.

$$m = \frac{h_i}{h_o} = \frac{s'}{s}$$

josta saadaan,

$$s' = \frac{h_i}{h_o} \cdot s = \frac{5,82 \text{ mm}}{28,0 \text{ mm}} \cdot 330 \text{ mm}$$

$$s' = 62,22 \text{ mm}$$

Sijoittamalla  $s'$  kaavaan (1) saadaan,

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{1}{62,22 \text{ mm}} - \frac{1}{-330 \text{ mm}}$$

$$f = 52,5 \text{ mm}$$

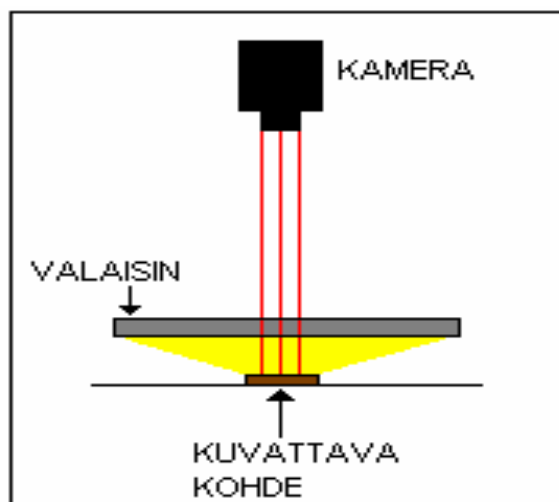
Polttovälin määrittämisen perusteella päädyttiin työhön tilata telesentrinen objektiivi, jonka polttoväli oli 55 mm. Telesentristä objektiivia käytetään tarkkoja mittauksia vaativissa konenäköjärjestelmissä, koska sen kuvavääristymä on pieni.

### 6.3 Valaistus

Runsaan kokeilemisen ja testaamisen jälkeen valaistuksessa päädyttiin pimeään kentän valaisimeen (kuva 14). Se antoi vaihtoehtoisista valaisimista parhaan kontrastin. Toisena vahvana ehdokkaana oli etuvalaisin, jonka avulla päästiin miltei yhtä hyvään lopputulokseen. Pimeään kentän valaisimeen päädyttiin kuitenkin ajatellen konenäköjärjestelmän jatkokehitystä, jossa on tarkoitus määrittää kappaleen syytiheys. Siihen tarkoitukseen pimeän kentän valaisimen ominaisuudet olivat ehdottomasti parhaat.



Kuvassa 14 on esitetty pimeään kentän valaisimen toimintaperiaate.



Kuva 14. Pimeään kentän valaisin

#### 6.4 Kuvankaappauskortti

Kuvankaappauskorttia valittaessa tärkein ominaisuus sille oli, että se tukee LabVIEW-ohjelmointikieltä. Kuvankaappauskortiksi valittiin National Instruments PCI-1428 Camera Link-kuvankaappauskortti.

## 7 TOTEUTETTU KONENÄKÖJÄRJESTELMÄ

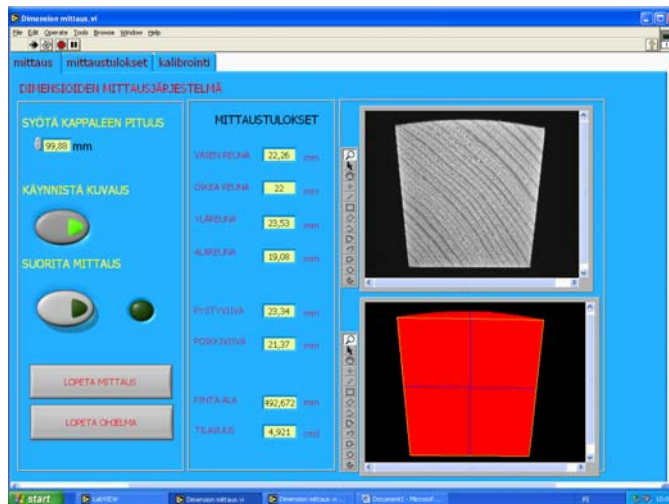
Konenäköjärjestelmää ohjaava käyttöliittymä toteutettiin LabVIEW-ohjelmointikielellä. Digitaalinen kuvankäsittely konenäköjärjestelmässä toteutettiin Vision Assistant- kuvankäsittelyohjelmalla.

### 7.1 Ohjelman toiminta

Konenäköjärjestelmää ohjaavan käyttöliittymän toiminta on tehty käyttäjälle mahdollisimman helpoksi tekemällä siitä yksinkertainen ja selkeä. Käyttöliittymä sisältää kolme eri välilehteä, joiden toiminta on esitetty seuraavassa.

#### MITTAUS-välilehti

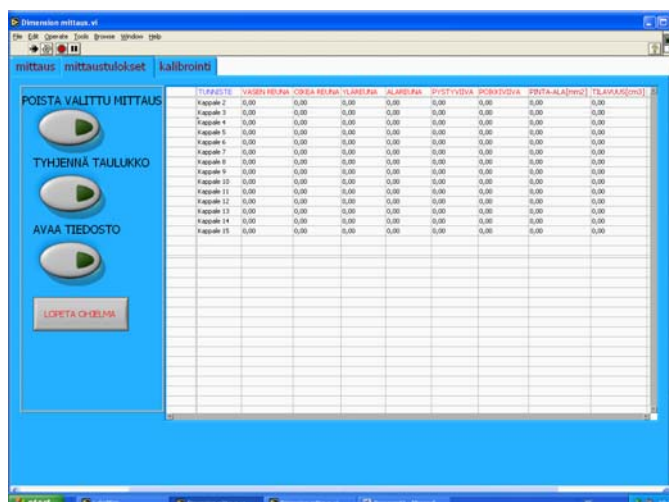
Mittaus konenäköjärjestelmällä tapahtuu MITTAUS-välilehdellä (kuva 15). Välilehdessä on painikkeet, joiden avulla itse mittaustoiminto tapahtuu. Mittaustapahtuma aloitetaan *KÄYNNISTÄ KUVAUS* -painikkeella. Tämä aloittaa jatkuvan kuvan muodostuksen välilehdellä olevalle ylemmälle näytölle. Tämän jälkeen ohjelma mahdollistaa mitattavan kappaleen asettamisen oikeaan kohtaan. Jatkuvan kuvanoton avulla kappale saadaan oikealle kohdalle sekä oikeaan asentoon. Kappaleen pituustieto mitataan työntömitalla ja saatu tulos syötetään *SYÖTÄ KAPPALEEN PITUUS* -kontrolliin. Pituustiedon syöttämisen jälkeen ohjelma on valmis mittaamaan. Mittaus tapahtuu *SUORITA MITTAUS* -painikkeella, jolloin ohjelma antaa puukappaleen mitat näyttöjen vieressä oleviin indikaattoreihin. Alempaan näyttöön muodostuu käsitelty kuva, joka näyttää reunan tunnistuksen onnistumisen.



Kuva 15. MITTAUS-välilehti

### MITTAUSTULOKSET-välilehti

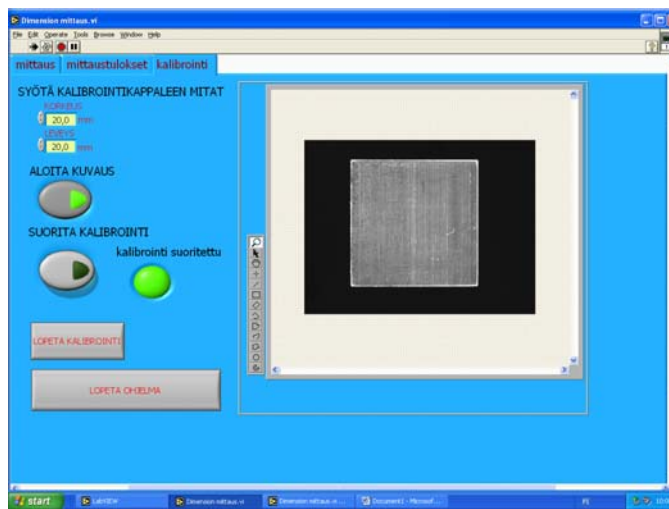
MITTAUS-välilehdessä saadut tulokset kirjautuvat MITTAUSTULOKSET-välilehdelle (kuva 16), missä ne ovat valmiina tulosten tarkastelua varten. Välilehdellä on myös mahdollista poistaa valittuja mittaustuloksia *POISTA VALITTU MITTAUS* -painikkeella tai tyhjentää tarvittaessa koko taulukko *TYHJENNÄ TAULUKKO* -painikkeella. Taulukon mahdollinen tallennus tapahtuu lopetettaessa ohjelman mittaustoiminto. Ohjelmassa on myös mahdollista avata aiemmin tallennetut mittaustulokset *AVAA TIEDOSTO* -painikkeella ja jatkaa mittauksia siitä, mihin viimeksi on jääty.



Kuva 16. MITTAUSTULOKSET-välilehti

## KALIBROINTI-välilehti

Konenäköjärjestelmän kalibrointi suoritetaan KALIBROINTI-välilehdellä (kuva 17). Kalibrointi aloitetaan *ALOITA KUVAUS* -painikkeella. Painallus aloittaa jatkuvan kuvan muodostuksen, jonka jälkeen kalibrointikappale asetetaan kuvausalueeseen. Kappaleen kalibrointi suoritetaan *SUORITA KALIBROINTI* -painikkeella. Onnistuneen kalibroinnin merkiksi ohjelmassa syttyy vihreä merkkivalo. Tämän jälkeen kalibrointi lopetetaan *LOPETA KALIBROINTI* -painikkeella, jonka jälkeen ohjelma on valmis mittauksiin.



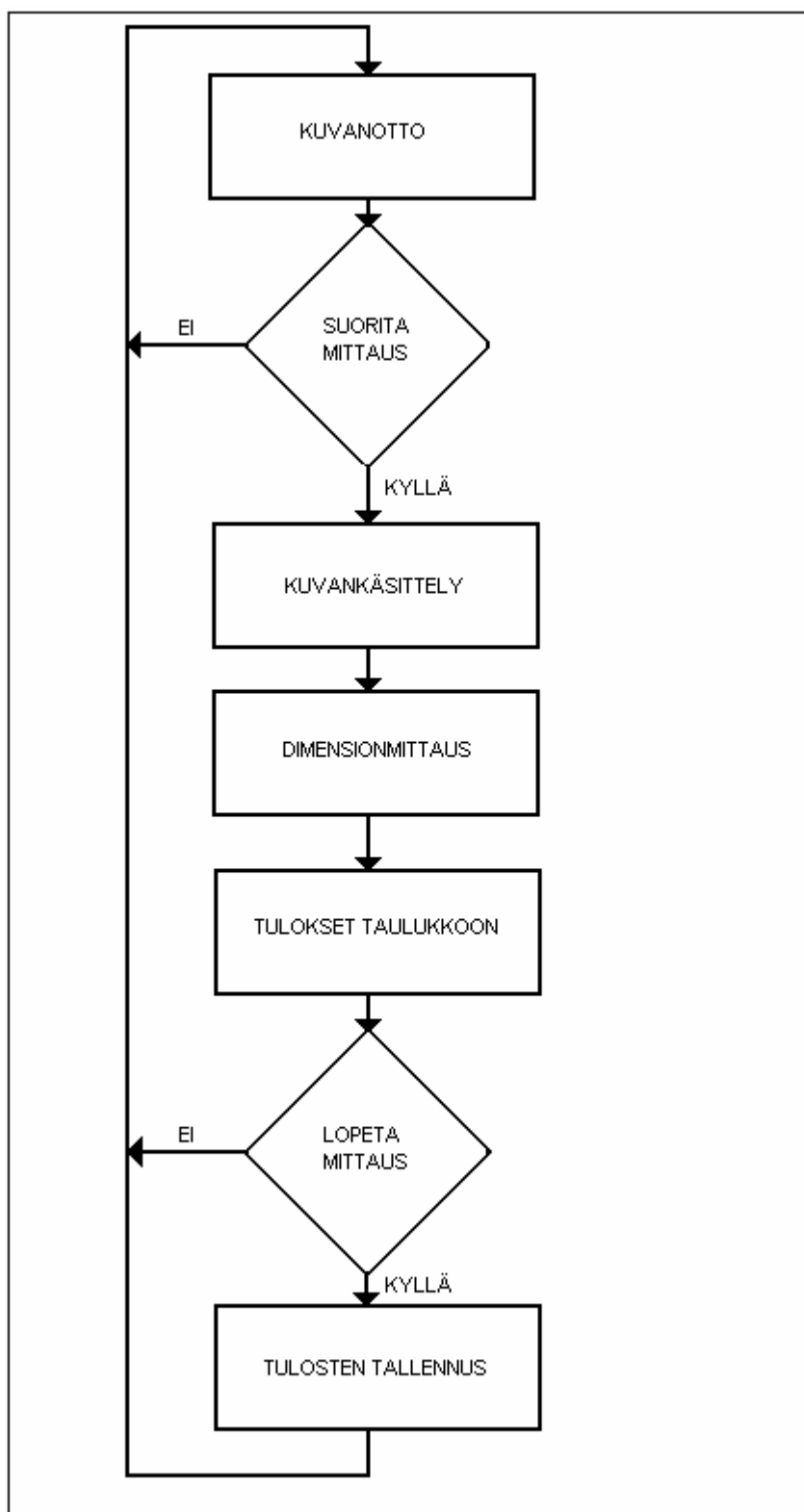
Kuva 17. Kalibrointi-välilehti

## 7.2 Ohjelman toteutus

Ohjelman rakenne koostuu kolmesta osasta, jotka ovat alustusosa, pääohjelma sekä lopetusosa. Alustusosa on toteutettu ohjelmassa sekvenssirakenteella, jonne on sijoitettu muuttujien sekä kuvanoton alustus. Lisäksi alustusosassa avataan ohjelman toiminnassa tarvittava kalibrointivakio. Pääohjelma on toteutettu tilakonerakenteen avulla. Pääohjelma sisältää kaikki ohjelman toiminnot, kuten dimensioiden mittauksen, kalibroinnin sekä mittaustulosten käsittelyn. Lopetusosa on rakennettu sekvenssirakenteen avulla, ja siellä sijaitsee kuvausvarauksen lopetus sekä väliaikaismuistin tyhjennys. Ohjelmassa toimiva dimensioiden mittausjärjestelmä ja kalibrointi on käsitelty seuraavassa.

### Dimensioiden mittausjärjestelmä

Painettaessa MITTAUS -välilehden *KÄYNNISTÄ KUVAUS* -painiketta menee tilakone suorittamaan tilaa dimensionmittaus. Painamalla *SUORITA MITTAUS* -painiketta ohjelma suorittaa digitaalisen kuvankäsittelyn ja dimensiomittauksen sekä laskee partikkelianalyysin avulla mitattavan kappaleen pinta-alan sekä tilavuuden. Ohjelma tulostaa mittaustulokset MITTAUS-välilehdellä oleviin indikaattoreihin sekä MITTAUSTULOKSET-välilehdellä olevaan taulukkoon. Lopettaessa kuvaus *LOPETA MITTAUS* -painikkeesta ohjelma mahdollistaa mittaustulosten tallentamisen itse valittuun tiedostoon. Kuvassa 18 on esitetty dimensioiden mittausjärjestelmän toiminta vuokaaviona.



Kuva 18. Vuokaavio dimensioidenmittauksesta ohjelmassa

Dimensioiden mittaamisen tärkein vaihe on digitaalinen kuvankäsittely. Työssä se on toteutettu IMAQ Vision Assistant -kuvankäsittelyohjelmalla. Ohjelman avulla on suoritettu operaatiot, joiden avulla kuvasta saadaan mahdollisimman tarkasti yksityiskohdat esiin. Vision Assistantissa kuvankäsittely on tehty ensin skriptimuotoon, jonka jälkeen se on käännetty suoraan LabVIEW-ohjelmointikielelle. Seuraavassa on esitetty dimensionmittauksessa käytetyn kuvankäsittelyn vaiheet. Kohdissa 1 – 5 kuvankäsittely on tehty IMAQ Vision -kuvankäsittelyfunktioilla ja kohdissa 6 – 7 se on toteutettu työssä kehitetyillä funktioilla.

### *1. Kuvaus*

Kuvankäsittelyyn vaikuttaa suuresti puukappaleen asettaminen kuvaan. Kappaleen täytyy mahtua kuvaan kokonaisuudessaan kuvankäsittelyn onnistumiseksi. Kappale näkyy kuvaruudussa kirkkaana valaistuksen ansiosta.

### *2. Automaattinen kynnystys*

Kuvankäsittelyssä päädyttiin automaattiseen Clustering-kynnystykseen. Sen avulla kuvasta saadaan binäärikuva, jossa puukappale näkyy punaisena kokonaisuutena. Kynnystäminen on pakollinen operaatio, koska ohjelmassa toteutettu reunan tunnistus vaatii toimiakseen binäärikuvan.

### *3. Reikien täyttö*

Kynnystettyyn kuvaan saattaa ilmestyä mustia kohtia, joita kuvankäsittelyssä kutsutaan rei'iksi. Reikien vuoksi kuvasta ei saada oikeaa pinta-alatietoa, koska reiät vähentävät kappaleeseen todellisuudessa kuuluvien pikseleiden määrää. Siksi reikien täyttöoperaatio on tärkeä vaihe ohjelman toiminnassa. Reiät johtuvat esim. kappaleen pinnan epätasaisuudesta, joka aiheuttaa varjoja kuvattavalle pinnalle.

#### 4. Pienten kohteiden poisto

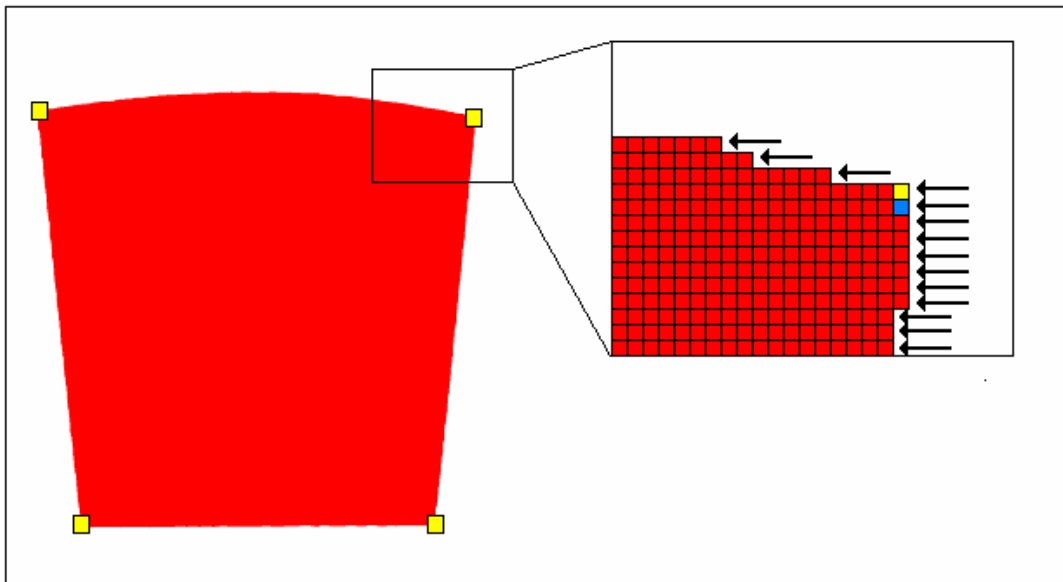
Pienten kohteiden poistamisella kuvasta poistetaan pieniä kohteita, jotka eivät kuulu kuvattavaan kappaleeseen. Kohteiden poisto on ohjelmassa tärkeää, koska se vaikuttaa kappaleesta laskettavaan pinta-alaan suurentamalla sitä todellisuutta suuremmaksi.

#### 5. Nth Order -suodatus

Nth Order-suodatuksen avulla kuvasta tasoitetaan kuvattavan kappaleen muotoa, jolloin pienennetään reunan tunnistuksen mahdollisuutta tarttua johonkin yksittäiseen hajapikseliin. Suodatus toteutettiin N:n arvolla 4, maskin koon ollessa 3x3.

#### 6. Reunantunnistus

Reunantunnistuksessa käydään binäärikuvaa läpi rivi riviltä IMAQ-GetRowCol-funktiolla. Reunantunnistusta on havainnollistettu kuvassa 19.



Kuva 19. Ohjelmassa toimiva reunantunnistus



Kuvassa 19 on esitetty reunantunnistusfunktion toimintaa mustilla nuolilla. Funktio käy läpi kaikki kuvan rivit pikseli pikseliltä ja muodostaa taulukon niiltä riveiltä, joilta se löytää pikselin. Tämän taulukon avulla ohjelmassa tapahtuu kulmapikseleiden tunnistus jokaisesta neljästä puukappaleen kulmasta. Kuvassa 19 on esitetty keltaisilla merkinnöillä kappaleesta löytyvät kulmapikselit. Näiden pikseleiden löytymiseen vaikuttaa ohjelmassa oleva vertailu, joka vertaa jokaiselta riviltä löytyneen pikselin sijaintia seuraavan rivin pikseliin. Kun löydetty pikseli ja seuraavan rivin löydetty pikseli ovat pystysuorassa katsottuna päällekkäin, täyttyy ohjelmassa asetettu ehto ja kulmapikseliksi tunnistetaan ylempi pikseli. Kuvan 19 suurennetuksessa osassa on esitetty keltaisella merkinnällä kappaleesta tunnistettu kulmapikseli sekä sinisellä tunnetun kulmapikselin vertailupikseli.

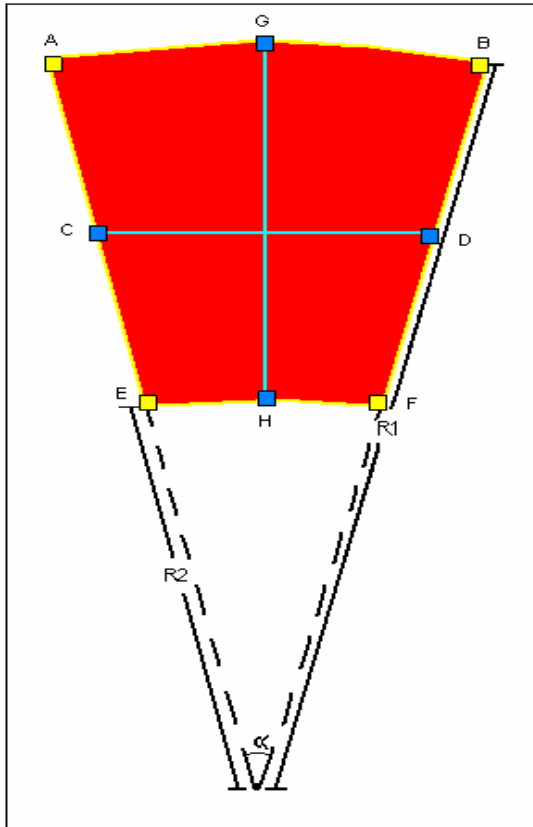
Kulmapikseleiden tunnistuksen avulla kuvasta saadaan puukappaleen kulmien koordinaatit. Näiden koordinaattitietojen avulla suoritetaan oikean ja vasemman reunan pituusmittaukset. Molempien reunojen pituusmittaus tapahtuu vähentämällä yläkulman y-koordinaatti alakulman y-koordinaatilla. Kuvassa 20 on esitetty vasemman reunan pituus kirjainvälillä A – E sekä oikea reuna välillä B – F.

Ylä- ja alareunan pituusmittaus tapahtuu eri tavalla, koska niissä on otettava huomioon reunojen kaarevuus. Reunojen pituuksien mittausta varten täytyy ohjelmassa määrittellä kappaleen vasemman ja oikean reunan leikkauspiste, kuten kuvassa 20 on esitetty. Leikkauspisteen avulla voidaan määrittellä reunojen välinen kulma  $\alpha$  sekä etäisyydet R1 ja R2 leikkauspisteistä kappaleen ylä- ja alakulmiin.

Ylä- ja alareunojen kaarevat pituudet saadaan kaavasta

$$B = \frac{\alpha}{360^\circ} \times 2\pi R. \quad (6)$$

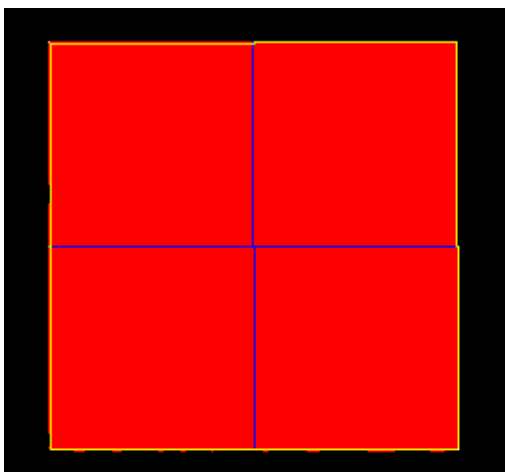
Ohjelmassa on toiminto, joka huomioi jos kulma  $\alpha$  saa negatiivisen arvon. Tällöin ylä- ja alareunojen pituusmittaus tapahtuu samalla tavalla kuin oikean ja vasemman reunan mittaus.



*Kuva 20. Ylä- ja alareunan mittauksessa tarvittavia arvoja*

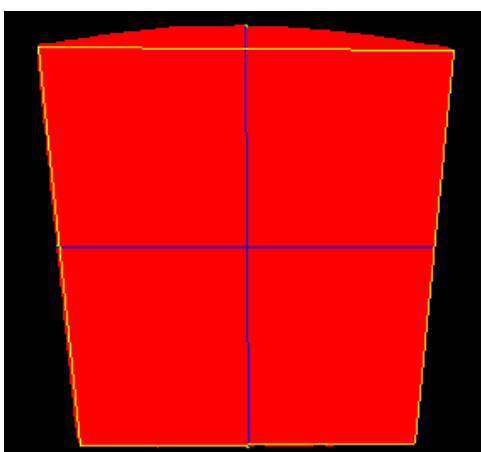
Kappaleen pysty- ja poikkiviivan mittauksissa tarvitaan kaikkien ulkoreunojen keskikohtalta löytyvien pikseleiden koordinaatit. Pikselin sijainnit on esitetty kuvassa 20 sinisillä merkinnöillä (C,D,G,H). Pikselin toinen koordinaattitieto saadaan laskemalla ulkoreunan keskikohta, josta selviää pikselin rivi tai saraketieto. Sen avulla IMAQ-GetRowCol-funktiolla saadusta taulukkotiedosta voidaan poimia myös pikselin toinen koordinaattitieto. Tunnettaessa näiden neljän pikselin koordinaatit, voidaan mitattavan kappaleen pysty- ja poikkiviivat laskea. Kuvassa 20 pystyviivaan mittausväliä osoittaa kirjaimien G – H väli sekä poikkiviivan mittausväliä kirjaimet C – D.

Kuvassa 21 on esitetty ohjelmassa näytölle tulostuva kuva puukappaleesta dimensiomittauksen jälkeen. Keltaisilla viivoilla kuvassa on esitetty puukappaleen reunojen pituudet. Sinisillä viivoilla on esitetty kappaleen pysty- ja poikkipituudet.



*Kuva 21. Ohjelmassa näytölle tulostuva kuva mitattavasta kappaleesta*

Kuvasta 22 huomataan, kuinka ohjelma löytää kappaleen kulmat, vaikka reunat ovat kaarevia. Kaarevan kappaleen tapauksissa ylä- ja alareunojen keltaiset viivat eivät vastaa ohjelmassa mitattuja reunojen pituuksia.



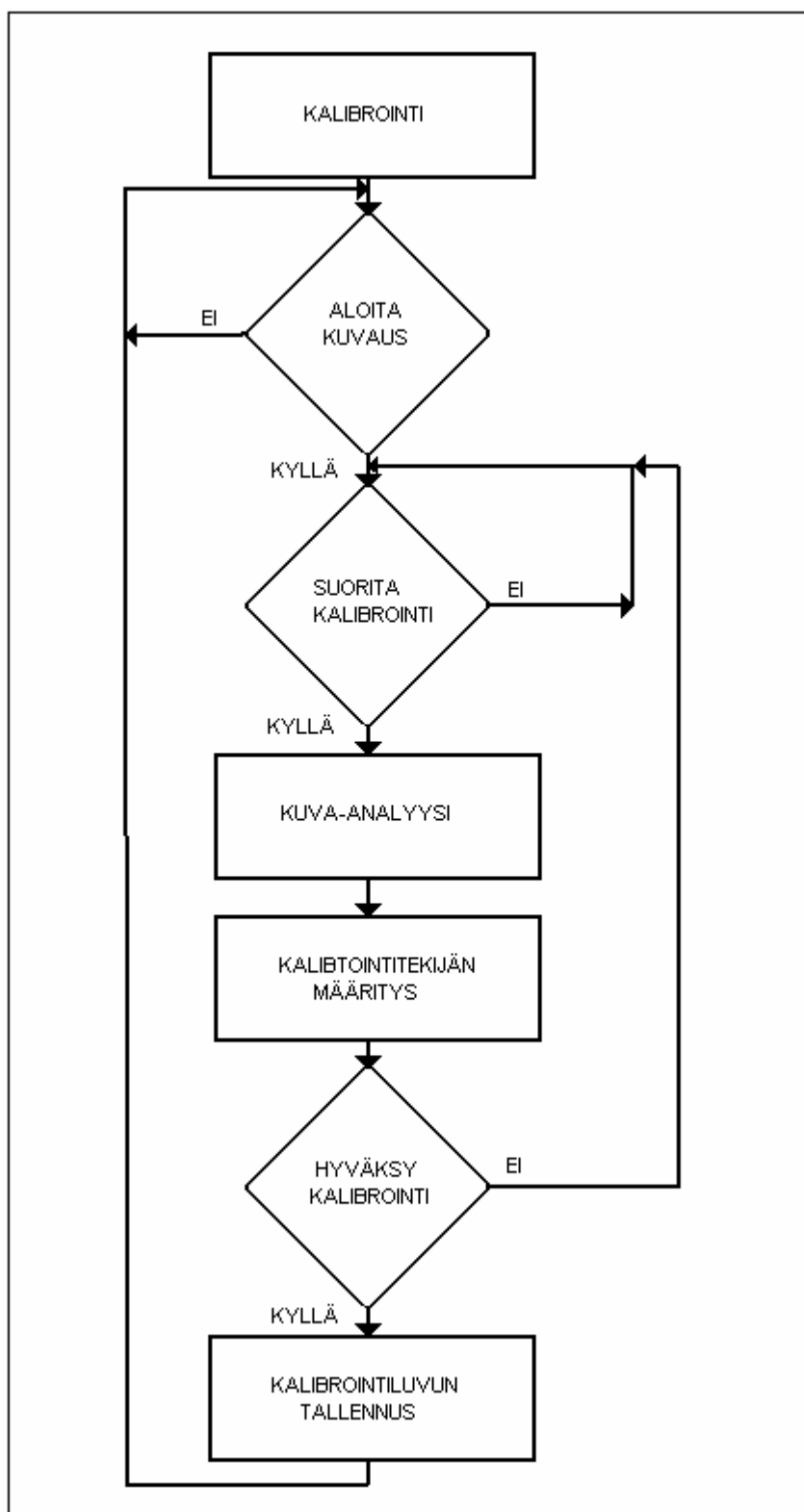
*Kuva 22. Kulman tunnistus kaarevareunaisella kappaleella*

### *7. Partikkelianalyysi*

Partikkelianalyysin avulla tapahtuu pinta-alan määrittäminen ohjelmassa. Partikkelianalyysi laskee kuvattavan kohteen pikseleiden lukumäärän. Kun pikseleiden lukumäärä kerrotaan kalibroinnissa saadulla kalibroitivakiolla, saadaan tuloksena mitattavan kappaleen pinta-ala.

## Kalibrointi

Kalibrointi aloitetaan painamalla *ALOITA KUVAUS* -painiketta, joka aloittaa jatkuvan kuvauksen. Painettaessa *SUORITA KALIBROINTI* -painiketta, ohjelma suorittaa digitaalisen kuvankäsittelyn ja kalibrointitekijän määrittelyn. Kalibrointitekijä on mahdollista tallentaa tiedostoon. Kalibrointitoiminnon vuokaavio on esitetty kuvassa 23.

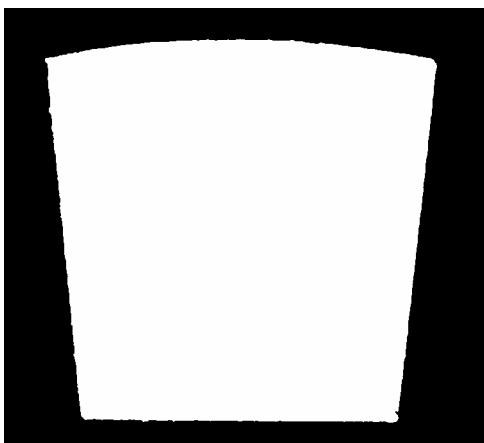


Kuva 23. Vuokaavio kalibroinnin toiminnasta ohjelmassa

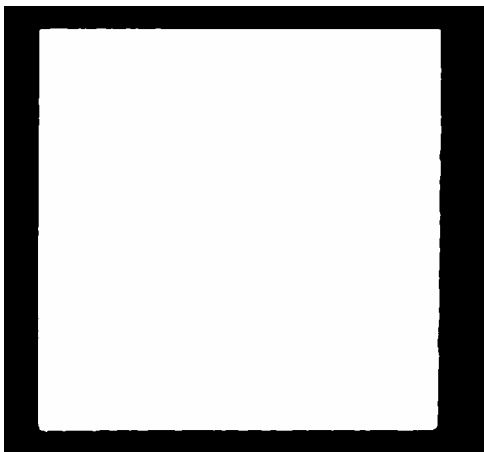
### 7.3 Konenäköjärjestelmän testaus

Konenäköjärjestelmän testauksen yhteydessä testattiin myös ohjelman toiminta. Konenäköjärjestelmä testattiin sitä varten valmistetuilla puukappaleilla. Testikappaleiden kokonaislukumäärä oli 44, ja ne mitattiin molemmista päistä, joten yhteensä testikohteita oli 88. Testikappaleiden muotoilu oli monipuolista, jotta järjestelmän toimivuus saatiin testattua mahdollisimman hyvin. Mitattavien kappaleiden dimensiot sijoittuivat 18 – 26 mm välille. Kappaleet jaettiin kahteen ryhmään, joista ensimmäisten muoto vastasi korostetusti muotoja, joita puukappale saa turvotessaan (kuva 24). Näihin kappaleisiin kuuluivat järjestysnumerot 1 – 20. Toisessa ryhmässä olivat kappaleet joiden reunat olivat suoria mutta osa oli epäsymmetrisiä (kuva 25). Näiden kappaleiden järjestysnumerot olivat 21 – 44.

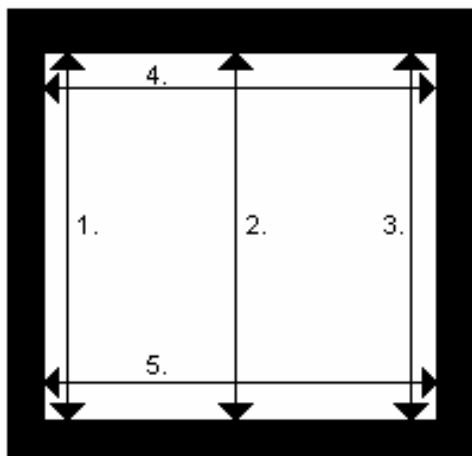
Vertailuarvot mitattiin työntömitalla kolmen mittaajan toimesta. Testikappaleista mitattiin kaikkien neljän reunan pituudet sekä lisäksi kappaleen pystyviivan pituus kappaleen keskeltä (kuva 26). Poikkiviivan pituus jätettiin mittaamatta, koska sen mittauksessa huomattiin tulevan liian suuria mittausvirheitä. Lopulliset vertailuarvot laskettiin kolmen mittaajan mittaustulosten keskiarvosta. Työntömitalla mittaamisen tulokset ovat kiinni mittaajasta, koska puu on kohtuullisen pehmeä materiaali, joka antaa helposti periksi.



*Kuva 24. Esimerkki ensimmäisen ryhmän kappaleesta*



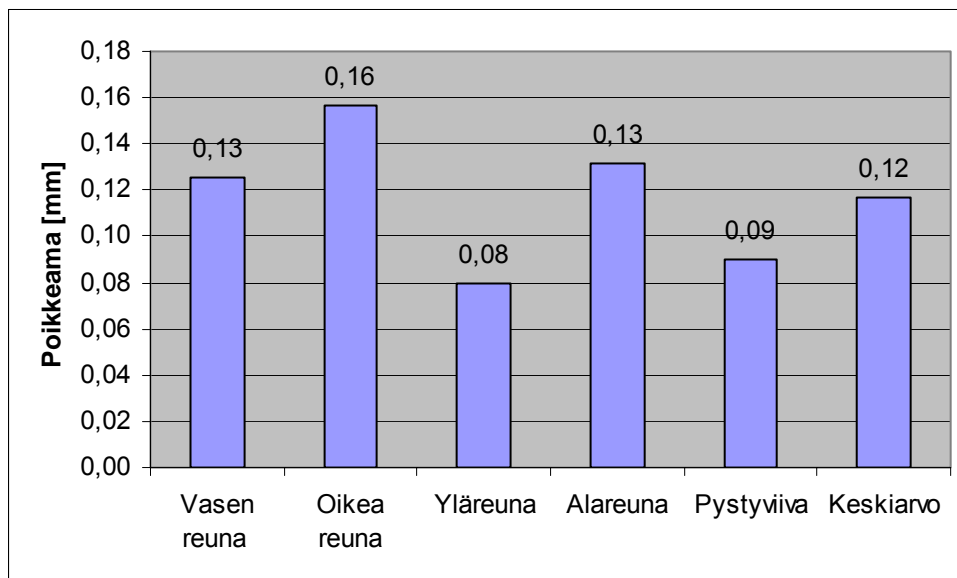
*Kuva 25. Esimerkki toisen ryhmän kappaleesta*



*Kuva 26. Testikappaleiden mittauskohdat (1. Vasen reuna, 2. Pystyviiva, 3. Oikea reuna, 4. Yläreuna, 5. Alareuna)*

## 8 TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELO

Kuvassa 27 on esitetty konenäköjärjestelmällä saatujen mittaustulosten poikkeamat työntömitalla saatuihin vertailuarvoihin. Vertailusta jouduttiin jättämään pois kappaleen pystyviivan mittausta, koska työntömitalla ei päästy tarpeeksi tarkkoihin arvoihin, jotta ne olisivat täyttäneet testauksessa vaaditun tarkkuustason. Vertailusta huomataan konenäköjärjestelmällä mitattujen arvojen poikkeavan jokaisen reunan kohdalla yli työssä vaaditun  $\pm 0,05$  mm epätarkkuuden. Keskiarvo ylittää vaaditun tason 0,07 mm. Tarkat mittaustulokset on esitetty liitteessä A.

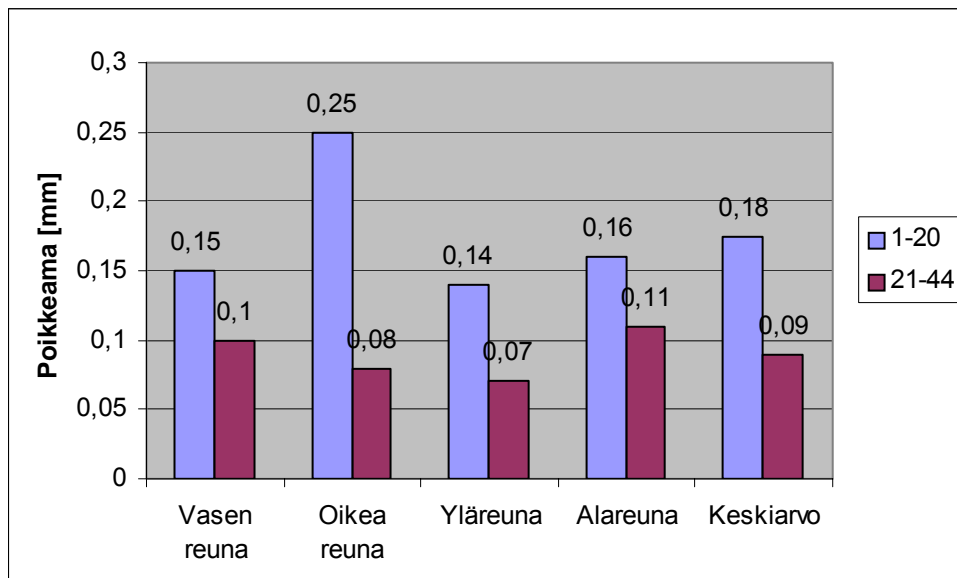


*Kuva 27. Konenäköjärjestelmällä saatujen mittausten vertailu työntömitalla saatuihin vertailuarvoihin*

Tarkempi mittaustulosten tarkastelu osoittaa, että kahteen ryhmään jaettujen mittakappaleiden välillä tuli suuria eroja mittausvirheiden suuruuksissa. Suurimmat poikkeamat tulivat mitattaessa kappaleita, joiden ylä- ja alareunat olivat muodoiltaan kaarevat. Nämä kappaleet edustivat mittauksissa ensimmäistä ryhmää eli mittakappaleita joiden järjestysnumerot olivat 1 – 20. Tämän ryhmän kappaleiden muotoilulla pyrittiin testaamaan puun turpoamisen aiheuttama vaikutus mittaustuloksiin.



Kuvassa 28 on esitetty molempien ryhmien poikkeavuudet työntömitalla saatuihin vertailuarvoihin.



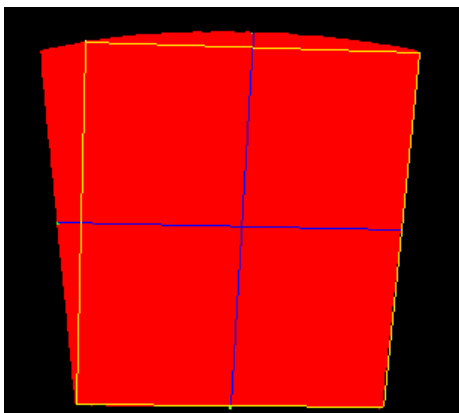
Kuva 28. Kahden ryhmän vertailu mittausrvirheiden suuruudessa

Kuvasta 28 huomataan, kuinka ensimmäisen ryhmän kappaleiden suuret poikkeavuudet mittaustuloksissa lisäävät koko testimittauksessa saatujen mittaustuloksien epätarkkuutta. Toisen ryhmän suorareunaisilla kappaleilla mittaustuloksissa päästään miltei tavoiteltuun tarkkuuteen.

Mittaustulosten poikkeama selittyy mitattavien puukappaleiden ylä- ja alareunojen pyöreystä, jonka takia ohjelma ei kykene tarkkaan kulmien tunnistukseen. Mittauksia varten tehdyissä kappaleissa olleet pyöritykset olivat tarkoituksella hiukan liioiteltuja verrattuna normaaliin turvonneeseen kappaleeseen. Mittausvirheeseen vaikuttaa myös työntömitalla mitattujen vertailulukujen epätarkkuus.

Testauksessa suurin ilmennyt ongelma huomattiin muutaman testikappaleen kohdalla, joissa yläreuna oli huomattavan pyöreä. Tällöin ohjelman reunan tunnistus toimi väärin ja se löysi jommankumman ylänurkan väärin, jolloin yläreunan, poikkiviivan ja pystyviivan pituudet vääristyivät selvästi. Tämä ongelma ei kuitenkaan vaikuttanut tehtyyn testaukseen koska virheelliset mittaukset toistettiin niin kauan, kunnes kappaleesta saatiin todelliset tulokset.

Kuvassa 29 on esitetty esimerkki tapauksesta, jossa ohjelma on tunnistanut vasemman yläkulman väärin.



*Kuva 29. Esimerkki kulman tunnistuksen epäonnistumisesta*

Ongelma johtuu kappaleen yläreunan pyöreystä, jolloin ohjelman kulmantunnistus ei löydä kulmaa tarkasti huolimatta siinä olevasta vertailusta, josta on kerrottu luvussa 7.2. Ongelma hidastaa mittauksia huomattavasti, joten ongelma otetaan huomioon järjestelmän jatkokehityksessä.

## 9 YHTEENVETO

Insinööriyössä tutkittiin mahdollisuutta konenäön käyttöön puukappaleen dimensioiden, pinta-alan ja tilavuuden määrittämisessä. Järjestelmän tuli pystyä dimensioiden mittaukseen  $\pm 0,05$  mm:n epätarkkuudella. Dimensioiden mittaus tuli tapahtua kuudesta eri kohdasta eli neljästä reunasta sekä kappaleen keskikohdilta. Saadut mittaustulokset piti pystyä tallentamaan myöhempää tarkastelua varten. Järjestelmän vaatimuksiin kuului myös kalibrintoiminto.

Työ koostui kolmesta tavoitteesta, joista kaksi saatiin täytettyä. Ensimmäisenä tavoitteena oli puun dimensioiden ja pinta-alan määrittäminen joka saatiin toteutettua mutta vaadittuun mittaustarkkuuteen ei päästy. Toisessa tavoitteessa puukappaleen tilavuuden määrittäminen onnistui mutta puun pituustieto täytyi mitata työntömitalla ja syöttää ohjelmaan käsin, koska työssä ei onnistuttu toteuttamaan samassa konenäköjärjestelmässä toimivaa pituusmittausta. Kolmas tavoitteista oli puun syytiheyden määrittäminen, mutta jo työn alkuvaiheessa päädyttiin siihen, että sen suunnittelu ja toteutus jätetään järjestelmän mahdolliseen jatkokehitykseen.

Työssä tarvittaviin laitteisiin kuului digitaalinen Camera Link -liitäntäinen harmaasävykamera, pimeään kentän valaisin, telesentrinen objektiivi sekä Camera Link -kuvankaappauskortti. Järjestelmän valaistusta valittaessa otettiin huomioon järjestelmän mahdollinen jatkokehitys.

Työ toteutettiin LabVIEW-ohjelmointikielellä. Kuvankäsittelyn käytettiin apuna kuvankäsittelyn testaus- ja kehitysympäristö Vision Assistant -ohjelmaa, jossa kuvankäsittely pystyttiin kääntämään suoraan LabVIEW-ohjelmointikielelle. Työn haasteellisin osuus oli ohjelmoida kuvankäsittelyalgoritmi jonka avulla kappaleiden dimensiot saatiin määritettyä vaaditulla tarkkuudella.

Konenäkö valittiin työssä käytettäväksi, koska sen avulla puukappaleesta saadaan haluttu tieto puun turpoamisesta huolimatta. Työntömitalla mittaaminen puun ollessa turvonnut on vaikeaa ja tulokset riippuvat paljon mittaajasta, koska puu on materiaalina pehmeää. Konenäön avulla mitattaessa tätä ongelmaa ei ole. Lisäksi konenäön avulla mittaaminen on huomattavasti helpompaa ja nopeampaa.

## LÄHDELUETTELO

- 1 Levomäki, L. , Paajanen,O. Laatukamari. Teknillinen korkeakoulu. Päivitetty 14.2.2005.[WWW-dokumentti].  
<http://wood.hut.fi/opinnot/kurssit/168/pdf/laatukamari.pdf>
- 2 Kettunen, P.O. Puun rakenne ja ominaisuudet. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Tampere 2001. ISBN 952-15-0624-5
- 3 Kuikka, K. , Kunelius, K. Puutekniikka 2: Materiaalit. 1.-2. painos. Keuruu: Otava, 1992. 163 s. ISBN 951-1-11917-6
- 4 Savolainen, J. Konenäkö. Savon ammattikorkeakoulu. Päivitetty 14.2.2005. [WWW-dokumentti]  
<http://opetus.stadia.fi/savolainen/Konenako/Kuvakas7.pdf>
- 5 Romppainen, P. Konenäkö. Kajaanin ammattikorkeakoulu, 2002 Opintomoniste
- 6 Kärkkäinen, T. Valaistusgeometria. Kajaanin ammattikorkeakoulu, 2002 Opintomoniste
- 7 National Instruments. Päivitetty 14.2.2005. [WWW-dokumentti].  
<http://digital.ni.com/worldwide/bwcontent.nsf/web/all/>
- 8 Kärkkäinen, T. Vision Assistant. Kajaanin ammattikorkeakoulu, 2004. Opintomoniste
- 9 Kärkkäinen, T. Kuvanmuodostus LabVIEW:ssä. Kajaanin ammattikorkeakoulu, 2002. Opintomoniste

## LIITTEET

- Liite A/1 Konenäöllä saatujen mittaustulosten pöytäkirja
- Liite A/2 Mittaajan 1 mittauspöytäkirja
- Liite A/3 Mittaajan 2 mittauspöytäkirja
- Liite A/4 Mittaajan 3 mittauspöytäkirja

24.3.2005

Toni Huotari

Mittauspöytäkirja

Puun dimensioiden määrittys konenäöllä

Vas.= Vasen reuna, Oik.= Oikea reuna, Ylä. = Yläreuna, Ala.= Alareuna, Poikk. = Poikkiviiva  
 Pyst. = Pystyviiva

Testikappaleen nro.	Konenäkö						Testikappaleen nro.	Konenäkö					
	Vas.	Oik.	Ylä.	Ala.	Poikk.	Pyst.		Vas.	Oik.	Ylä.	Ala.	Poikk.	Pyst.
1a	22,32	21,96	23,17	18,8	21,08	23,46	23a	19,8	19,71	19,85	19,78	19,87	19,96
1b	22,08	22,01	23,64	19,02	21,43	23,32	23b	19,75	19,64	19,66	19,8	19,89	19,8
2a	22,29	22,25	23,64	19,26	21,52	23,56	24a	19,59	19,64	18,98	18,93	19,8	18,96
2b	22,43	22,01	23,44	19,03	21,4	23,35	24b	19,78	19,75	18,96	18,84	19,96	18,98
3a	22,15	21,52	23,8	19,43	21,64	23,39	25a	19,82	19,82	18,91	18,89	19,87	19,01
3b	21,78	21,68	23,67	19,34	21,52	23,11	25b	19,78	19,75	18,96	18,31	19,94	18,98
4a	23,16	22,74	23,25	19,32	21,5	23,51	26a	19,66	19,71	18,89	18,91	19,85	19,03
4b	23,09	23,3	23,66	19,83	21,82	23,86	26b	19,89	19,71	18,89	18,96	19,94	18,94
5a	22,41	22,57	23,74	19,98	21,92	23,3	27a	20,71	20,71	20,76	20,83	20,83	20,88
5b	22,2	22,08	23,55	19,81	21,71	23,09	27b	20,62	20,6	20,83	20,55	20,81	20,85
6a	21,64	21,52	23,4	19,82	21,66	22,41	28a	20,78	20,69	20,85	20,83	20,88	20,85
6b	21,82	21,52	23,29	19,75	21,66	22,36	28b	20,69	20,81	20,85	20,81	20,92	20,9
7a	22,57	22,41	23,74	20,08	21,94	22,88	29a	19,78	19,75	19,94	19,85	19,92	19,94
7b	22,36	22,27	23,84	20,17	22,04	22,99	29b	19,78	19,82	20,04	19,85	19,87	19,92
8a	23,02	22,92	23,76	20,09	22,11	23,56	30a	20,6	20,57	20,69	20,71	20,78	20,85
8b	23,02	23,2	23,86	20,19	22,18	23,84	30b	20,81	20,78	20,77	20,75	20,9	20,88
9a	23,09	22,95	23,81	19,9	21,87	23,67	31a	20,67	20,76	20,83	20,81	20,92	20,85
9b	22,92	23,13	23,67	19,72	21,75	23,63	31b	20,71	20,69	20,78	20,67	20,92	20,85
10a	21,15	21,33	23,69	20,19	21,94	21,94	32a	20,69	20,64	20,83	20,78	20,92	20,83
10b	20,75	20,65	23,41	19,95	21,68	21,43	32b	20,76	20,85	20,86	20,79	20,95	20,88
11a	21,59	22,2	25,08	21,99	23,65	22,69	33a	20,57	20,69	20,67	20,88	20,76	20,78
11b	22,15	21,64	24,8	21,9	23,39	22,88	33b	20,6	20,78	20,83	20,41	20,92	20,85
12a	22,32	22,32	25,33	22,37	24,05	22,92	34a	20,71	20,76	20,82	20,76	20,88	20,88
12b	22,13	21,73	25,18	22,23	23,86	22,67	34b	20,74	20,78	20,81	20,48	20,9	20,92
13a	22,18	22,11	25,21	22,31	23,91	22,85	35a	19,78	19,78	19,83	19,8	19,92	19,92
13b	22,32	22,18	25,28	22,29	23,86	22,88	35b	19,78	19,89	19,97	19,82	19,92	19,94
14a	22,36	21,96	25,15	22,29	23,79	23,09	36a	20,71	20,71	20,87	20,75	20,81	21,02
14b	21,96	22,34	25,08	22,11	23,67	22,9	36b	20,6	20,71	20,88	20,72	20,78	20,9
15a	22,81	23,11	23,01	19,02	21,01	23,7	37a	21,7	21,7	21,93	21,79	21,91	21,91
15b	22,71	22,69	23,44	19,56	21,52	23,42	37b	21,58	21,63	21,79	21,91	21,74	21,86
16a	24,65	24,84	25,38	23,12	24,35	25,36	38a	21,67	21,46	21,89	21,72	21,77	21,95
16b	24,56	24,44	24,96	22,63	23,88	25,01	38b	21,72	21,74	21,86	21,93	21,84	21,93
17a	24,54	24,51	25,16	22,79	24,05	25,08	39a	21,74	21,7	21,86	21,84	21,93	21,93
17b	24,14	24,37	25,03	22,68	23,95	24,77	39b	21,7	21,7	21,79	21,53	21,77	21,91
18a	24,26	24,65	25,29	23,17	24,42	25,15	40a	21,35	21,51	21,74	21,74	21,6	21,86
18b	24,7	24,4	25,19	22,91	24,23	25,08	40b	21,58	21,7	21,84	21,74	21,81	21,86
19a	24,73	24,65	25,11	22,75	23,95	25,01	41a	22,84	22,8	23,03	22,7	22,98	23,01
19b	24,58	24,96	25,12	22,74	24,05	25,19	41b	22,84	22,96	23,03	22,3	23,01	23,01
20a	22,22	21,54	23,64	19,3	21,5	23,39	42a	22,82	22,91	23,05	22,68	23,03	22,96
20b	21,05	21,87	23,75	19,23	21,5	22,99	42b	22,89	22,77	22,94	22,77	22,96	22,96
21a	19,73	19,68	19,9	19,78	19,87	19,87	43a	22,77	22,82	22,96	22,8	22,98	22,94
21b	19,73	19,78	19,64	19,8	19,89	19,96	43b	22,68	22,94	23,04	22,15	23,08	23,01
22a	19,8	19,68	18,86	18,89	19,85	18,91	44a	22,7	22,82	22,8	22,7	22,96	22,91
22b	19,66	19,78	18,94	18,91	19,89	18,96	44b	22,77	22,82	22,91	22,75	23,05	22,94

24.3.2005

Mittauspöytäkirja

Puun dimensioiden määrittäminen konenäöllä

Toni Huotari

Vas.= Vasen reuna, Oik.= Oikea reuna, Ylä. = Yläreuna, Ala.= Alareuna, Pyst. = Pystyviiva

Testikappaleen nro.	Mittaja 1					Testikappaleen nro.	Mittaja 1			
	Vas.	Oik.	Ylä.	Ala.	Pyst.		Vas.	Oik.	Ylä.	Ala.
1a	22,48	22,6	23,7	19,8	23,2	23a	19,83	19,8	19,9	19,9
1b	22,6	22,6	23,5	19,7	23,2	23b	19,88	19,9	19,8	19,8
2a	22,75	22,9	23,7	19,9	23,5	24a	19,74	19,8	19	19
2b	22,75	22,8	23,5	19,7	23,3	24b	19,87	19,9	19	18,9
3a	22,66	22,2	23,7	19,9	23,3	25a	19,86	19,8	19	18,9
3b	22,38	22,3	23,6	19,6	23,1	25b	19,89	19,9	19	18,9
4a	23,34	23,3	23,4	19,9	23,5	26a	19,81	19,9	19	19
4b	23,43	23,6	23,6	20,2	23,7	26b	19,86	19,8	19	19
5a	22,62	22,8	23,7	20,2	23,2	27a	20,78	20,8	20,8	20,9
5b	22,41	22,4	23,5	20,1	23	27b	20,87	20,8	20,9	20,8
6a	21,91	22	23,3	20	22,4	28a	20,86	20,9	20,8	20,8
6b	22,09	21,8	23,4	20	22,3	28b	20,85	20,8	20,9	20,9
7a	22,64	22,5	23,6	20,3	22,8	29a	19,93	19,9	19,9	19,9
7b	22,5	22,5	23,7	20,3	22,9	29b	19,85	19,9	20	19,9
8a	23,13	23,2	23,7	20,4	23,5	30a	20,73	20,7	20,9	20,9
8b	23,24	23,4	23,8	20,4	23,7	30b	20,88	20,9	20,9	20,8
9a	23,25	23,1	23,6	20,2	23,6	31a	20,89	20,9	20,8	20,8
9b	23,18	23,3	23,5	19,9	23,6	31b	20,87	20,9	20,8	20,8
10a	21,16	21,5	23,5	20,4	21,9	32a	20,83	20,8	20,8	20,8
10b	20,96	20,9	23,3	20,3	21,4	32b	20,85	20,9	20,8	20,8
11a	21,92	22,4	24,9	22,3	22,7	33a	20,73	20,7	20,7	20,8
11b	22,27	22	24,7	22	22,8	33b	20,82	20,8	20,8	20,8
12a	22,35	22,5	25,3	22,6	22,8	34a	20,9	20,9	20,9	20,9
12b	22,31	22,1	25,1	22,4	22,7	34b	20,78	20,9	20,8	20,8
13a	22,24	22,3	25,2	22,4	22,8	35a	19,88	19,9	19,9	19,8
13b	22,42	22,3	25,1	22,5	22,8	35b	19,87	19,9	19,9	19,9
14a	22,49	22,4	25	22,4	23	36a	20,84	20,9	20,8	20,9
14b	22,18	22,5	25	22,4	22,8	36b	20,83	20,8	20,9	20,9
15a	23	23,3	22,9	19,3	23,6	37a	21,81	21,8	21,9	21,9
15b	22,88	22,9	23,2	19,8	23,3	37b	21,7	21,7	21,8	21,8
16a	24,68	25	25,2	23,2	25,2	38a	21,72	21,7	21,8	21,8
16b	24,64	24,4	24,9	22,8	24,9	38b	21,78	21,8	21,8	21,9
17a	24,64	24,6	25	23	25	39a	21,81	21,8	21,8	21,9
17b	24,19	24,5	25	22,9	24,7	39b	21,76	21,7	21,8	21,8
18a	24,49	24,8	25,2	23,3	25,1	40a	21,73	21,7	21,8	21,8
18b	24,69	24,6	25,1	23,1	25	40b	21,7	21,7	21,8	21,8
19a	24,81	24,7	25	23	24,9	41a	22,94	22,9	23	22,8
19b	24,64	25	25	23	25	41b	22,95	23	22,9	22,8
20a	22,48	21,9	23,5	19,6	23,4	42a	22,9	22,9	23	22,8
20b	21,6	22,1	23,5	19,6	22,9	42b	22,91	22,9	22,9	22,8
21a	19,82	19,9	19,9	19,8		43a	22,89	22,9	22,9	22,8
21b	19,92	19,9	20	19,9		43b	22,97	23	22,9	23
22a	19,92	19,8	18,9	18,9		44a	22,92	22,9	22,8	22,8
22b	19,8	19,9	19	19		44b	22,86	22,9	22,9	22,8



24.3.2005

Toni Huotari

Mittauspöytäkirja

Puun dimensioiden määrittys konenäöllä

Vas.= Vasen reuna, Oik.= Oikea reuna, Ylä. = Yläreuna, Ala.= Alareuna, Pyst. = Pystyviiva

Testikappaleen nro.	Mittaja 2					Testikappaleen nro.	Mittaja 2			
	Vas.	Oik.	Ylä.	Ala.	Pyst.		Vas.	Oik.	Ylä.	Ala.
1a	22,55	22,13	23,21	18,96	23,55	23a	19,78	19,79	19,82	19,88
1b	22,02	22,38	23,58	19,36	23,23	23b	19,82	19,79	19,74	19,77
2a	22,34	22,7	23,63	19,42	23,45	24a	19,69	19,7	18,92	18,96
2b	22,53	22,25	23,53	19,3	23,33	24b	19,81	19,82	18,95	18,86
3a	22,34	21,99	23,72	19,7	23,42	25a	19,8	19,78	18,91	18,96
3b	21,95	21,94	23,55	19,52	22,99	25b	19,85	19,84	19,03	18,88
4a	23,26	23,23	23,22	19,68	23,44	26a	19,74	19,8	18,97	18,94
4b	23,25	23,28	23,56	19,99	23,76	26b	19,81	19,74	18,94	18,92
5a	22,46	22,72	23,56	20,05	23,24	27a	20,8	20,77	20,74	20,89
5b	22,36	22,38	23,42	19,9	22,93	27b	20,8	20,82	20,86	20,8
6a	21,84	21,89	23,3	19,99	22,35	28a	20,85	20,82	20,78	20,76
6b	22,01	21,73	23,22	19,97	22,28	28b	20,83	20,79	20,83	20,8
7a	22,52	22,47	23,58	20,22	22,82	29a	19,87	19,86	19,88	19,83
7b	22,47	22,9	23,68	20,17	22,92	29b	19,84	19,84	19,94	19,84
8a	23,03	23,1	23,67	20,28	23,46	30a	20,77	20,78	20,84	20,83
8b	23,15	23,36	23,74	20,22	23,73	30b	20,83	20,82	20,8	20,78
9a	23,2	23,1	23,67	20,05	23,61	31a	20,81	20,83	20,79	20,78
9b	23,1	23,18	23,5	19,8	23,56	31b	20,82	20,82	20,78	20,78
10a	21,23	21,53	23,52	20,13	21,95	32a	20,81	20,77	20,75	20,78
10b	20,89	20,83	23,22	19,99	21,34	32b	20,81	20,84	20,77	20,77
11a	21,93	22,23	24,89	22,13	22,71	33a	20,69	20,68	20,73	20,84
11b	22,18	21,91	24,66	21,85	22,81	33b	20,79	20,81	20,77	20,79
12a	22,34	22,49	25,19	22,42	22,79	34a	20,82	20,87	20,86	20,82
12b	22,21	22,07	25,04	22,21	22,66	34b	20,94	20,9	20,92	20,71
13a	22,14	22,22	25,1	22,35	22,82	35a	19,85	19,88	19,88	19,77
13b	22,46	22,33	25,07	22,35	22,82	35b	19,83	19,86	19,96	19,82
14a	22,32	22,37	25,01	22,31	22,97	36a	20,81	20,86	20,89	20,85
14b	22,03	22,46	24,96	22,09	22,76	36b	20,79	20,74	20,93	20,77
15a	22,94	23,29	22,86	19,01	23,63	37a	21,78	21,78	21,79	21,83
15b	22,84	22,84	23,28	19,58	23,27	37b	21,69	21,69	21,74	21,74
16a	24,78	24,93	25,18	23,01	25,23	38a	21,72	21,71	21,76	21,77
16b	24,66	24,42	24,82	22,68	24,86	38b	21,71	21,74	21,75	21,81
17a	24,65	24,62	25,02	22,87	24,96	39a	21,76	21,79	21,78	21,81
17b	24,21	24,45	24,91	22,71	24,67	39b	21,72	21,66	21,79	21,75
18a	24,51	24,79	25,21	23,18	25,05	40a	21,69	21,72	21,77	21,75
18b	24,67	24,63	25,08	23,3	24,98	40b	21,69	21,68	21,75	21,76
19a	24,82	24,65	24,94	22,79	24,92	41a	22,95	22,89	22,95	22,74
19b	24,5	24,96	24,97	22,77	25,05	41b	22,97	23,01	22,95	22,82
20a	22,34	21,66	23,6	19,37	23,29	42a	22,92	22,95	22,94	22,73
20b	21,5	22,04	23,52	19,32	22,9	42b	22,9	22,85	22,82	22,75
21a	19,78	19,85	19,88	19,77		43a	22,93	22,86	22,89	22,79
21b	19,87	19,88	19,93	19,86		43b	22,97	22,94	22,93	22,86
22a	19,8	19,75	18,9	18,91		44a	22,92	22,82	22,79	22,76
22b	19,73	19,76	18,91	18,91		44b	22,83	22,88	22,88	22,78

24.3.2005

Toni Huotari

Mittauspöytäkirja

Puun dimensioiden määrittäminen konenäöllä

Vas.= Vasen reuna, Oik.= Oikea reuna, Ylä. = Yläreuna, Ala.= Alareuna, Pyst. = Pystyviiva

Testikappaleen nro.	Mittaja 3					Testikappaleen nro.	Mittaja 3				
	Vas.	Oik.	Ylä.	Ala.	Pyst.		Vas.	Oik.	Ylä.	Ala.	
1a	22,55	22,13	23,21	18,96	23,55	23a	19,78	19,79	19,74	19,88	
1b	22,02	22,38	23,58	19,36	23,23	23b	19,82	19,79	18,92	19,77	
2a	22,34	22,7	23,63	19,42	23,45	24a	19,69	19,7	18,95	18,96	
2b	22,53	22,25	23,53	19,3	23,33	24b	19,81	19,82	18,91	18,86	
3a	22,34	21,99	23,72	19,7	23,42	25a	19,8	19,78	19,03	18,96	
3b	21,95	21,94	23,55	19,52	22,99	25b	19,85	19,84	18,97	18,88	
4a	23,26	23,23	23,22	19,68	23,44	26a	19,74	19,8	18,94	18,94	
4b	23,25	23,28	23,56	19,99	23,76	26b	19,81	19,74	20,74	18,92	
5a	22,46	22,72	23,56	20,05	23,24	27a	20,8	20,77	20,86	20,89	
5b	22,36	22,38	23,42	19,9	22,93	27b	20,8	20,82	20,78	20,8	
6a	21,84	21,89	23,3	19,99	22,35	28a	20,85	20,82	20,83	20,76	
6b	22,01	21,73	23,22	19,97	22,28	28b	20,83	20,79	19,88	20,8	
7a	22,52	22,47	23,58	20,22	22,82	29a	19,87	19,86	19,94	19,83	
7b	22,47	22,9	23,68	20,17	22,92	29b	19,84	19,84	20,84	19,84	
8a	23,03	23,1	23,67	20,28	23,46	30a	20,77	20,78	20,8	20,83	
8b	23,15	23,36	23,74	20,22	23,73	30b	20,83	20,82	20,79	20,78	
9a	23,2	23,1	23,67	20,05	23,61	31a	20,81	20,83	20,78	20,78	
9b	23,1	23,18	23,5	19,8	23,56	31b	20,82	20,82	20,75	20,78	
10a	21,23	21,53	23,52	20,13	21,95	32a	20,81	20,77	20,77	20,78	
10b	20,89	20,83	23,22	19,99	21,34	32b	20,81	20,84	20,73	20,77	
11a	21,93	22,23	24,89	22,13	22,71	33a	20,69	20,68	20,77	20,84	
11b	22,18	21,91	24,66	21,85	22,81	33b	20,79	20,81	20,86	20,79	
12a	22,34	22,49	25,19	22,42	22,79	34a	20,82	20,87	20,92	20,82	
12b	22,21	22,07	25,04	22,21	22,66	34b	20,94	20,9	19,88	20,71	
13a	22,14	22,22	25,1	22,35	22,82	35a	19,85	19,88	19,96	19,77	
13b	22,46	22,33	25,07	22,35	22,82	35b	19,83	19,86	20,89	19,82	
14a	22,32	22,37	25,01	22,31	22,97	36a	20,81	20,86	20,93	20,85	
14b	22,03	22,46	24,96	22,09	22,76	36b	20,79	20,74	21,79	20,77	
15a	22,94	23,29	22,86	19,01	23,63	37a	21,78	21,78	21,74	21,83	
15b	22,84	22,84	23,28	19,58	23,27	37b	21,69	21,69	21,76	21,74	
16a	24,78	24,93	25,18	23,01	25,23	38a	21,72	21,71	21,75	21,77	
16b	24,66	24,42	24,82	22,68	24,86	38b	21,71	21,74	21,78	21,81	
17a	24,65	24,62	25,02	22,87	24,96	39a	21,76	21,79	21,79	21,81	
17b	24,21	24,45	24,91	22,71	24,67	39b	21,72	21,66	21,77	21,75	
18a	24,51	24,79	25,21	23,18	25,05	40a	21,69	21,72	21,75	21,75	
18b	24,67	24,63	25,08	23,3	24,98	40b	21,69	21,68	22,95	21,76	
19a	24,82	24,65	24,94	22,79	24,92	41a	22,95	22,89	22,95	22,74	
19b	24,5	24,96	24,97	22,77	25,05	41b	22,97	23,01	22,94	22,82	
20a	22,34	21,66	23,6	19,37	23,29	42a	22,92	22,95	22,82	22,73	
20b	21,5	22,04	23,52	19,32	22,9	42b	22,9	22,85	22,89	22,75	
21a	19,78	19,85	19,88	19,77		43a	22,93	22,86	22,93	22,79	
21b	19,87	19,88	19,93	19,86		43b	22,97	22,94	22,79	22,86	
22a	19,8	19,75	18,9	18,91		44a	22,92	22,82	22,88	22,76	
22b	19,73	19,76	18,91	18,91		44b	22,83	22,88	22,89	22,78	