



# Automatisering van de diktemeting bij de teelt van laanbomen

Verslag laboratoriumexperimenten

Jochen Hemming & Jan Bontsema

© 2007 Wageningen, Wageningen UR Glastuinbouw

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Wageningen UR Glastuinbouw

Dit project is gefinancierd door Productschap Tuinbouw

## **Wageningen UR Glastuinbouw**

Adres : Bornsesteeg 65, 6708 PD Wageningen  
: Postbus 16, 6700 AA Wageningen  
Tel. : 0317 - 47 70 01  
Fax : 0317 - 41 80 94  
E-mail : [glastuinbouw@wur.nl](mailto:glastuinbouw@wur.nl)  
Internet : [www.glastuinbouw.wur.nl](http://www.glastuinbouw.wur.nl)

# Inhoudsopgave

	pagina
1. Inleiding	1
2. Inventarisatie meetmethoden	3
2.1 Contactmetingen	3
2.1.1 Continu meten	3
2.1.2 Tweepuntsmeting	5
2.1.3 Driepuntsmeting	5
2.2 Contactloze metingen	6
2.2.1 Geluid gebaseerde systemen	6
2.2.2 Infrarood licht	6
2.2.3 Zichtbaar licht	6
2.2.4 Röntgen	8
2.2.5 MRI (Magnetic Resonance Imaging)	8
3. Laboratoriumtesten	9
3.1 Materiaal	9
3.1.1 Laser meet systeem LMS400	9
3.1.2 Beeldanalyse systeem	10
3.1.3 Camera met laser triangulatie	11
3.1.4 Camera met infrarood afstandsensor	12
3.1.5 Camera met ultrasone afstandsensor	12
3.2 Methoden	13
3.2.1 Berekenen van de diameter uit een 2d afbeelding van het object	13
3.3 Resultaten	16
3.3.1 LMS Laser meet systeem	16
3.3.2 Beeldanalyse systeem	17
4. Conclusies en Aanbevelingen	21



# 1. Inleiding

De sortering van laanbomen wordt bepaald door de omtrek van de stam op 1 meter boven de grond. Deze omtrek wordt jaarlijks met de hand gemeten en de boom wordt gemerkt en geteld, zodat de teler weet welke voorraad hij van elke sortering heeft. De meting, het merken en de eventuele verwerking van de meetresultaten is arbeidsintensief en kan geautomatiseerd worden. Door het te automatiseren kan de betrouwbaarheid verbeterd worden (standaardisatie, kwaliteitsverbetering). Automatisering van de diktemeting gekoppeld aan identificatie van de boom is het startpunt voor verwerking van de meetresultaten naar voorraadbeheerssystemen. Op basis hiervan kan de afzet worden vorm gegeven en evaluatie van de teelt plaatsvinden.

De doelstelling van het project is om een getest en werkend prototype op te leveren van een geautomatiseerd systeem voor de diktebepaling van laanbomen. Het integreren en implementeren van een dergelijk prototype in het totale systeem (meten, merken, voorraadbeheerssysteem, identificatie, softwaresystemen, etc.) wordt wel beschreven in het project, maar niet uitgevoerd.

De huidige werkwijze bij het diktemeten van laanbomen is als volgt: gemeten wordt de omtrek van de boom met een meetlint op 1 m stamhoogte. Vervolgens wordt de boom gemerkt en geteld. Bij het merken wordt meestal gebruikt gemaakt van gekleurd lint dat achteraf van alle kanten zichtbaar is. De bomen worden in klassen van 2 cm breedte ingedeeld (bijv. 6-8, 8-10, 10-12, 12-14) of bij grotere bomen in klassen van 5 cm (20-25, 25-30). Ook wordt een boom vaak gelijktijdig met de diktemeting gekeurd. Afgekeurde bomen worden met een speciaal lint gemerkt. Het proces loopt vaak zo dat 1 persoon de dikte meet terwijl een tweede persoon de lintjes aanbrengt. Tellen wordt vaak op een ander tijdstip uitgevoerd. Er staan altijd tonkin stokken bij de bomen. De stok staat aan de kant van de boom waar hij het gemakkelijkste is aan te binden.

Aspecten/bepalingen waarmee rekening gehouden moet worden om een foutieve meting te voorkomen:

- Stamknobbel op 1 meter hoogte (iets er boven/onder meten).
- Tonkinstokken tijdens de meting buiten beschouwing laten.
- Schatten nagroei rest van het groeiseizoen evt. noodzakelijk.
- Zeer veel verschillende bastsoorten, evt. loshangend bast.
- Beveerde bomen (dus laaghangende takken): meten levert snel storingen op.

De begeleidingscommissie van dit project stelt, dat bij de meting een nauwkeurigheid van 0,1 cm in omtrek van de boom gewenst is.

Dit document is onderdeel van de eerste fase van het project en geeft een overzicht van beschikbare meettechnieken en meetmethoden (contactloos en met contact) en bevat een verslag van enkele kleine laboratoriumexperimenten met enkele veelbelovende methoden en instrumenten. Tevens worden conclusies en aanbevelingen op basis van de gehaalde resultaten gegeven.



## 2. Inventarisatie meetmethoden

### 2.1 Contactmetingen

#### 2.1.1 Continu meten

##### Meetlint

Het meetlint is tot nu toe het meest gebruikte principe bij het diktemeten van laanbomen.



*Figuur 2-1. Gebruik van een meetlint voor het meten van de boomdikte.*

##### Meegroeilint

Een zeer simpel systeem voor gelijktijdig meten en merken is het zgn. Meegroeilint. Dit lint geeft met een kleurcode de verschillende maten weer. Het lint wordt steek om de boom getrokken en wijst zo grof de omtrek van de boom aan.



*Figuur 2-2. Meegroeilint.*

##### Epicom

De Epicom meet de werkelijke omtrek van de boom door middel van twee haken waaraan een lint is bevestigd, dat zich om de stam van de boom laat vormen. De Epicom is voorzien van een speciaal mechanisme, zodat met het apparaat bomen gemeten kunnen worden waarlangs een tonkinstok is bevestigd. De meetgegevens worden per categorie opgeslagen in het elektronische geheugen.



*Figuur 2-3. Gebruik van de Epicom voor het meten van de boomdikte.*

### **DR 22 Dendrometer**

Het Tsjechische bedrijf EMS Brno (<http://www.emsbrno.cz>) biedt een sensor aan die continue de omtrek van een boom meet. Het meetprincipe is een metalen band, dat om de boom gelegd wordt waarvan het uiteinde is gekoppeld aan een roterende potentiometer. Door de groei van de boom wordt het band uit elkaar getrokken, deze beweging wordt door de potentiometer gemeten en kan via met een datalogger worden bewaard. De minimale stam doorsnee voor dit systeem wordt met 8 cm aangegeven. Het systeem is bedoeld voor een permanente fixatie aan een boom.



*Figuur 2-4. De DR 22 Dendrometer (bron: <http://www.emsbrno.cz>).*



## 2.1.2 Tweepuntsmeting

### Schuifmaat

De schuifmaat meet de diameter van de boom door de afstand tussen twee punten te meten.



*Figuur 2-4. Gebruik van een schuifmaat voor het meten van de boomdikte.*

## 2.1.3 Driepuntsmeting

### Perimeter

De perimeter is een apparaat voor het meten van de omtrek van bomen. Ook als er een tonkinstok langs de boom staat is hiermee een meting uit te voeren. Het meetprincipe is een 3 puntsmeting. Het is een volledig mechanische tang met een meetbereik van 6 tot 30 cm in boomomtrek die met één hand kan worden bediend. De wijzer op de tang duidt de maat van de boom aan door middel van cijfers en een kleur.



*Figuur 2-5. Driepuntsmeting met de 'Perimeter'.*

## 2.2 Contactloze metingen

Een boomstam is een driedimensionaal object. Om contactloos de dikte van een dergelijk object te kunnen meten is een eendimensionale puntmeting (bijv. één afstandmeting met een afstandsensor) niet voldoende. Door een 1d metende sensor tijdens de meting met gedefinieerde snelheid langs het object te bewegen (of het object langs de sensor) is het mogelijk in twee dimensies data over het object te verzamelen. Omdat een haakse projectie van een rond object de diameter van het object toont is uit deze data de omtrek van het ronde object te berekenen. Een tweedimensionale meting houdt echter nog weinig rekening met de in de inleiding genoemde aspecten en beperkingen om foutieve metingen te voorkomen zoals mogelijke stamknobbels op 1 meter hoogte, tonkinstokken, etc. De detectie hiervan zal of additioneel met een tweede sensor(systeem) moeten gebeuren of moet direct met een 3d systeem worden verzameld. Het is bijv. denkbaar een 2d laser scanner langs het object te bewegen of een camerasysteem te gebruiken, dat 2d opnames van het object maakt gekoppeld aan een afstandsmeter.

Bij het contactloos meten van de boomdikte zijn verschillende fysische meetprincipes denkbaar die in de volgende hoofdstukken kort worden toegelicht.

### 2.2.1 Geluid gebaseerde systemen

#### Ultrasone gebaseerde systemen

Ultrasoon sensoren meten de afstand tot een object (puntmeting) of herkennen een object door het zenden en ontvangen van geluidspulsen. Ultrasone gebaseerde afstandmeters worden veel in de praktijk toegepast. Om de afmetingen van een object (bijv. de dikte) alleen met dit type sensor te bepalen is zoals boven beschreven een puntmeting niet voldoende maar moet de continue metende sensor met bekende snelheid langs het object worden bewogen. Uit de zo verzamelde data kan een uitspraak over de objectafmetingen worden gedaan.

### 2.2.2 Infrarood licht

Ook infrarood gebaseerde (afstand)meters bestaan uit een zender en een ontvanger. De zender zendt infrarood licht uit en de ontvanger meet de reflectie hiervan. Er worden PSDs (Position Sensitive Detectors) gebruikt om te plaats van het gereflecteerde licht te meten. Uit de positie van het teruggekaatste licht op de sensor zijn de hoeken die de lichtstraal heeft gevolgd, en vervolgens de afstanden te berekenen. Er zijn ook systemen waarbij de ontvanger rond draait op een stappenmotor. Ook bij dit type sensor is een puntmeting niet voldoende om de afmetingen van een object te bepalen, maar moet de continue metende sensor langs het object worden bewogen.

### 2.2.3 Zichtbaar licht

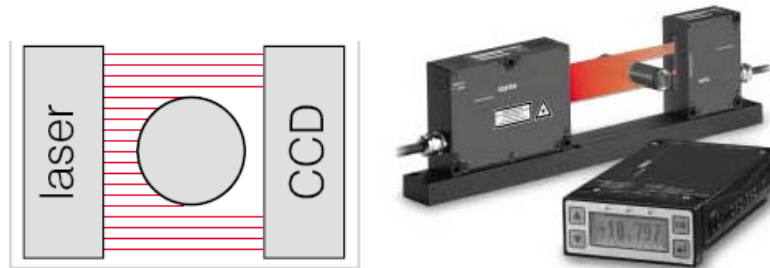
#### Laser gebaseerde systemen

##### Puntmeting

Net als met ultrasone sensoren kunnen met een laser d.m.v. het looptijd meetprincipe afstanden worden gemeten. Het apparaat meet het tijdsverschil tussen verzonden en ontvangen licht. Dit kan worden omgerekend in een afstand. Een tweede soort systemen werkt (zoals de infrarood afstandsensoren) volgens het principe van triangulatiemeting. Om de afmetingen van een object met dit type sensoren te bepalen is ook hier een puntmeting niet voldoende maar moet de continue metende sensor langs het object worden bewogen.

## Vlaktemeting

Er zijn verschillende meetsystemen op de markt waarbij het te meten object tussen een geprojecteerde lichtvlakte en een ontvanger wordt geplaatst. Een voorbeeld is het optoCONTROL laser meetsysteem voor diameters <http://www.micro-epsilon.de/> (Figuur 2-6). Het meetprincipe berust op het meten van de schaduw die het object maakt bij het plaatsen tussen sensor en ontvanger (CCD camera).



Figuur 2-6. OptoCONTROL laser meetsysteem (<http://www.micro-epsilon.de/>).

Nadeel van dit soort systemen is, dat een ontvanger achter het te meten object moet worden geplaatst. Voor toepassing in de boomteelt lijkt dit minder geschikt.

Er worden ook 2d laser scan systemen aangeboden, bijv. de LMS400 van de firma Sick. Ook deze systemen werken met het lichtlooptijd meetprincipe. Een roterende spiegel projecteert een lichtvlakte op het object en tast continue een 2 dimensionaal gebied af.

Laser metingen zijn onafhankelijk van de kleur van de achtergrond en kunnen zeer snel worden uitgevoerd. Bij metingen die gebruik maken van lasers met een hoger vermogen dient rekening te worden gehouden met veiligheidsaspecten. Speciale beschermbrillen en/of afgeschermdde apparatuur is dan verplicht.

## Camera gebaseerde systemen

Door gebruik van een camera met beeldanalyse systeem is het mogelijk een tweedimensionaal beeld van het te meten object op te nemen (dit kan in het zichtbare golflengtegebied maar ook in het (nabij)infrarood of ultraviolet). Dit heeft een aantal voordelen: Bij de analyse van het beeld is veel meer informatie beschikbaar dan bij een punt of vlaktemeting. Hierdoor is het mogelijk storende objecten zoals knobbels, laaghangende takken, tonkinstokken, etc. in het beeld te herkennen en zo een foutieve meting te voorkomen. Ook een tweedimensionaal beeld alleen is echter niet voldoende om de dikte van een object te meten. Hiervoor moet ook de afstand camera tot object bekend zijn en de camera configuratie (lens, type sensor e.d.). De afstand kan op verschillende manieren worden gemeten. Mogelijkheden zijn de reeds boven beschreven ultrasone of infrarood afstandmeters. Ook de projectie van een laserlijn in het beeld (lasertriangulatie) is een gangbaar principe.



Figuur 2-7. Digitale camera met beeldanalyse systeem.

## 2.2.4 Röntgen

Röntgenstraling is elektromagnetische straling met een hogere energie dan zichtbaar licht. Verschillende soorten materiaal zijn deels doorlatend voor röntgenstraling waardoor het mogelijk is door bepaalde soorten materiaal (half) doorheen te kijken. Computertomografie (CT) maakt gebruik van röntgenstraling om een 3d plaatje op te nemen. Vanwege de hoge kosten voor meetapparatuur en de veiligheidissues is röntgen voor de hier gewenste toepassing niet geschikt.

## 2.2.5 MRI (Magnetic Resonance Imaging)

Bij deze afbeeldingstechniek komt het op te nemen object in een tunnel te liggen die een sterke magneet bevat, waarmee het water in de weefsels gemagnetiseerd wordt. Als de radiogolf wordt gestopt wordt de eerder opgenomen energie weer uitgezonden als een signaal waarin allerlei bijzonderheden van het weefsel zijn vervat. Deze signalen worden door een gevoelige radioantenne opgevangen. Hieruit kunnen de samenstelling en de afmetingen van de verschillende weefsels berekenend worden (de MRI-scan). Vanwege de afmetingen, de hoge kosten en de snelheid van de meting is MRI voor de hier gewenste toepassing niet geschikt.

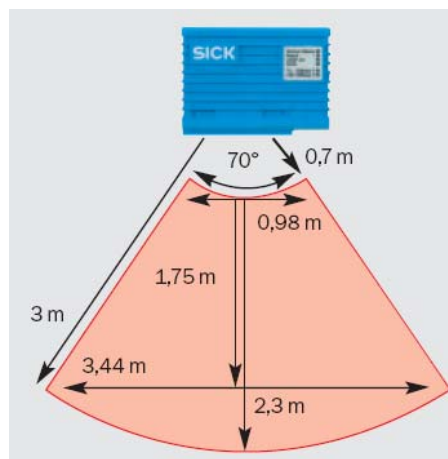
## 3. Laboratoriumtesten

Voor de laboratoriumtesten zijn een aantal van de boven beschreven meetprincipes en methodes geselecteerd en getoetst op de geschiktheid voor het diktemeten van boomstammen. De keuze van principes en methodes is gebaseerd op de meest haalbare methodes, de kosten en de beschikbaarheid van de meetapparatuur.

### 3.1 Materiaal

#### 3.1.1 Laser meet systeem LMS400

Verschillende artificiële objecten (buis, ronde emmer) en boomstammen van verschillende diameters zijn met het LMS400 laser meet systeem van de firma Sick (<http://www.sick.nl/>) gemeten. De dataverwerking is gedaan met de bijbehorende SOPAS software en eigen C++ en LabView applicaties. De LMS400 meet objecten op een afstand van 0.7 m tot 3 m en heeft een openingshoek van maximaal 70 graden. Het exacte meetgebied en de specificaties van de laserscanner zijn in Figuur 3-1 en Tabel 1 weergegeven. Voor de experimenten zijn de te meten objecten op ca. 1 m afstand verticaal voor de scanner geplaatst (zie ook Figuur 3-2).



Figuur 3-1. Meetgebied LMS 400 laser.

Tabel 1. Specificaties LMS 400 laser.

Max. afstand	3m
Min. afstand	0.7m
Resolutie afstand	1 mm
Resolutie hoek	0,25° bis 0,1°
Typische nauwkeurigheid (statistische fout, 1 Sigma per meetwaarde)	4 mm
Scanfrequentie	500 Hz 0,25° 250 Hz 0,1°
Afmetingen	H: 107 mm B: 179 mm L: 130 mm



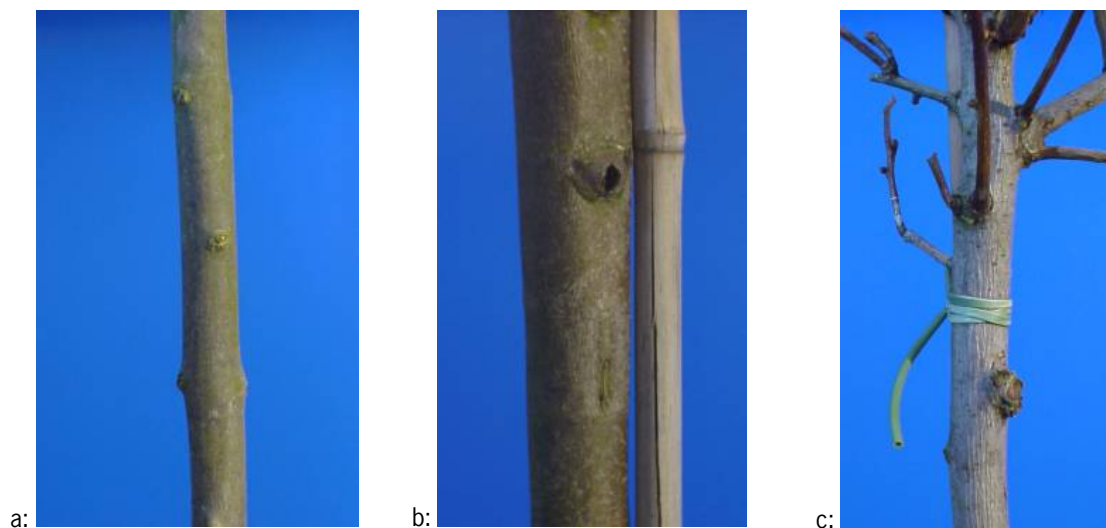
*Figuur 3-2. Laseropstelling met boomstam.*

### 3.1.2 Beeldanalyse systeem

Voor maken van opnames van bomen is een IEEE1394 kleuren camera met 6 mm lens (Allied Vision 'Guppy', F-033C, 1/3' Sony Progressive Scan CCD; 659 (h) x 494 (v)) gebruikt. Deze zeer compacte camera maakt opnames met een resolutie van 640x480 pixels (VGA). De prijs van dit type camera met lens bedraagt ca. € 750.

Voor de camera calibratie is de MATLAB camera calibration toolbox toegepast ([http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc/](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/)). Als beeldanalyse systeem is de National Instruments IMAQ bibliotheek uit het LabView 8.0 pakket gebruikt.

Voor de eerste labexperimenten zijn de bomen voor een egaal blauwe achtergrond geplaatst om storingen als gevolg van de achtergrond te minimaliseren. Figuur 3-3 toont opnames van verschillende situaties zoals met en zonder tonkinstok en met en zonder zijtakken. Figuur 3-4 geeft een overzicht over de tijdens de experimenten gemeten plastic buizen (P1 en P2) en bomen (B1 t/m B5).



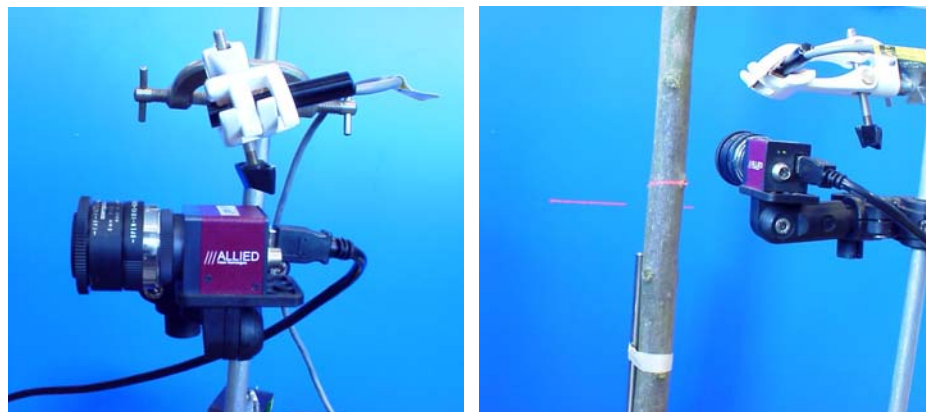
*Figuur 3-3. Opnames van boomstammen met blauwe achtergrond. Verschillende situaties: a: redelijk, b: met tonkinstok, moeilijk te onderscheiden, c: met zijtakken.*



*Figuur 3-4. Plastic buizen (P1 en P2) en bomen (B1 t/m B5) met verschillende omtrekken.*

### 3.1.3 Camera met laser triangulatie

Zoals eerder in dit document beschreven is bevat een camerabeeld niet voldoende informatie voor een diktemeting. Naast het camerabeeld is voor de berekeningen van de omtrek ook de exacte afstand van camera tot object vereist. Deze afstandinformatie kan op verschillende manieren gemeten worden. Een mogelijkheid is het projecteren van een laserlijn op het object. Hiervoor dient een laser boven of beneden de camera gemonteerd te worden. De laser wordt onder zo'n hoek gepositioneerd, dat op te verwachten objectafstand de laserlijn in het opgenomen beeld verschijnt. De horizontale positie van de geprojecteerde lijn in het beeld is een maat voor de objectafstand (de zogenaamde laser triangulatie). Figuur 3-5 geeft de set-up van een dergelijke opstelling weer. Figuur 3-6 toont het door de camera opgenomen beeld met de projectie van de lijn. De bij deze experimenten gebruikte laser was een Lasiris Mini Laser met een golflengte van 635 nm en 5 mW vermogen (ca. 400 EUR).



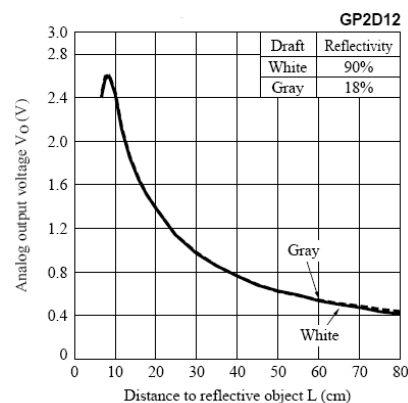
*Figuur 3-5. Camera met lijnlaser.*



Figuur 3-6. Projectie van laserlijn op boomstam.

### 3.1.4 Camera met infrarood afstandsensensor

Een andere methode om de afstand tot object te meten is een infrarood afstandsensensor. Hiervoor is de in de robotica veel gebruikte Sharp GP2D12 afstand sensor gebruikt. Deze heeft een meetbereik van 10 tot 80 cm. De maximale meetresolutie bij 8 bit digitalisatie van het analoge uitgangssignaal bedraagt max. 5 mm. Figuur 3-7 geeft de relatie objectafstand tot analoge uitgangsspanning weer en toont de gerealiseerde set-up. De afstandssensor meet parallel met de optische as van de camera lens.

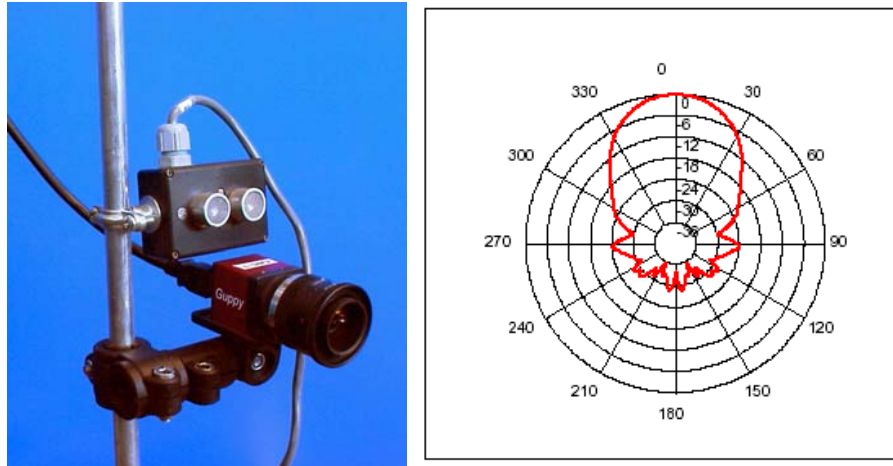


Figuur 3-7. Camera set-up met infrarood afstand sensor (links) en relatie objectafstand tot analoge uitgangsspanning van de GP2D12 (rechts).

### 3.1.5 Camera met ultrasone afstandsensensor

Op dezelfde manier als de infrarood sensor kan ook een ultrasoon sensor worden geplaatst. Gebruikt is de Devantech SRF08 die afstanden van 3 cm tot 600 cm kan meten. Een 40 KHz puls wordt verzonden en de ontvanger luistert naar de reflecties van het geluid. De SFR08 versie heeft een grote openingshoek, d.w.z. een 3dB straalbreedte van ca. 30 graden. De sensor is in staat 16 terugkomende echo's op te nemen wat overeenkomt met het meten van afstanden van 16 reflecterende oppervlaktes in het zichtveld van de sensor. Er kan een meting per 65 ms worden uitgevoerd. Als nauwkeurigheid van de sensor wordt 30 tot 40 mm aangegeven. De prijs per sensor is ca € 50.





Figuur 3-8. Camera set-up met ultrasonie afstand sensor en openingshoek van de SFR08 sensor.

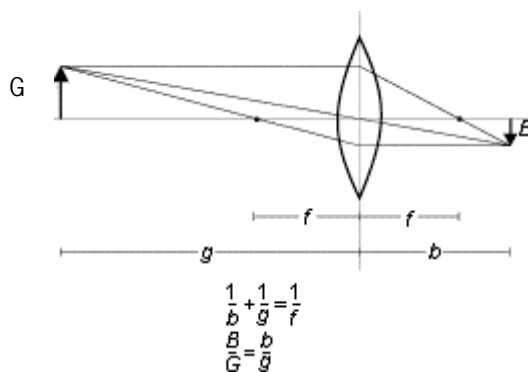
## 3.2 Methoden

### 3.2.1 Berekenen van de diameter uit een 2d afbeelding van het object

Een haakse projectie van een rond object (boomstam) toont de diameter van het object. Uit de diameter is de omtrek van het object te berekenen met:

$$\text{Omtrek} = \pi \text{ diameter} \quad (1)$$

Om dus de omtrek van een object te kunnen bepalen is het noodzakelijk de afgebeelde diameter te kunnen meten. Voor de omzetting van beeldcoördinaten naar grote van een afgebeeld object wordt gebruik gemaakt van de welbekende lenstheorie. Hierbij wordt ervan uitgegaan, dat de camera wordt benaderd als pinhole model:



- waarbij: b afstand tussen optisch centrum lens en beeldoppervlak (mm)  
 g afstand tussen object en optisch centrum lens (mm)  
 G grootte object (mm)  
 B grootte object in beeld c.q. op CCD chip (mm)

De afstand lens – object (g) kan niet empirisch worden bepaald, omdat het referentiepunt zich op een onbekende plek in de lens bevindt. Daarom moet de daadwerkelijke focal length d.m.v. een echte camera calibratie experimenteel bepaald worden.

De breedte van de CCD sensor in real world is bekend (bijv. 1/2 " CCD=6.4mm) en ook de beeld resolutie (bijv. 1024 pixel). Hieruit volgt:

$$1 \text{ pixel} = 6.4/1024 = 0.00625 \text{ mm}$$

Door middel van een calibratieobject met bekende afmetingen kan de daadwerkelijke afstand tussen object en optisch centrum lens g worden berekend, zodat vervolgens dit referentiepunt bekend is.

$$g = \frac{f \left( \frac{B}{G} + 1 \right)}{\frac{B}{G}} \tag{2}$$

Verder is b te berekenen middels

$$b = \frac{1}{(1/f) + (1/g)} \tag{3}$$

En dus vervolgens voor alle opnames de grote van een afgebeeld object G in mm

$$G = \frac{gB}{b} \tag{4}$$

Aannames:

*Tabel 2. Aannames camera meetsysteem.*

Omschrijving	Variabele	mm
Afstand camera – boom	g	300
Brandpunt lens (focal length)	F	8.0
Breedte ½ inch CCD	W	6.4
Aantal pixels per beeld (image width)	P	1024
Hieruit volgt:		
Pixel density (mm per pixel)	D	0.00625
Afstand CCD – lens	b	7.79

Met deze gegevens kan de grote (diameter en omtrek) van een afgebeeld object worden berekend:

*Tabel 3. Voorbeeld voor berekende omtrekken en diameter.*

Objectbreedte (pixel)	Diameter object	Omtrek object
10	2.4	7.5
11	2.6	8.3
100	23.9	75.1
101	24.1	75.8
500	119.5	375.3
501	119.7	376.1

Uit Tabel 3 blijkt dat de maximale meetresolutie van een dergelijk meetsysteem 0.75 mm in omtrek per afgebeeld pixel is (verschil in omtrek bij één pixel verschil in afgebeeld objectgrote). Deze nauwkeurigheid wordt nog vermindert door volgende invloedsfactoren:

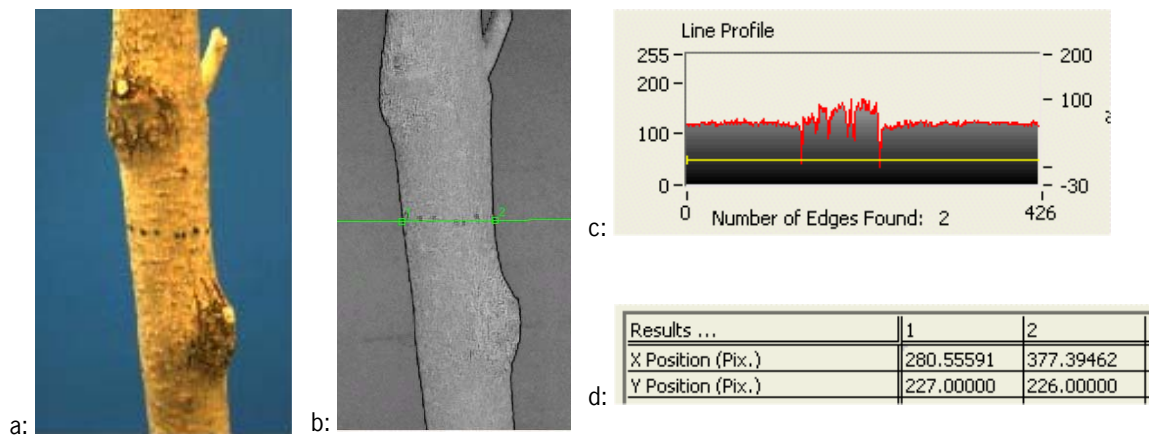
- Nauwkeurigheid van beeldanalyse in het bepalen van de objectbreedte.
- Camera calibratie (bepalen exacte brandpunt).
- Nauwkeurigheid meting afstand camera – object (bijv. door middel van laser triangulatie, ultrasone e.d.).
- Als er maar één aanzicht van het object voor de berekeningen wordt gebruikt: mate van cilindriciteit van het object (boomstam is niet altijd rond).

Het is te verwachten dat deze meetresolutie voldoende is om een nauwkeurigheid van 0.5 cm bij het meten van de boomdikte te bereiken. Dit is minder dan de gewenste 0.1 cm nauwkeurigheid.

Voor de labexperimenten zijn opnames genomen van 5 verschillende boomstammen en 2 kunstmatige ronde objecten (twee plastic palen van verschillende diameter, Figuur ). Voor een betere onderscheiding object en achtergrond wordt het kleurenbeeld getransformeerd van RGB kleurenruimte naar HSI kleurenruimte. In het S (saturation) beeld worden vervolgens met edge detectie algoritmes de begin en eindcoördinaten van de boomstam bepaald.

Figuur 3-9 toont stappen tijdens de analyse van de opnames:

- Kleuren beeld.
- 'Saturation' beeld na transformatie in de HSI kleurenruimte. Gedetecteerde 'edges' langs een zoeklijn (groene lijn).
- Intensiteitprofiel langs zoeklijn.
- Beeldcoördinaten van gedetecteerde begin en eindpunt van de boomstam.



Figuur 3-9. Stappen bij de automatische analyse van een opname. Beschrijving zie tekst.

Uit de objectbreedte (aantal pixel) kan de breedte van het object op de CCD in mm worden berekend. Zoals boven beschreven kan met deze informatie bij een bekende objectafstand de grote (=diameter) van een afgebeeld object in mm worden berekend. Voor de experimenten zijn twee vaste, met een meetlat gemeten afstanden camera – boomstam gebruikt: 150 mm en 300 mm. Als laatste stap wordt de omrekening diameter naar omtrek (gebaseerd op een cirkel) toegepast.

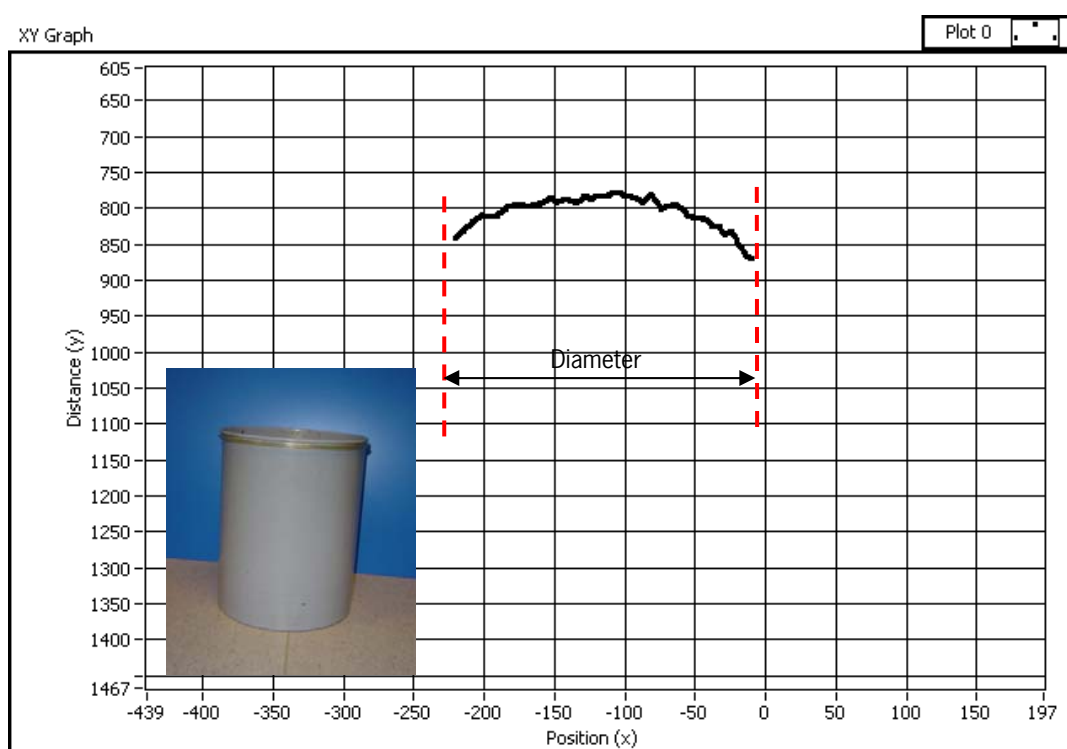
In een tweede experiment is onderzocht of en welke problemen zich voordoen voor de beeldanalyse bij de aanwezigheid van tonkinstokken.

### 3.3 Resultaten

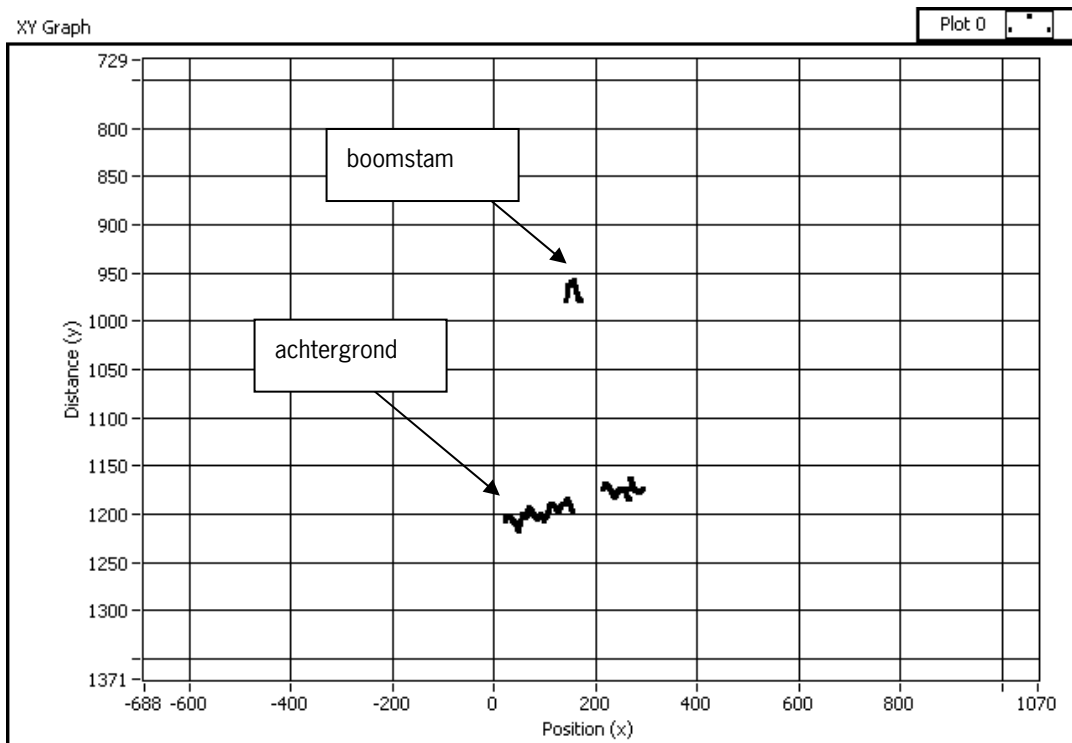
#### 3.3.1 LMS Laser meet systeem

Tijdens de metingen bleek, dat de afstand tot een object alleen dan betrouwbaar herkenbaar is, als de objectgrote minimaal 3x de hoekresolutie bij een bepaalde afstand is. Bij een object afstand van 700 mm en een hoek resolutie van  $0.1^\circ$  is de horizontale resolutie 1.22 mm. De minimale objectgrote voor deze afstand komt er dus neer op 3.66 mm. Dit is redelijk grof. De typische meetfout is volgens de specificaties 4 mm, waardoor de fout bij de berekening van de omtrek  $4 * \pi = 12.6$  mm zal zijn.

Figuur 3-10 toont een xy plot van een laserscan van een testobject (ronde emmer). De vooraf met een meetlint gemeten omtrek van dit object: was 750 mm. De omtrek van de emmer bepaald d.m.v. laserreflectie is 691 mm (diameter=220 mm uit Figuur 3-10).



Figuur 3-10. xy plot van een laserscan van een testobject (ronde emmer). Zwarte lijn: gereflecteerde laser posities. Rood: aangeduid diameter van het geprojecteerde object. Y as: afstand in mm tot het object. X-as: positie ten opzichte van de scanner.



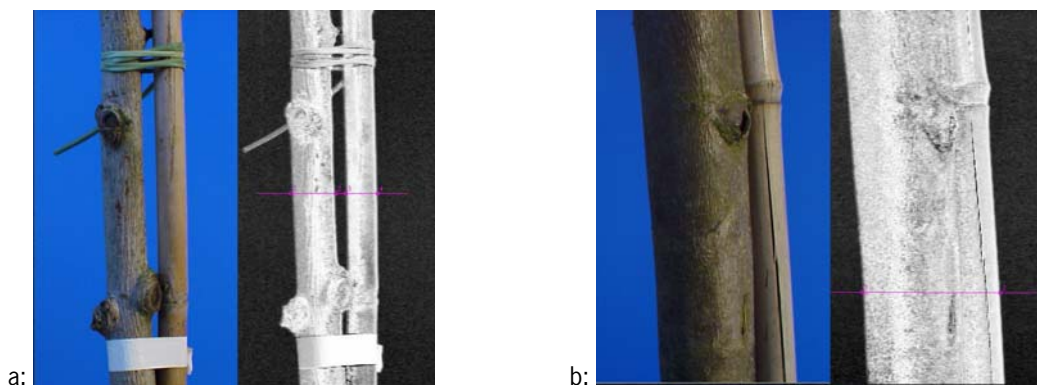
*Figuur 3-11. xy plot van een laserscan van een boomstam. Zwarte lijn: gereflecteerde laser posities van boomstam en achtergrond (muur). Y-as: afstand in mm tot het object. X-as: positie ten opzichte van de scanner.*

Figuur 3-11 toont een xy plot van een laserscan van een boomstam van ca. 5 cm diameter staand voor een muur. Uit de gemeten reflectie kan nauwelijks een uitspraak worden gedaan over de afmetingen van het object. Ook krijg je ongewenste reflecties van de achtergrond. Bij een natuurlijke achtergrond in het open veld zal het identificeren van reflecties die bij de achtergrond horen en van reflecties die bij de voorgrond horen moeilijk indien niet onmogelijk worden.

Samengevat bleek de resolutie van het systeem voor het nauwkeurig meten van de dikte van bomen onvoldoende.

### 3.3.2 Beeldanalyse systeem

De aanwezigheid van tonkinstokken kan problemen opleveren bij de automatische analyse van de opnames. Voor het geval, dat er tussen boom en stok een gleuf zichtbaar is (Figuur 3-12 a) is het mogelijk de twee objecten te onderscheiden. Voor het geval dat er geen gleuf zichtbaar (Figuur 3-12 b) kan dit onderscheid niet of alleen moeilijk worden gedaan. Dit wordt ook nog bemoeilijkt als de kleur en/of de diameter van de stok dicht bij de kleur of de diameter van de boom komt. De consequentie van een dergelijke opname kan zijn, dat de diameter c.q. omtrek van de boom te groot wordt bepaald omdat stok en boom als een (te breed) object worden gezien.



Figuur 3-12. Boomstammen met tonkinstokken.

Tabel 4 geeft de gedetailleerde resultaten van het meten van de omtrek van bomen met de verschillende methodes.

Bij meting met de schuifmaat is de afwijking t.o.v. het meetlint bij gebruik van de gemiddelde waarde over de 5 metingen minder dan 1 mm in omtrek. Gekeken naar de individuele waarden loopt de standaard deviatie van de meetwaarden op tot 4.3 mm. Dit sluit aan bij het vermoeden dat één willekeurige tweepuntsmeting niet voldoende zou zijn om de omtrek nauwkeurig te bepalen.

Bij de perimeter (driepuntsmeting) ligt de standaard deviatie rond de 1.5 mm, beduidend minder dus. Wel is de afwijking van de perimeter ten opzichte van het meetlint iets groter dan die van de schuifmaat. Dit hangt o.a. samen met het feit dat de schaal op de perimeter niet goed per mm af is te lezen waardoor de kans op fouten bij het aflezen van de gemeten omtrek groot is.

Bij gebruik van één enkele beeldopname van de boom voor het bepalen van de boomomtrek lopen de afwijkingen van de waarden vergeleken met de referentiemeting met het meetlint uiteen tot meer dan + en - 20 mm (bijv. boom 2, meting bij 135 graden). De standaard deviatie voor de afzonderlijke camerametingen liggen tussen 1.4 en 11.3 mm. Net als bij de schuifmaat blijkt dus ook hier, dat een enkele meting voor het bepalen van de omtrek niet toereikend is. Hoe meer de vorm van een boom afwijkt van een perfecte cirkel des te groter de kans op een verkeerde berekening.

Bij gebruik van het gemiddelde over 5 metingen uit verschillende kijkhoeken (rotaties) met door een camera/beeld-analysesysteem bepaalde omtrekken van de boom ligt de afwijking ten opzichte van het gebruik van een meetlint tussen -5.2 en +4.1 mm. Hierbij is er weinig verschil te zien tussen de opnames die er zijn gemaakt met een camera – objectafstand van 150 mm en de opnames die zijn gemaakt met een afstand van 300 mm. De door dit vooronderzoek gehaalde nauwkeurigheid met het camerasysteem ligt dus in de order grootte van 5 mm.

Tabel 4. Resultaten omtrekmetingen met verschillende methodes.

Alle maten zijn in mm, gem = gemiddelde, sd = standaard deviatie.

Object	Gemeten bij rotatie (graden)	Meetlint (continue)	Schuifmaat (2 puntsm.)	Afwijking t.a.v. meetlint	Perimeter (3 puntsm.)	Afwijking t.a.v. meetlint	Camera op 300 mm	Afwijking t.a.v. meetlint	Camera op 15 mm	Afwijking t.a.v. meetlint
Paal 1	0	127.0	125.7	-1.3	127.0	0.0	129.5	2.5	123.4	-3.6
Paal 2	0	159.0	158.0	-1.0	159.0	0.0	157.2	-1.8	150.3	-8.7
Boom 1	0	137.0	139.5	2.5	138.0	1.0	142.6	5.6	146.3	9.3
	45		139.2	2.2	135.0	-2.0	149.9	12.9	143.5	6.5
	90		131.6	-5.4	135.0	-2.0	122.2	-14.8	125.8	-11.2
	135		132.9	-4.1	135.0	-2.0	132.0	-5.0	139.5	2.5
	180		141.1	4.1	134.0	-3.0	145.8	8.8	136.2	-0.8
	<i>gem. sd</i>	<i>137.0</i>	<i>136.8</i>	<i>-0.2</i>	<i>135.4</i>	<i>-1.6</i>	<i>138.5</i>	<i>1.5</i>	<i>138.2</i>	<i>1.2</i>
Boom 2	0	110.0	110.9	0.9	108.0	-2.0	112.4	2.4	108.5	-1.5
	45		110.9	0.9	108.0	-2.0	110.0	0.0	107.7	-2.3
	90		104.9	-5.1	111.0	1.0	105.9	-4.1	104.1	-5.9
	135		107.8	-2.2	110.0	0.0	85.5	-24.5	105.3	-4.7
	180		112.2	2.2	110.0	0.0	110.0	0.0	107.3	-2.7
	<i>gem. sd</i>	<i>110.0</i>	<i>109.3</i>	<i>-0.7</i>	<i>109.4</i>	<i>-0.6</i>	<i>104.8</i>	<i>-5.2</i>	<i>106.6</i>	<i>-3.4</i>
Boom 3	0	64.0	62.8	-1.2	62.0	-2.0	66.8	2.8	64.3	0.3
	45		64.1	0.1	61.0	-3.0	66.8	2.8	63.1	-0.9
	90		64.4	0.4	62.0	-2.0	64.4	0.4	67.9	3.9
	135		62.5	-1.5	63.0	-1.0	62.7	-1.3	69.1	5.1
	180		62.8	-1.2	65.0	1.0	67.6	3.6	65.1	1.1
	<i>gem. sd</i>	<i>64.0</i>	<i>63.3</i>	<i>-0.7</i>	<i>62.6</i>	<i>-1.4</i>	<i>65.7</i>	<i>1.7</i>	<i>65.9</i>	<i>1.9</i>
Boom 4	0	72.0	72.3	0.3	74.0	2.0	73.3	1.3	71.5	-0.5
	45		69.4	-2.6	71.0	-1.0	70.9	-1.1	73.5	1.5
	90		71.6	-0.4	75.0	3.0	74.1	2.1	73.9	1.9
	135		71.9	-0.1	71.0	-1.0	79.0	7.0	78.8	6.8
	180		71.3	-0.7	72.0	0.0	72.5	0.5	71.1	-0.9
	<i>gem. sd</i>	<i>72.0</i>	<i>71.3</i>	<i>-0.7</i>	<i>72.6</i>	<i>0.6</i>	<i>74.0</i>	<i>2.0</i>	<i>73.8</i>	<i>1.8</i>
Boom 5	0	76.0	74.5	-1.5	75.0	-1.0	74.9	-1.1	79.6	3.6
	45		76.0	0.0	77.0	1.0	79.8	3.8	81.6	5.6
	90		75.1	-0.9	75.0	-1.0	77.4	1.4	81.6	5.6
	135		75.4	-0.6	76.0	0.0	80.6	4.6	79.2	3.2
	180		75.1	-0.9	77.0	1.0	77.4	1.4	78.8	2.8
	<i>gem. sd</i>	<i>76.0</i>	<i>75.2</i>	<i>-0.8</i>	<i>76.0</i>	<i>0.0</i>	<i>78.0</i>	<i>2.0</i>	<i>80.1</i>	<i>4.1</i>





## 4. Conclusies en Aanbevelingen

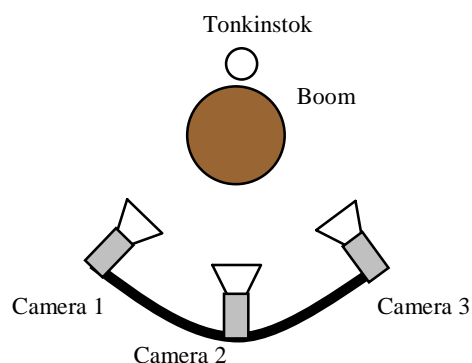
De laboratoriumexperimenten hebben het vermoeden bevestigd, dat één willekeurige tweepuntsmeting (zoals met een schuifmaat of met één individuele beeldopname) onvoldoende is om de omtrek van een boom nauwkeurig (minder dan 0.1 cm afwijking in omtrek) te bepalen. Dit heeft te maken met het feit dat de doorsnede van een boomstam geen geometrische cirkel is maar een natuurlijke gegroeide vorm die in de meeste gevallen een ellips benadert. De mate van excentriciteit van de ellips kan per boom(soort) zeer verschillend zijn.

Metingen met het LMS laser systeem zijn onvoldoende nauwkeurig. Ook geeft een dergelijke meting geen informatie over de omgeving van de meetvlakte. Hierdoor is het onmogelijk een onderscheid te maken tussen de boomstam zelf en andere objecten zoals een tonkinstok of een stamknobbel. Deze problematiek geldt ook voor alle andere eendimensionale meetmethodes.

Een opname met een camera genereert een tweedimensionale afbeelding. Van alle hier beschreven sensoren biedt een camerasysteem de meest uitgebreide mogelijkheden om foutieve metingen te voorkomen. Maar ook bij gebruik van een camera moeten opnames van meerdere kijkhoeken worden genomen. De nauwkeurigheid door het middelen van de resultaten van 5 opnames (bij 0, 15, 45, 135 en 180 graden verticale rotatie van de boomstam) ligt in de order grote van 0.5 cm. Dit is nog steeds factor 5 hoger dan de gewenste nauwkeurigheid van 0.1 cm. Om deze zeer hoge nauwkeurigheid te halen zal er gebruik moeten worden gemaakt van camera's met een hogere resolutie en/of meer dan 5 opnames uit verschillende kijkhoeken per boom.

Het in Figuur 4-1 voorgestelde meetsysteem zal in staat zijn contactloos en in tijdens het 'langsrijden' een dergelijke meting uit te kunnen voeren. Het bestaat uit 3 of meer camera's, die onder verschillende hoeken naar de boom kijken. Hierdoor kunnen voor de berekening van de omtrek de afgebelde diameters van meerderde opnames worden gemiddeld. Vanzelfsprekend moet ook een dergelijk systeem met sensoren zijn uitgerust die de afstand camera tot boom meten. Als afstandssensoren zijn verschillende sensortypen (ultrasoon, infrarood, projectie van laserlijn) beschikbaar. Gebruik van lijnprojectie op de stam is het meest perspectiefvolle principe omdat deze methode nauwkeurig is en omdat door de toch noodzakelijke analyse van het camerabeeld ook het maken van foutieve metingen als het kleinst kan worden ingeschat.

Alternatief zal ook een camera op een roterende schijf kunnen worden gemonteerd. Tijdens het bewegen van de camera langs de boom zal de camera zo moeten draaien, dat de boom altijd in zicht van de camera is. Ook op deze manier zouden opnames van meerdere kijkhoeken kunnen worden genomen.



Figuur 4-1. Bovenaanvicht van een mogelijk contactloos meetsysteem, gebaseerd op 3 camera's.

Door niet alleen op één bepaalde beeldlijn de dikte van een boom te meten maar door meerdere metingen langs de gedetecteerde stam uit te voeren zal het mogelijk zijn met filtertechnieken automatisch de aanwezigheid van zijtakken en/of knobbels op de stam te herkennen zodat vervolgens bij de berekening van de dikte hiermee rekening kan worden gehouden. Hetzelfde geldt ook voor de aanwezigheid van tonkinstokken. Is het niet mogelijk de tonkinstok altijd achter de boom (dus onzichtbaar voor de camera) te plaatsen zal het mogelijk kunnen zijn door het analyseren van opnames uit meerdere kijkhoeken de aanwezigheid en positie van stok te kunnen bepalen.

In het open veld zou een beeldanalysesysteem door storingen in de achtergrond (volgende boomrij, laagstaande zon) in de problemen kunnen komen. Door gebruik van actieve verlichting, bijv. hoge intensiteit flitslicht, zou het wel mogelijk moeten zijn om grip op dergelijke aspecten te krijgen.

Als de contactloze metingen niet de gewenste nauwkeurigheid geven of als de investeringskosten te hoog zijn zal de optie moeten worden onderzocht een van de contactmeters uit te breiden met een stukje elektronica om de metingen en de dataopslag c.q. verwerking te automatiseren. Zo is het goed denkbaar aan de driepuntnmeter tang (de perimeter) een potmeter te koppelen zodat de stand van de tang automatisch kan worden uitgelezen. De meetgegevens zouden vervolgens op een PDA (Personal Digital Assistant) kunnen worden opgeslagen. Dit eventueel in combinatie met een GPS positie.

Ook de Epicom zal kunnen worden voorzien met 'up-to-date' elektronica om het systeem lichter en makkelijker bedienbaar te maken. Technieken als draadloze dataoverdracht met WiFi en /of Bluetooth etc. zal de uitwisseling van gegevens met bijv. een PC in de schuur vergemakkelijken.