



Markbaserade sensorer för insamling av skogliga data - en förstudie

Fredrik Eriksson

Arbetsrapport 41 1998

SVERIGES LANTBRUKSUNIVERSITET
Institutionen för skoglig resurshushållning
och geomatik
S-901 83 UMEÅ
Tfn: 090-786 58 25 Fax: 090-14 19 15, 77 81 16

ISSN 1401-1204
ISRN SLU-SRG-AR--41--SE

FÖRORD

Föreliggande studie är ett tiopoängs examensarbete på Jägmästarlinjen vid Sveriges Lantbruksuniversitet. Arbetet har utförts under hösten 1996 och våren 1997 vid institutionen för Skoglig resurshushållning och Geomatik i Umeå. Jag vill tacka samtliga personer som varit involverade under arbetets gång och då särskilt min tålmodigt väntande handledare Håkan Olsson och biträdande handledare Kjell Pernestål.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING:

ABSTRACT	3
SAMMANFATTNING	5
1. INLEDNING	7
1.1 SKOGSBRUKETS BEHOV	7
1.2 VISIONER	8
1.3 SYFTE	9
1.4 TEKNISK UTVECKLING	9
2. METOD	10
3. KRAVSPECIFIKATION.....	10
4. TÄNKBARA TEKNIKER.....	13
4.1 LASER.....	13
4.1.1 Scanning med lidar	14
4.1.2 Laser flouoscens.....	17
4.2 FOTOGRAMMETRISKA METODER.....	18
4.2.1 Bildanalys och matchning.....	19
4.2.2 Fotogrametri i digitala bilder med känt objektavstånd.....	20
4.2.3 Enkelmonterad ccd-kamera med lidar.....	20
4.2.4 Stereomontage.....	22
4.2.5 "Optical flow"	23
4.3 RADAR.....	23
4.3.1 Allmän teori	23
4.3.2 Långvåg.....	24
4.3.3 SAR.....	25
4.3.4 Kortvåg	26
4.4 ULTRALJUD.....	26
4.5 UPPÅTTITTADE TEKNIKER.....	26
4.5.1 Video	27
4.5.2 Radar.....	27
4.5.3 Passiv mikrovågs radiometri	27
5. LÖSNINGAR PÅ PRAKTISKA PROBLEM.....	27
5.1 ORIENTERING OCH POSITIONSBESTÄMMNING.....	28
5.2 TRANSPORT.....	29
5.3 KRAFTFÖRSÖRJNING	30
5.4 INVENTERINGSDESIGN.....	30
6. SLUTORD	32
7. REFFERENSER	34

ABSTRACT

This MSc thesis was done at the Department of Forest Resources and Geomatics SLU, Umeå during the fall 1996 and spring 1997.

A requirement for accurate forestry planning at all levels is knowledge about the condition of the forests today. The quality of the decisions made will therefore be proportional to the quality and amount of information collected.

Sensors like radar, lidar and different types of digital cameras are today used quite successfully for remote sensing from aircraft or satellites. The purpose of the thesis is to make a feasibility-study about ground-based use of these kinds of sensors in order to rationalise and improve forest inventory work.

Following techniques were selected for a closer study of their qualities as ingredients in an inventory concept:

- **Lidar.** Lidar is an abbreviation for *light detection and ranging* and is a laser-based technique to measure distance and reflection of an object. Compared to other kinds of sensors the lidar has a very high angular resolution. Therefore it is well suited for scanning and ranging where high accuracy is required. The disadvantage of the method is that a clear sight to the object is needed and that the technique must still be considered advanced and expensive.
- **Photogrammetry in digital images.** If the distance to the object and the internal geometry of the camera is known for an image, measurements of for example tree diameters or the shape of the whole trunk can be made. By using digital pictures and image processing it seems possible to develop programs that more or less automatically detect and measure the desired variables.
- **Radar.** The radar-based sensors are using much lower frequencies than the laser. This gives radar the characteristic of being able to see through objects half the size of the wavelength or less. This could be very valuable if radar are supposed to be used for forest inventory work since there will be a problem with undergrowth covering stems if methods that demands visual sight will be used. The disadvantage with using the appropriate wavelengths is that the angular resolution will be too low for scanning where the purpose is to measure each stem individually. If on the other hand the total sum of the signals in a scanned sector is analysed in order to extract information about the standing volume, radar seems like a very feasible technique for developing an effective forest inventory concept.
- **Ultrasonic.** Ultrasonic can be used by the same theories as for radar. The advantage for ultrasonic compared to radar is that there is a supply of comparatively cheap and simple standard components. The disadvantage is that how much the signal will be reduced while transmitting through the air depends to a high degree of the atmospheric humidity and temperature, which means that calibration must be made. Another negative characteristic of ultrasonic is that the signal is sensitive for wind.

The methods of inventory used also have an effect on the feasibility of the techniques. If double sampling is used there will be different requirements for the equipment depending on if it is data from the large primary sample or the more accurate secondary sample being collected. When collecting the primary sample it's necessary to collect a large amount of data to prevent errors that originates from the representation of the population. The quality of the collected data will therefore be less important. This means that techniques that collects large amounts of data with high cost-efficiency but lacks in precision will be interesting, for example radar or ultra-sonic sensors that collects data continuously while moving. On the other hand if the purpose is to collect the secondary sample, equipment that measures with high accuracy, like lidar or photogrammetry in digital pictures will be required. Another, maybe more realistic alternative, is to use a cost-efficient sensor-based technique to collect data from the primary sample and then use traditional manual circular plot sampling for the secondary sample.

SAMMANFATTNING

En förutsättning för skoglig planering på alla nivåer är att man har en god uppfattning om tillståndet i den stående skogen. Kvaliteten på de beslut som fattas kommer därför att vara direkt beroende av mängden och kvalitén på den information som samlats in.

Sensorer som radar, lidar och olika typer av digitala kameror används idag med framgång för fjärranalys där skogen avbildas från ovan. Föreliggande arbete syftar till att belysa de tekniska förutsättningarna för att utnyttja modern sensorteknik även för markbaserade mätningar. Detta skulle i så fall öppna möjligheter att automatisera fångsten av skogliga data som därmed skulle bli kostnadseffektivare samtidigt som nya typer av data skulle bli tillgängliga.

På ett tidigt stadium valdes följande tekniker ut för att närmare studeras med avseende på lämplighet att ingå i ett inventeringskoncept:

- **Lidar.** Lidar är en laserbaserad teknik för att mäta avstånd och riktning till objekt. Laserns fördelar gentemot andra typer av sensorer är att mycket hög vinkelupplösning kan erhållas på signalen. Laser baserade sensorer framstår därför som mycket lämpliga för olika typer av scanning eller avståndsmätning. Nackdelen är att laserstrålen måste ha fri sikt för att kunna registrera ett objekt samt att det i dagsläget handlar om dyr och avancerad teknik.
- **Fotogrammetri i digitala bilder.** Om avståndet till objektet i en bild och kamerans inre geometri är kända kan geometriska mätningar av exempelvis stamdiametrar göras i bilden. Genom att använda digitala bilder och bildanalys borde det vara möjligt att skapa program som mer eller mindre automatiskt detekterar och mäter diametrar på de stammar som är synliga i en bild. Objektavstånden tas lämpligen ut genom separat avståndsmätning med lidar eller genom stereomatchning av två eller flera bilder.
- **Radar.** Radarsignalen använder betydligt lägre frekvenser än laser, vilket ger den intressanta egenskaper i skogsuppskattningssammanhang då man kan se igenom objekt mindre än halva våglängden. Nackdelen med lågfrekventa signaler är att man får en för dålig vinkelupplösning om man försöker att genom scanning ta ut vinkel och avstånd till de enskilda stammarna. Radar verkar däremot vara en mer framkomlig väg om man avser att hämta information ur den totala retursignalen. En viss uppfattning om diameter fördelningen skulle i så fall kunna fås genom att studera skillnaden i retursignalen från olika våglängder.
- **Ultraljud.** Ultraljud kan användas enligt samma principer som radar. Fördelarna med ultraljudssensorer är att det finns enkla och billiga standardkomponenter. Nackdelen är att signalen dämpas under färden genom luften och måste därför kalibreras för förändringar i luftens temperatur och fuktighet.

Inventeringens uppläggning har också betydelse för de olika teknikernas användbarhet. Om man inventerar enligt principen för tvåfassampling ställs olika krav på utrustningen beroende på om det är det stora primära samplet eller det mer noggranna sekundära samplet man samlar in. Vid insamlingen av det primära samplet försöker man samla in stora mängder data som är korrelerat med den variabel som man önskar mäta för att få ett så lågt representativt fel som möjligt. Generellt kan man därför säga att kvantiteten data är viktigare än kvaliteten på det samma vid insamling av det primära samplet. Detta gör att tekniker som samlar in data kostnadseffektivt men med låg precision blir intressanta, exempelvis radar och ultraljuds sensorer som registrerar ekon kontinuerligt medan utrustningen förs längs en linje. Om man däremot vill mäta in det sekundära samplet med sensorer krävs utrustning som mäter med hög precision på den enskilda provytan, vilket talar för tekniker som lidar och fotogrammetri i digitala bilder. Ett kanske mer realistiskt alternativ är annars att inventera det primära samplet med automatiska kostnadseffektiva metoder medan det sekundära samplet mäts in med traditionella manuella metoder.

1. INLEDNING

1.1 Skogsbrukets behov

En förutsättning för skoglig planering på såväl strategisk och taktisk som operativ nivå är information om tillståndet i den befintliga skogen. Kvaliteten på de prognoser och optimeringar som är resultatet av planeringen, är direkt beroende av mängden och kvaliteten på den information som samlats in.

Dimensioneringen av datainsamlingen sker ofta mot bakgrund av så kallad cost-loss optimering. Cost-loss optimeringen är en teori enligt vilken man bör minimera den sammanlagda kostnaden för inventering och de inoptimalförluster som beror på bristfällig information (fig. 1). I praktiken är det dock betydligt svårare att uppskatta inoptimalförlustens storlek än kostnaderna för inventering. Vilken inventeringsinsats man väljer blir därför i hög grad en skattning baserad på erfarenheter och då inventeringskostnaden är mer påtaglig och omedelbar, finns en uppenbar risk att datainsamlingen blir eftersatt.

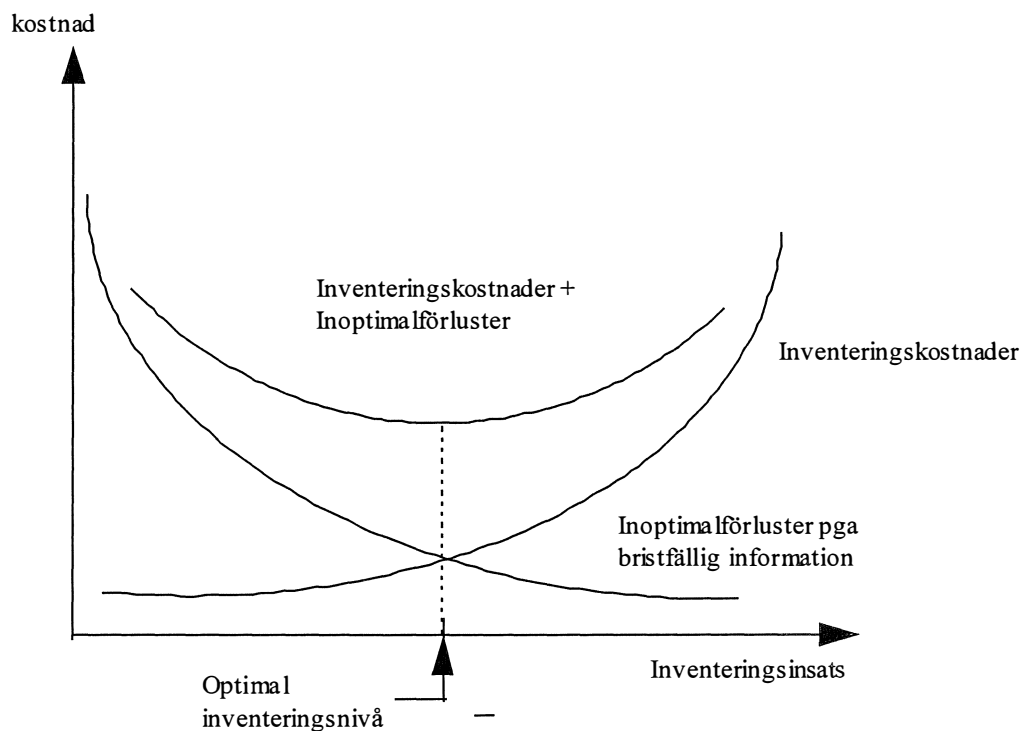


Fig. 1. Princip för cost-loss optimering.

Innan datainsamlingen i fält görs i regel en indelning av skogen i någorlunda homogena bestånd med hjälp av flygbilder. Därefter görs fältmätningar från subjektivt valda punkter i beståndet, varefter medelvärden för hela beståndet räknas fram. De subjektiva mätningarna kompletteras sedan i regel med mer omfattande objektiva mätningar i samplade bestånd. Inventeringarna, särskilt den objektiva delen, är kostsamma och informationen är naturligtvis inte fullkomlig.

På grund av de höga inventeringskostnaderna utförs inventeringarna med relativt långa omdrevsintervall. Under perioderna mellan inventeringstillfällena uppdateras datat med hjälp av tillväxtfunktioner. Funktionerna innehåller dock alltid en viss avvikelse från verkligheten, vilket gör att beståndsdatat förfaller med tiden om det inte ajourhålls och faktum är att det idag finns stora och ibland mycket besvärande skillnader mellan verkligt skogsinnehav och beståndsdata hos de stora skogsägarna. Inom skogsbruket finns därför ett behov av inventeringsmetoder som är billigare eller ger värdefullare information än den man erhåller idag. Ianspråkstagandet av ny teknik kan potentiellt erbjuda mätningar med högre noggrannhet, möjlighet att mäta nya variabler samt även möjligheter att knyta information till bestämda geografiska punkter i beståndet. Det sistnämnda kan dessutom skapa förutsättningar för att designa nya typer av inventeringsmetoder.

1.2 Visioner

Det mest uppenbara sättet att sänka inventeringskostnaderna, med bibehållen kvalitet och mängd insamlad information, är att öka förämningsmannens produktivitet. Visionen som ligger till grund för rapporten är att man genom att utnyttja någon typ av markbaserad sensorteknik utvecklar ett system som kostnadseffektivt samlar värdefulla skogliga data.

Ett exempel skulle kunna vara utrustning som på kort tid detekterar stammantal, diameterfördelning och grundyta, på en yta med känd areal. Sådana tekniker skulle även kunna öppna möjligheter att hämta in andra variabler, till exempel kvalitetsrelaterade data som stamform och krongräns. Samtidigt som sensorerna mäter skulle ytans position kunna registreras med GPS. Eventuellt skulle även positionerna för de enskilda stammarna kunna registreras genom att utnyttja de vinkel och avståndsdata som registreras vid sensormätningarna. Då stora delar av det mekaniska mätandet rationaliseras bort frigörs det tid för förämningsmannen att ägna sig åt andra bedömningar, exempelvis naturvärdes inventeringar eller ajourhållning av skogskartor.

Man kan tänka sig flera olika alternativ för utläggning av samplet. Mätningarna kan till exempel utföras från i förväg utlagda provytepunkter där man mäter in en cirkel eller sektor med bestämd radie alternativt kan man mäta in ett förutbestämt antal av de närmaste träden och registrera avståndet till dessa. Bandtaxering är en inventeringsform där man mäter med en viss slagbredd längs en slumpvis utlagd linje.

Bandtaxering är en i sammanhanget intressant metod om automatiserade mätningar av den typ som beskrivs i uppsatsen skulle kunna möjliggöra kontinuerliga mätningar under rörelse längs en taxeringslinje. Datainsamlandet blir i och för sig avsevärt besvärligare om man mäter med utrustningen i rörelse än om man har en fast mätpunkt, men om man fick ett dylikt koncept att fungera skulle det förmodligen gå att göra mer kostnadseffektivt än traditionella provytor.

Beroende på utrustningens vikt kan man alternativt tänka sig att förämningsmannen bär utrustningen på ryggen eller att den placeras på ett mindre terrängfordon som t ex en snöskoter eller en fyrhjulig motorcykel. Ryggburen utrustning har, förutom att man

slipper fordonskostnaden, fördelen att det blir enklare att lägga ut provytor eller taxeringslinjer utan bias som härrör från terrängen. Ett fordonsburet koncept där man mäter kontinuerligt under rörelse borde dock ha störst potential att åstadkomma effektiv datainsamling.

1.3 Syfte

Rapportens syfte är att sammanställa en översikt över tekniker som skulle kunna användas för att utveckla nya skogsinventeringsmetoder som motsvarar den i föregående kapitel beskrivna visionen. Beroende på metodernas potential kommer vissa behandlas högst översiktligt medan andra som bedöms som mer framkomliga kommer att studeras närmare.

Inriktningen kommer att vara mer eller mindre automatiska markbaserade mätningar med olika typer av sensorer av i första hand grundyta, stammantal, diameterfördelning och stamposition. Rapporten gör ej anspråk på att presentera fungerande koncept utan de förslag och problemlösningar som diskuteras är visionära till sin karaktär. I första hand kommer de tekniska förutsättningarna för dylika koncept att undersökas, men arbetet avser även att beröra ekonomiska och inventeringsteoretiska aspekter.

Rapporten riktar sig till två skilda målgrupper, dels vänder den sig till personer verksamma inom skogsuppskattning och syftar till att översiktligt kartlägga befintlig teknik och dess möjligheter, dels är den avsedd för tekniker med anknytning till sensorteknik som en orientering i skogsbrukets databehov och därmed ett idéuppslag för nya produkter. Upplägget medför att delar av resonemanget, det skogliga såväl som det tekniska, kommer att vara elementärt till sin karaktär för den ej avsedda målgruppen.

1.4 Teknisk utveckling

Vid utvecklingen av inventeringsmetoder där man använder olika typer av sensorer och annan teknik som i sammanhanget får anses som avancerad, kommer man förmodligen behöva komponenter som idag ej tillverkas i större serier eller i fältmässigt utförande. Genomgående kommer uppsatsen att präglas av tro på en fortsatt allmän teknikutveckling i hög takt. De resonemang och förslag på tekniska lösningar som framförs kommer därför att grundas på antagandet att merparten av den mer sofistikerade tekniken, som idag huvudsakligen återfinns i militära eller vetenskapliga sammanhang och i regel betingar ett mycket högt pris, kommer att finnas tillgänglig på en mer allmän marknad inom de närmaste åren. Vidare antas den tekniska utvecklingen göra komponenterna lättare och energisnålare vilket är en förutsättning för att vissa av de i uppsatsen redovisade teknikerna skall kunna användas i fält.

Utvecklingstakten på datorsidan har de senaste decennierna varit mycket hög och visar inga tendenser till avmattning. (Inom datorvärlden pratar man om "Moore's lag" som säger att processorhastigheten fördubblas på 1.5 år, vilket antas gälla åtminstone ytterligare något decennium.) Därför antas inte heller egenskaper hos hårdvaran som minneskapacitet och arbetshastighet vara begränsande faktorer utom eventuellt för

komponenter som är starkt specialiserade. Utvecklingen av mjukvara torde vara svårare att bedöma då det handlar om en smal nisch och det inte finns någon allmän utvecklingstrend att lita på i samma omfattning. I uppsatsen antas dock inte de programmeringstekniska bitarna utgöra någon begränsning och kommer ej heller att bli föremål för någon närmare studie.

2. METOD

Undersökningen har huvudsakligen utförts genom intervjuer med forskare på bl a FOA, LiTH, Luleå Tekniska Universitet, Helsingfors Tekniska Universitet och Sveriges Lantbruksuniversitet, samt genom litteraturstudier.

3. KRAVSPECIFIKATION

Som tidigare nämnts i kapitlen 1.1 och 1.2, måste man för att motivera utveckling och introduktion av en ny inventeringsmetod, antingen förvänta sig lägre inventeringskostnader, data av högre kvalitet eller möjlighet att inhämta värdefull information som inte är tillgänglig med dagens metoder. De variabler som idag samlas in samt vissa variabler som skulle kunna förbättra den skogliga informationen, men som idag används sparsamt, förklaras nedan:

- **Grundyta.** Stammarnas sammanlagda vågräta snittyta i brösthöjd (1,3 meter över marken), anges i m² per hektar. Grundytan är den viktigaste ingående variabeln i en volymfunktion. Den mäts idag med relaskop eller genom klavning av samtliga träd på provytor med känd radie. Principen för ett relaskop är att man får ett mått på grundytan genom att räkna hur många stammar som fyller upp en spalt som man siktar igenom med känt avstånd till ögat då man vrider sig ett varv kring ett centrum.
- **Stamantal.** En variabel som är kopplad till grundyta och diameterfördelning. Registreras idag då man totalklavar cirkelytor. Stamantalet har för äldre skog sin största betydelse vid beräkning av drivningskostnader samt eventuellt uppföljning av skärmställningar och dylikt, anges som antal stammar per hektar.
- **Diameterfördelning.** Fördelning av diametrar för samtliga träd inom avdelningen. Man kan antingen ange hur diametrarna är fördelade över antal stammar eller över stammarnas grundyta. Används för tillväxtfunktioner för enskilda träd samt för att ge information om virkessortimentet i den stående skogen.
- **Höjd.** Trädhöjden är en variabel som är enkel men ganska tidskrävande att mäta med de manuella metoder som används i dag. Genom att göra parallaxmätningar i flygbilder kan dock godtagbara medelvärden på beståndsnivå erhållas. Förmodligen är höjden svår att mäta med någon automatiserad metod från marken.

- **Trädslag.** En snabb och enkel variabel att mäta vid manuella mätningar från marken. Registreras för varje träd vid klavning eller anges som andel av totala grundytan vid relaskopsmätningar. Trädslagsfördelningen på beståndsnivå kan även anges med hög precision vid tolkning av flygbilder.
- **Stamform.** En viktig variabel då den dels styr stammens diameter-volym samband, dels är relaterad till stockarnas kvistighet som är en viktig kvalitetsfaktor för de flesta timmersortiment. Stamformen anges ofta med ett så kallat formtal. Formtalet anger hur mycket stammens verkliga volym avviker från en cylinder med samma diameter som trädet har i brösthöjd.
- **Krongräns.** Krongränsen anger avståndet från marken till den lägst sittande gröna kvisten. Det är en mycket användbar variabel då den är kopplad både till stamform och kvistkvalitet.
- **Kronslutenhet.** Ett mått på hur stor andel av himlen som täcks av trädkronorna vid projektion rakt underifrån. Kronslutenheten förekommer internationellt på vissa håll för att definiera olika typer av skog. I Sverige används variabeln idag sällan i praktiskt skogliga sammanhang. Dock finns även här ett visst intresse för att använda den som ett mått på beståndets utveckling även här (Hagner 1997).
- **Position.** Provytans läge i beståndet är en intressant variabel om man t ex skall koppla provytedatat till flygbilder eller satellitbilder eller samla data enligt principen för avdelningsfri inventering. På riksskogstaxeringens fasta provytor registreras koordinaterna för såväl ytan som de enskilda stammarna. För det vanliga skogsbruket är dock positionen för det enskilda trädet inom ytan en variabel som inte har speciellt hög prioritet i dagsläget, men skulle kunna vara intressant för eventuella framtida avancerade planerings och skötselmodeller. Studier har gjorts huruvida trädens position i förhållande till varandra kan användas för att skapa en uppfattning av trädens konkurrenssituation, ett så kallat konkurrensindex. Konkurrensindex kan sedan användas som ingående variabel i tillväxtfunktioner. Resultaten visar att konkurrensindex under svenska förhållanden har för låg förklaringsgrad för att motivera manuell inmätning av stampositioner (Nyström 1997), men borde ändå vara ett värdefullt informationstillskott då datat skulle erhållas ”på köpet” med de flesta scannande tekniker.

De ovan nämnda variablerna har olika prioritet. I framtiden är det troligt att man även kommer söka efter andra mått på skogens tillstånd än de som används idag. Exempelvis finns idag ett behov av relevanta och objektiva mätbara naturvärdesmått som inte var aktuella några år tillbaka. Detta kan i så fall komma att innebära att andra variabler än ovanstående blir intressanta.

Virkesvolymen är den ekonomiskt viktigaste skogliga parametern. Principen för beräkning av volymen, både för ett enskilt träd och på beståndsnivå, är att grundytan multipliceras med höjden och ett mått på stamformen. Minimikravet för ett inventeringssystem som skall generera volymkattningar är därför att man erhåller ett

mått på beståndets grundyta. Det mest exakta sättet att få grundytan är att mäta stammarnas diameter var för sig på en känd provyteareal. Då erhåller man även stammantal och stammarnas diameterfördelning som är viktiga variabler för att uppskatta virkessortiment och beräkna drivningskostnader.

Även höjden är nödvändig för att skatta volymen. Trädens höjd är förmodligen en besvärlig variabel att mäta med sensorer placerade på en godtycklig punkt på marken då det är svårt att erhålla fri sikt, men då godtagbara höjdsfattningar kan fås till låg kostnad genom flygbildstolkning är det inget krav att den mäts in av ett automatiskt markbaserat inventeringssystem. Man har även gjort lovande försök med att scanna krontaket med flygburen lidar, vilket kan vara en intressant metod för framtiden (Nilsson 1996). Ett enklare alternativ är att komplettera de markburna sensormätningarna av tr addediametrar etcetera med manuella höjdmätningar.

Trädslagsfördelningen är naturligtvis en mycket viktig bestandsvariabel, men förmodligen mycket svår att mäta med någon automatisk, markbaserad metod. Precis som för trädhöjden går det dock att göra bra fattningar, åtminstone på beståndsnivå, med hjälp av flygbildstolkning, därför är det inte heller något krav att denna variabel mäts in med automatisk markbaserad inventeringsteknik.

Inmätning av ytans position kan ses som ett krav och borde enkelt gå att lösa med GPS-teknik, förutsatt att man inte har alltför höga precisionskrav, (med DGPS når man en ungefärlig noggrannhet på 4-5 meter med en inmätningstid på 5 minuter (Cedervind 1997)). Om man väljer att lösa inventeringsproblemet med sensorteknik som identifierar och mäter stammarna var för sig så skulle det genom att hålla reda på riktning och eventuell och rotation för sensorn vara möjligt att även komma åt trädens position på ytan.

Övriga nämnda variabler är något mer udda i sammanhanget och värdet av dem är svårbedömt, de kan därför inte ses som något krav. Formtalet som används vid volymsberäkningarna är funktioner med exempelvis stammens diameter och vilken region i landet trädet växer i som ingående variabler. Ett sätt att öka formtalens relevans är att ta med krongränsen som variabel. Krongränsen är även viktig för sortimentsbeskrivning då den är starkt kopplad till stammens kvalitet som timmer. Krongränsen är omöjlig att skatta med flygbildstolkningar men skulle eventuellt vara möjlig att mäta med ett automatiskt markbaserat inventeringssystem. Liksom för trädhöjden är dock sannolikt kompletterande manuella mätningar mest realistiska.

Med markbaserade automatiska sensormätningar av lämplig typ möjliggörs alternativ till de formtal som används idag, då man kan göra flera diametermätningar på olika höjd och med hjälp av dessa försöka återskapa en tredimensionell modell av hela eller delar av den enskilda stammen. Ett sådant mått på stamformen skulle både ge en bättre volymskattning och en god bild av timmerkvalitén.

4. TÄNKBARA TEKNIKER

4.1 Laser

Laser är en ljuskälla som genererar koherent elektromagnetisk strålning. Att strålningen är koherent innebär att ljuset har en hög grad av regelbundenhet i fas och frekvens. Ursprungligen kunde enbart rött ljus alstras men numera kan man framställa laserljus i de flesta våglängder.

Enkelt kan laserns uppbyggnad och funktion beskrivas som ett aktivt medium placerat mellan två speglar, varav en är halvgenomskinlig. Ljus med hög intensitet tillförs mediumet pulsvis via en blixtlampa (se fig. 2). Med aktivt medium menas i det här fallet att mediumets atomer exciteras vid tillförseln av fotonenergin från blixtlampa för att sedan emittera ljus vid återgången till en lägre energinivå.

Normalt dämpas en infallande ljusstråle då den passerar ett medium och atomer på lägre energinivåer övergår till högre, men genom den pulsvisa energitillförseln och den illustrerade uppsättningen av speglar erhålls en "pumpmekanism" där ett överskott av atomer på de högre energinivåerna skapas, vilket istället förstärker den emitterade strålningen. Beroende på mediumets och speglarnas konstruktion kan laserstrålen komma pulsvis eller vara kontinuerlig.

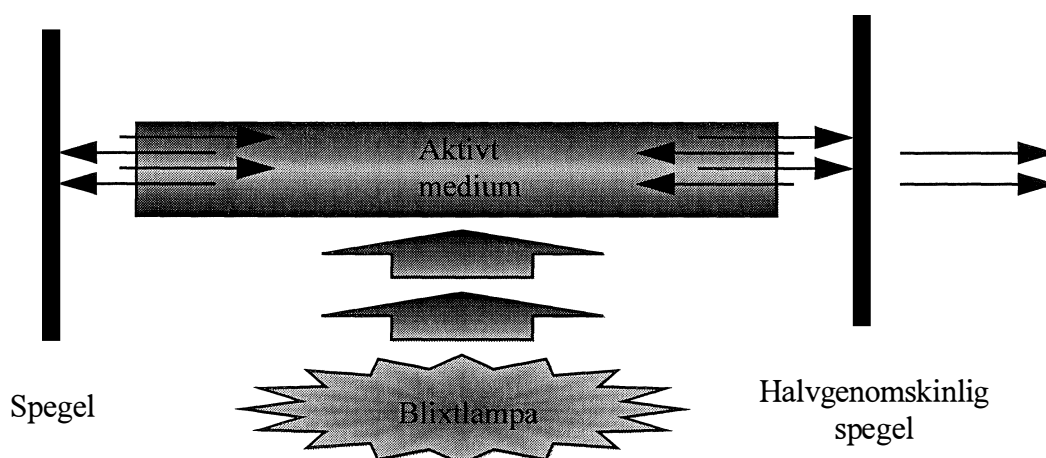


Fig. 2. Schematisk bild av pulslaserns uppbyggnad.

Det alstrade ljusknippet är monokromt med ett frekvensomfång på mindre än 1 Hertz. Strålen går att göra mycket intensiv och i stort sett parallell vilket ger lasern flera attraktiva och unika egenskaper som informationskälla för sensorer.

En inom mätteknikens område ofta använd laserapplikation för att göra avståndsupplösta mätningar är olika typer av ladar eller lidarsystem (lidar står för *light detection and ranging* medan ladar är en annan benämning för samma teknik som står för *laser detection and ranging*, jämför radar). Metoden påminner om radar men istället för radiovågor används

laserpulser. Ett lidarsystem består av en pulslaser som sändare och en detektor. Detektorn registrerar gångtid för pulserna och intensiteten hos retursignalen. Jämfört med radar kan man uppnå mycket hög vinkelupplösning, men man har dock inte radarns förmåga att "se igenom" siktförsämrande väderlek eller störande objekt.

En annan laserbaserad mätteknik avsedd för att analysera mer materialspecifika egenskaper är så kallad flourscenslidar. Metoden går ut på att ett objekt belyses med en laserstråle med såpass högt energinnehåll att atomerna i det träffade objektet exciteras. Strålningen som emitteras från objektet analyseras sedan med avseende på fördelningen av våglängder. Frekvenssignaturen är beroende på materialets sammansättning och därigenom kan man hämta information om objektet.

Lidar kan även användas för att mäta ett materials absorberande egenskaper. Man låter strålen passera materialet för att sedan träffa ett objekt med känd reflektans. Därefter detekteras strålen och intensiteten jämförs med om den hade gått genom ett referensmedium. Metoden kallas absorbtionslidar och har huvudsakligen använts för att mäta föroreningar i vatten och luft. Absorbtionslidar har dock inget uppenbart användningsområde som hjälpmedel för skogsuppskattning och kommer därför inte beskrivas närmare.

4.1.1 Scanning med lidar

Den för skogsuppskattning intressantaste laserbaserade metoden är scanning med lidar i två eller tre dimensioner. Principen för metoden är att man sveper med lidarsensorn över den sektor som skall scannas. Genom att mäta gångtiden för laserpulsen erhålls ett avstånd till närmaste hinder. Med bra utrustning blir avståndsupplösningen någon cm. För att kunna svepa i planet måste man antingen montera en roterande spegel inne i instrumentet eller placera lasern på något sorts roterande stativ.

Genom att mäta rotationen kan man hålla reda på vinkeln mellan ett registrerat eko och laserns startpunkt. På motsvarande sätt måste laserstrålen kunna vippas i höjddled om man skall kunna scanna tredimensionellt. Genom att räkna samman vinkel och avståndsdata kan man skapa en två eller tredimensionell bild över de olika ekona. Ur en sådan bild skall sedan stammarna detekteras. För att lasern skall kunna användas för att skapa användbara modeller av verkligheten måste vinkelupplösningen i mekaniken vara hög. De inmätta uppgifterna lagras digitalt och med korrekta uppgifter kan stammarnas diameter beräknas med enkel geometri.

På Linköpings Tekniska Högskola har man gjort praktiska försök att mäta in trädstammars position och tredimensionella form med scannande lidar (Högström 1997). Utrustningen som användes var en lidarsensor med en mät hastighet av 3000 mätningar per sekund. För att kunna scanna med lidarn användes i denna laboratorieprototyp en spegelkonstruktion som kunde vridas 180° horisontellt och 30° vertikalt med en upplösning på två respektive en tusendels radian. Hela utrustningen monterades på en mobil robot. På roboten placerades även en PC och en ccd kamera avsedda i första hand för robotens navigering.



Fig. 3 Bild tagen med ccd-kamera och vidvinkel objektiv från den skog där lidarmätningarna utfördes. Vinkeln är inte riktigt densamma som i lidar bilderna i figur 4 men bilden ger ändå en uppfattning om skogstyp och siktförhållanden (Högström 1997).

Genom att låta lidarn scanna av en sektor i både höjd och sidled erhålls en mängd data om avstånd till närmaste objekt i olika riktningar. Datat kan därefter användas för att skapa en tredimensionell bild. Genom att låta gränivån för pixlarna i en bild vara beroende av avståndet till objektet kan man åskådliggöra bilden tredimensionellt enligt figur 4.



Fig. 4. Tredimensionell bild av lasermätningarna där pilarnas gråton visar avståndet till objektet. I den högra bilden har pixlarna klistrats till 12 grånivåer som var och en representerar 2.5 m i djupled och svart är 30 m bort. (Högström 1997)

För att kunna mäta variabler som diameter eller som i det här fallet hela stamformen krävs en omfattande bearbetning av data. I Högströms rapport har följande uppställning av databearbetningsproblemet gjorts:

- Identifikation och lokalisering av de enskilda träden och markytan.
- Anpassning av geometriska modeller till datat. I stammarnas fall generaliserade cylindrar och för marken ett utjämnat plan.
- Identifikation och behandling av andra objekt än träd och mark.
- Utnyttjande av informationen av flera scannningar tagna från olika punkter. Anknytande problem blir i så fall orientering mellan mätpunkterna och behandling av objekt som rör sig mellan de olika mätningarna.

Datat från mätningarna registreras dels som en lägesangivelse i ett tredimensionellt koordinatsystem och dels som returnens intensitet. Genom att projicera mätningarna viktade med amplituden på ett plan får man ett tvådimensionellt histogram med höga värden där det finns vertikala strukturer vilket i naturen normalt endast kan häröra från stammar eller lodräta klippor.

Efter att träden lokaliserats segmenteras mätningarna vertikalt genom att man bildar cylindrar med viss radie utgående från objektets tyngdpunkt, varefter de mätningar som ryms inom cylinderns väggar räknas till objektet. Genom att studera objektets geometri finns sedan möjligheter att avgöra om det är ett träd eller något annat. Resultatet av lokalisering och segmentering av objekten i bilderna i figur 4 visas i figur 5.

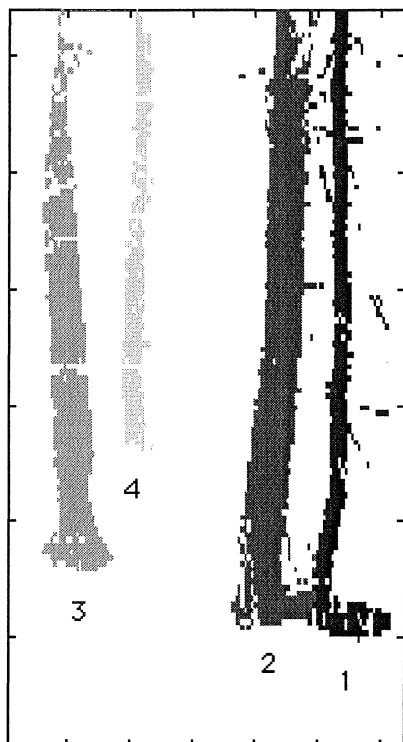


Fig. 5. De fyra stammarna från fig. 4 efter att man har identifierat objekt med vertikal utbredning och sedan räknat in alla mätningar som ryms inom en vertikal cylinder med förutbestämd radie utgående från objektets centrum. Träden är numrerade efter ökande avstånd från ytcentrum (Högström 1997).

En annan lidar-applikation som förtjänar att nämnas även om det handlar om en manuell metod, är handburna laserpekare med vilken man kan mäta avstånd till stammarna och trädens höjd. Ett exempel är det amerikanska företaget Laser Techs laserpekare Criterion 400 som marknadsförs som ett mätinstrument avsett för skogsuppskattning.

4.1.2 Laser flouoscens

Om materia bestrålas med tillräckligt stora mängder med energi exciteras atomernas elektroner och materien kommer att utstråla mer energi än som tillförts. Våglängdsspektrat för den från materian utstrålade energin är unikt för varje enskilt ämne. Fenomenet kallas flouoscens och kan användas för att på avstånd identifiera olika ämnen eller avgöra kvalitéer på material.

Ett sätt att tillföra tillräckliga energimängder för att inducera flouoscensen på avlägset belägna objekt är bestrålning med laser i uv-området. Metoden har utnyttjats på försöksnivå för att studera skogsskador i trädkronor. Teoretiskt kan man tänka sig att tekniken kan användas för att mäta materialberoende variabler som är intressanta ur skogsinventeringssynpunkt, exempelvis trädslag. I praktiken får man dock sätta en parentes kring metoden då utrustningen som krävs för att inducera och analysera flouoscensen är mycket energikrävande och skrymmande. En utrustning som vore operativ i fält är därför förmodligen en omöjlighet inom överskådlig framtid, som exempel så transporterades den utrustning som användes vid de tidigare nämnda skogsskademätningarna på lastbil och mätningarna kunde således endast göras i anslutning till väg.

4.2 Fotogrammetriska metoder

Om man kombinerar bildanalys med fotogrammetrisk mätning borde det vara möjligt att mäta skogliga variabler med hjälp av bilder tagna från marken i horisontell riktning. För att kunna bearbeta bilder i datorprogram krävs att bilden lagras digitalt. En digitalt lagrad bild består av en pixelmatris där strålningsintensiteten i respektive pixel registreras som ett numeriskt värde. Normalt registreras intensiteten i 256 nivåer

De sensorer som används för att ta digitala bilder är antingen sensorer av svepradiometertyp eller så kallade CCD-kameror (Charge Coupled Device). CCD-kameror fångar bilddatat på en matris på motsvarande sätt som en vanlig kamera exponerar en fotografisk film. Svepradiometern däremot sveper radvis över bilden pixel för pixel. Svepradiometrar är vanliga vid datainsamling för fjärranalys, t ex från satellit, men CCD-kameror är på grund av pris och storlek förmodligen lämpligare vid insamling av bilddata från marken. CCD-sensorer kan tillverkas för både färg och svartvit upptagning och med en rad olika matrisstorlekar. Till skillnad från vanliga kameror finns ingen utbytbar film som avgör vilka våglängder som registreras utan detta definieras antingen i sensorns optik eller genom att man med hjälp av olika filter bestämmer vilka våglängder som släpps igenom.

Digitala bilder har ännu så länge sämre geometrisk upplösning än fotografiska. Den geometriska upplösningen begränsas av antalet pixlar i bilden. Upplösningen anges som pixelstorleken multiplicerat med bildskalan alternativt hur smala linjer som kan särskiljas i bilden. Storleken på ett CCD-element är normalt ca 10 x 10 mikrometer, vilket kan jämföras med de silverkorn som genom sin kornstruktur bygger upp gråskalan hos en fotografisk film, vars diameter är ca 0,1 mikrometer. Silverkornen och CCD-elementen kan dock inte jämföras utan vidare då silverkornen endast kan vara svarta eller inte svarta medan CCD-elementen kan registrera gråvärden på 256 nivåer.

För att t ex kunna mäta stammarnas diameter i en bild krävs att man vet avståndet mellan kameran och objektet. Avståndet mellan kamera och objekt fås antingen genom parallaxberäkningar i en stereoupptagning eller genom separat avståndsmätning om man arbetar med enkla bilder, förslagsvis med lidarteknik eller eventuellt ultraljud.

En metod som skulle kunna användas för att mäta objektavstånd då man har en enkelmonterad kamera i rörelse är s k "optical flow". Principen för metoden är att man med känd hastighet på kameran studerar hur snabbt objekt i bilden rör sig från bildkant till bildkant. (Enligt Gunilla Borgefors vid Centrum för bildanalys är dock hastighet en variabel som är svår att bedöma med någon större noggrannhet i en digital videoupptagning). Med känt objektavstånd kan sedan trädens diametrar beräknas med antalet pixlar som täcks av stammen i bilden som indata. Diametermätningarnas precision är förutom bildens geometriska upplösning beroende av precisionen i avståndsmätningen och resultatet av bildanalysen. För att kunna beräkna träddiametrarna måste även kamerans inre geometri vara känd.

Fördelarna med videoteknik gentemot att använda sensorer som laser och radar är att man kan erhålla hög precision i diametermätningen samt att det finns mer robusta och billigare standardprodukter. Datainsamlingen går dessutom snabbt jämfört med scannande tekniker, särskilt om ett större segment av stammen skall mätas in. Utrustningen borde även gå att göra relativt energisnål, vilket är viktigt då strömförsörjningen kan bli en begränsande faktor i sammanhanget. Eventuellt kan även andra variabler än diameterfördelningen mätas in, t ex trädslagsfördelning och stamform.

Nackdelen med optisk teknik är framförallt att man får problem med stammar som skyms av grenar och undervegetation då möjligheten att se igenom finare grenverk saknas tillskillnad från radar. Bildanalysen kan också bli besvärlig med de varierande ljusförhållanden som råder i en skog samt att uppgiften att hitta stammarnas kanter mot en snarlik bakgrund i sig kan vara ett besvärligt problem. Digital bildteknik ställer dessutom stora krav på datorns minneskapacitet.

4.2.1 Bildanalys och matchning

Skall man plocka ut information om objekt i en bild med hjälp av databehandling krävs att objekten lokaliseras, identifieras och kategoriseras. Att automatiskt detektera och urskilja objekt ur en digital bild är i sig ett avancerat problem men träd får ändå betraktas som relativt enkla objekt med förutsägbar form och utbredning.

För att få korrekta diameterskattningar krävs att man kan detektera stammens kanter med hög precision. Stammens runda form kan här vara ett problem, men om likartade ljusförhållanden råder i bilden underlättas kantdetektionen och det borde vara möjligt att använda någon slags standardkorrektion för att kompensera för avrundningen. Rätt ljus skulle kunna skapas med hjälp av blixtn eller fast belysning.

Om man använder sig av stereo för avståndsbedömningen tillkommer problemet med att kombinera samma objekt i flera olika bilder. Problemet kan till stor del avhjälpas genom att metoden görs interaktiv. Operatören som bearbetar bilddatat skulle i så fall kunna rycka in och manuellt koppla ihop objekten där man inte automatiskt kan få en korrekt matchning.

4.2.2 Fotogrametri i digitala bilder med känt objektavstånd

Den enklaste metoden för att mäta diametrar med hjälp av digital bildteknik är att fotografera trädet på känt avstånd. I Finland har man som ett samarbete mellan Finska Skogsforskningsinstitutet (METLA) och Helsingfors Tekniska Universitet nyligen startat ett forskningsprojekt där man praktiskt testar en sådan metod. Målsättningen är att med en enkel och robust utrustning snabbt kunna bestämma formen hos en stor del av stammen. Tillämpningen är i första hand provträdsräkning i samband med Riksskogstaxeringen samt att underlätta bedömningen av stamform i vetenskapliga sammanhang utan att man behöver fälla träden, exempelvis vid framtagande av volymfunktioner. Om utvärderingen av mätresultaten faller väl ut och metoden visar sig operativ hoppas man dock att även andra användare skall vara intresserade.

Hittills har de finska försöken verkat lovande. Med den utrustning som används idag når man åtta meter upp på stammen vid ett mätavstånd på tio meter. Tanken är att man med hjälp av bildanalys skapar en avsmalningsfunktion för de åtta metrarna och fyller på med en extrapolerad avsmalningsfunktion för den återstående stammen. Längre fram har man planer på att placera två kameror ovanpå varandra för att på så sätt fånga ytterligare delar av stammen. De vid den här typen av mätningar ständigt återkommande problemen med skymmande grenar och undervegetation har man gott hopp om att lösa genom den algoritm som urskiljer stammen. Man hoppas kunna urskilja de delar som man ej kommer åt visuellt genom att utnyttja avsmalningsfunktioner och interpolation.

4.2.3 Enkelmonterad ccd-kamera med lidar

Den ovan nämnda tekniken där man gör fotogrammetriska mätningar i digitala bilder med känt objektavstånd lämpar sig för mätning av enskilda provträd. Vill man däremot använda samma fotogrammetriska teknik för automatiserad inmätning av hela provytor måste avståndet till stammarna mätas separat, lämpligen med laser. Lasermätaren kan då också användas till att approximativt bestämma stammens position, vilket underlättar bildbehandlingen då man vet vilket segment i bilden som är aktuellt för analys.

Mätningar med den här typen av utrustning har gjorts som elevarbete vid Luleå tekniska högskola (Johansson m fl 1996). Då detta är ett av få praktiska försök som gjorts inom ämnet för rapporten förtjänar det en närmare beskrivning.

Det bör tas i beaktande att försöket var mycket experimentellt till sin karaktär, både vad gäller utrustningen och miljön. Mätningarna gjordes i ren stamskog med lite eller ingen undervegetation. Av de i rapporten bifogade fotografierna att döma gjordes bildupptagningen dessutom mot en hyggeskant så att bakgrunden till stor del utgjordes av himmel, vilket avsevärt underlättar den efterföljande bildhanteringen. Utrustningen som användes var en lidar och en CCD kamera. Ledarns uppgift var att mäta upp avståndet till träden samt att bestämma deras position.

Trots att miljön var relativt fri från störningsmoment innehöll lidarbilderna ett antal sk spuriöser. Spuriöser är ett slags skenträffar som uppstår då man får kanträff på två föremål på olika avstånd, lidarn registrerar då returen som en träff mittemellan objekten. Den i experimentet rikliga förekomsten av spuriöser förklaras till stor del av att utrustningens laserstråle var väl grov för ändamålet (ca 40 mm). Vid ytterligare utveckling av metoden borde spuriöserna till stor del gå att filtrera bort samtidigt som förekomsten skulle minska betydligt om man använde laserstrålar med mindre diameter.

Datat som mäts in med lidar-sensorn lagras som avstånd, vinkel och retursignalens intensitet, objekt med ett avstånd över en viss gräns kan då enkelt avskiljas. Databehandlingen börjar sedan med att man urskiljer de retursignaler som härrör från stamträffar och de som är av annat ursprung.

För att kunna göra tolkningar angående vad man träffar och för att kunna positionsbestämma stammens kanter inför bildbehandlingen krävs minst två och helst flera träffar per stam, vilket förutsätter en viss vinkelupplösning i lidarn. Vinkelupplösningen blir en avgörande faktor för hur långa avstånd utrustningen kan användas på och hur små diametrar som kan mätas in. Den utrustning som användes i det aktuella experimentet hade en upplösning som inte tillät inmätning av träd under 20 cm på ett avstånd över 10 m, men att finna utrustning med bättre precision än så borde inte vara något problem.

Genom att orientera kamerans siktfält i förhållande till lasermätningen kan de bildsegment som är aktuella för analys tas fram. Bildanalysen i försöket utfördes sedan i flera steg. Trots att bilderna till större delen hade en ren bakgrund i avvikande färg uppstod vissa problem med att hitta trädets konturer, t ex när stammarna täckte varandra så att det främre trädet skulle urskiljas mot en snarlik bakgrund. Genom att räkna antalet pixlar mellan stammens kanter kan man med hjälp av det uppmätta avståndet beräkna trädets diameter.

Ett stort problem då bildupptagningen görs från en punkt är att man i normalfallet får ett betydande antal stammar som helt eller delvis skymmer varandra. Problemet kan avhjälpas genom att areal som skymms i bilden dras av från provytearealen. Tyvärr uppstår då andra, förmodligen svårösta, statistiska problem eftersom träden inte är slumpmässigt placerade utan snarare gruppställda, vilket gör glesare delar av beståndet överrepresenterade. En annan tänkbar lösning är att samma yta mäts in från två eller flera punkter (se figur 6).

Om man mäter in ytan från två eller flera punkter krävs en intern orientering med hög precision mellan mätpunkterna. Ett enkelt sätt att lösa problemet är att manuellt mäta upp riktning och avstånd till den nya mät punkten med syftkompass och måttband eller avståndsmätare som utnyttjar t ex ultraljud. Samtidigt krävs då att man har någon slags väderstrecksangivelse för den första mätpunkten, till exempel genom bildcentrum.

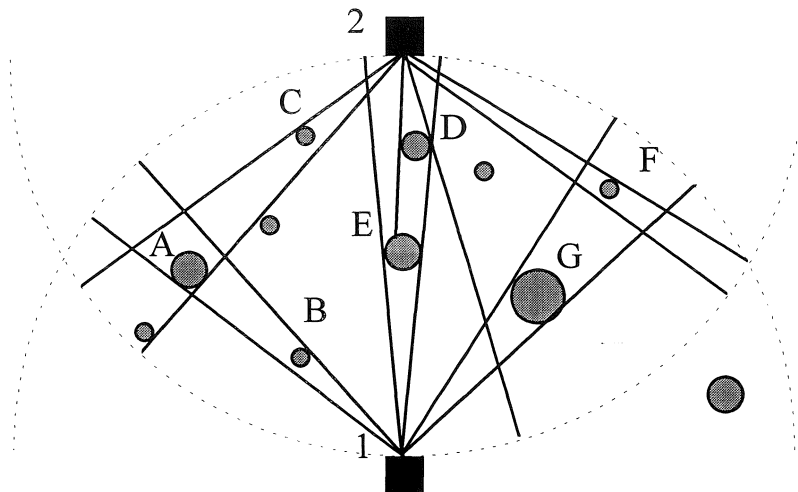


Fig. 6 Ett exempel på hur stammarna skulle kunna skymma varandra vid scanning och hur problemet kan avhjälpas genom att mäta från ytterligare punkter. Om man enbart scannar från punkt 1 kommer stammarna vid A, D och F att vara skymda av stammarna B, E och G. Om man kompletterar med en mätning från punkt 2 skulle även D och F kunna mätas in. Stam A är dock fortfarande dold av stammen vid C, alltså måste man i det här fallet mäta från ytterligare någon punkt för att samtliga stammar skall vara synliga. Samtidigt krymper provytan desto fler mätpunkter man väljer om man scannar sektorer med samma radie från all mätpunkter. Detta åskådliggörs i bilden av de streckade linjerna.

4.2.4 Stereomontage

Ett alternativ till att mäta avstånden separat med laser är att ta in stereobilder från två eller flera separata kamerapositioner. Utifrån stereobilderna kan man sedan med hjälp av parallaxmätningar beräkna avstånd i djupled. Metoden kräver att man lyckas matcha objekten i de båda bilderna mot varandra. Matchningen bör helst ske automatiskt om metoden skall anses som effektiv, men ett alternativ är att man gör bildupptagningen i skogen för att sedan manuellt matcha objekten från båda bilderna mot varandra. Förutsatt att matchningen lyckas kan sedan parallaxberäkningarna enkelt utföras i datorn.

Om man har kamerorna någorlunda brett monterade kommer de flesta träden att synas i åtminstone en av kamerorna om man filmar från en godtycklig punkt, förutsatt att inte ett grövre träd hamnar alltför nära mätpunkten. Problemet med stammar som täcker varandra kvarstår dock, då man förlorar det nödvändiga stereoseendet om objektet endast iakttas med en kamera.

En lösning på problemet är att montera tre eller flera kameror i bredd för att på så vis förhoppningsvis få fri sikt mot objektet med minst två kameror. Ett montage med flera kameror i bredd kan verka otympligt men man får då betänka att CCD kamerorna kan göras mycket små (de minsta ungefär som en tändsticksask), så ur den synvinkeln borde det vara möjligt att konstruera en operativ utrustning. Även om man har ett rimligt brett montage med flera kameror, kommer förmodligen alltid en och annan stam enbart synas i en, eller i värsta fall ingen kamera. Antagligen måste därför överlappningsproblemet, åtminstone delvis, lösas genom statistiska beräkningar även då man använder stereo teknik.

Fördelarna med stereomontage gentemot enkelmontage kombinerat med lasermätning är att utrustningen blir enklare, robustare och billigare då man slipper lasermätningen och tillhörande teknik. Stereobilden kan även innebära vissa fördelar för själva bildbehandlingen då man har mer bilddata per stam. Man behöver dock minst en extra kamera och förmodligen mer avancerad dator teknik för behandling och lagring av stereobilderna.

4.2.5 “Optical flow”

Om man har en filmsekvens där kameran rör sig i vinkel mot kameraxeln med känd hastighet kan man beräkna avstånd till objekt i bilden genom att mäta hur snabbt dessa rör sig från bildkant till bildkant. Diametrarna skulle sedan kunna beräknas på sedvanligt vis. Samma effekt kan inte erhållas om man roterar kameran, då en vridning av kameran medför att hastigheten med vilken bildkanten rör sig mot objektet är proportionell mot avståndet till objektet. Metoden är därför i första hand aktuell för kontinuerliga mätningar, lämpligen då man kör ett fordon genom beståndet med kameror monterade så att de är riktade vinkelrätt genom beståndet. Att ha utrustningen monterad på någon sorts fordon är förmodligen nödvändigt för få en godtagbar hastighetsmätning. Då metoden kräver video-upptagningar av ett stort antal bilder kommer identifikation av objekt att vara ett minst lika stort problem som vid analys av stereobilder. I övrigt skulle tekniken vara robust med få komponenter och skulle inte kräva separat avståndsmätning med exempelvis lidar.

4.3 Radar

4.3.1 Allmän teori

Radar är en förkortning för “*radio detection and ranging*” och är en sensorteknik som gör det möjligt att bestämma avstånd och riktning till ett objekt. Principen för radar är att man sänder iväg en radiosignal i en viss riktning och studerar eventuella ekon.

En fördel med radar gentemot optiska metoder är att man inte är beroende av ljus utan kan se genom mörker, dimma och nederbörd. Radar kan, beroende på vilken våglängd som används, även “se igenom” mindre föremål (objekt högst i storleksordningen halva våglängden). Detta är en egenskap som gör tekniken attraktiv för skogsuppskattningsändamål då det öppnar möjligheter att se igenom tunnare vegetation, som fina grenar, sly och löv.

Utsändning och mottagning av radarsignalen kan ske enligt flera olika principer. Den enklaste och vanligaste metoden är så kallade pulsradar, som innebär att man sänder signalerna regelbundet och pulsvis med tillräckligt lång paus mellan varje puls för att hinna ta emot och registrera ekot av de föregående. Fördelen med pulsradar är att mottagningen förenklas då man kan använda samma antenn som både sändare och mottagare samt att ingen modulation av pulserna behöver göras för att kunna identifiera vilka utsända och mottagna pulser som hör ihop. Avståndsberäkningen till objektet blir därigenom enkel då man bara behöver mäta tidsfördröjningen mellan utsänd och mottagen puls. Tidsintervallet mellan pulserna är beroende av hur avlägsna objekt man vill mäta.

Radarsignalens egenskaper avgörs till stor del av vilken bärfrekvens man väljer. Tre viktiga egenskaper som är beroende av signalens våglängd är:

- *Lobbredd (vinkelupplösning).* Loben, som är benämningen på radarsignalens rumsliga utbredning, är direkt beroende av våglängden enligt formeln $\varphi = \frac{\lambda}{d}$, där φ är lobbredden i radianer, λ är våglängden och d är antennens diameter. Kortare våglängd innebär därför högre vinkelupplösning för en given antenndiameter.
- *Reflexionsegenskaper.* Våglängden avgör i vilken omfattning signalen returneras från ett objekt. Generellt gäller att objekt som är små i förhållande till våglängden (mindre än halva våglängden) ger ingen eller svag retursignal. Ekots intensitet ökar sedan för att närma sig ett maxvärde då objektstorleken överstiger våglängden. Ytterligare ökning av objektets storlek leder därefter inte till någon nämnvärd ökning av retursignalens intensitet. Förutom objektets storlek har materialets elektriska ledningsförmåga betydelse.
- *Energiförbrukning.* Desto högre frekvenser man använder desto mer energi går åt för att alstra en viss uteffekt. Under normala förhållanden är detta sällan något problem, åtminstone inte för frekvenser upp till 10 GHz. För utrustning som ska vara operativ för inventeringar i fält kommer det dock att ställas stora krav på vikt och indirekt därför även på låg energiförbrukning. Då det för inventeringsändamål kommer att vara intressant med höga frekvenser är det möjligt att detta blir en begränsande faktor.

Principiellt kan man tänka sig två metoder för mätning av trädens diameterfördelning med hjälp av radar. Dels mätning med vad som här får kallas långvåg där man använder radar med våglängder i samma storleksordning som de klenaste diametrar man önskar att mäta och registrerar intensiteten på retursignalen för de olika objekten, dels kortvåg där man använder en högfrekvent radar med hög vinkelupplösning för att scanna in avstånd och vinkel till stammens kanter på motsvarande sätt som för ett lidarsystem. Det finns både positiva och negativa aspekter på båda metoderna, vilka redovisas separat nedan.

4.3.2 Långvåg

Om man använder radar med våglängder i samma storleksordning som den nedre gränsen för de diametrar man vill mäta uppstår möjligheter att finna stammar även då de är skymda av grenar och stammar i klenare diametrar eller annan finare vegetation. Då radarsignalen reagerar förhållandevis lite för föremål mindre än halva våglängden är det intressanta våglängdsområdet ur den här synvinkeln ca 5-10 cm (c eller s band). Radar med lägre frekvens får förmodligen svårt att ge någon användbar retursignal på de mindre diametrarna.

Problemet med att använda radar med låga frekvenser är att signalen får dålig vinkelupplösning. Om man då har objekt som står nära varandra får man problem med att separera retursignalerna för respektive objekt. Eftersom retursignalens intensitet antas vara proportionell mot objektets diameter kommer exempelvis två närliggande stammar med 20 cm diameter ge en liknande retur som en stam på 40 cm medan grundytan som är den variabel man i slutändan vill åt är 628 cm^2 för de två klenare stammarna resp 1257 cm^2 för den grövre stammen.

Trots problemet med att urskilja de enskilda stammarna kan man anta att de insamlade radarekonas intensitet i någon mån korrelerar med grudytan. En jämförelse kan göras med de radar mätningar mot skog som gjorts från luften med försvarets CARABAS-radar. CARABAS-radarn använder våglängder upp till 15 meter, och retursignalens intensitet har klart korrelerat med virkesvolymen hos skogen (Walter 1997) trots att ett liknande problem med urskiljning av enskilda stammar existerar. Det bör här tas i beaktande att korrelationen inte behöver vara särskilt hög om metoden är tillräckligt kostnadseffektiv med avseende på mängden data som samlas in.

Dylika mätningar från marken skulle förmodligen kunna förbättras genom att förättningsskottet översiktligt delar in skogen i olika kategorier, exempelvis grov, mellan och klen eller att man använder flera olika våglängder och tolkar skillnaden i retursignalernas intensitet. Visar det sig möjligt att hämta någon betydande information ur den här typen av mätningar är det förmodligen en relativt enkel robust teknik som skulle möjliggöra en effektiv datainsamling.

4.3.3 SAR

Som tidigare nämnts är sändarantennens storlek avgörande för radarsignalens vinkelupplösning och därmed förmågan att särskilja träd som står nära varandra. Då den i skogen praktiska användningen sätter relativt snäva gränser för antennens utformning är det svårt att bygga sändare med hög vinkelupplösning i de aktuella våglängdsbanden.

En metod som ofta används för att kompensera för små antenner är så kallad syntetisk appertur radar (SAR). Syntetisk appertur innebär att man simulerar en stor antenn genom att göra flera mätningar längs en linje medan mottagarantennen förflyttar sig. Den simulerade antennens längd blir då lika med avståndet mellan den första och sista mätpunkten. Ett krav för att metoden skall kunna användas är att man har en relativt noggrann intern orientering mellan mätpunkterna. Tekniken är vanlig vid mätningar med lågfrekvent radar från flygplan och satelliter men skulle enligt Sune Axelsson och Lars Ulander på FOA i Linköping vara teoretiskt möjlig att använda vid markbaserade mätningar för att särskilja olika stammar från varandra.

4.3.4 Kortvåg

Vill man ha en relativt hög vinkelupplösning med praktiskt användbar antennstorlek måste man använda högfrekventa signaler med våglängder runt millimetern. Med våglängder runt millimetern kommer man att få problem med skymmande vegetation men man har ändå en viss genomträngande effekt för barr, löv och de allra klenaste grenarna.

Vinkelupplösningen blir dock förmodligen aldrig jämförbar med lidar och vinkel/avståndsmätningar med tillräcklig precision på provytor av den typ och storlek som används i dag (cirkelytor 5-10m) är troligtvis omöjliga. En lösning skulle därför vara en alternativ utformning på provytorna som kortade avståndet mellan mätutrustning och de mest avlägsna mät objekten, men samtidigt ger tillräckligt med information i förhållande till insatsen.

En tänkbar lösning skulle kunna vara bandtaxering där man mäter kontinuerligt under rörelse längs en linje. Om man väljer en bandbredd på 3-5 meter och mäter längs en linje i mitten av provytan kommer radarn att scanna på högst 1.5-2.5 m vilket borde vara rimliga avstånd för mätningar med hög precision. Lyckas man mäta kontinuerligt med normal gånghastighet borde datainsamlingen bli väl så effektiv som cirkelyteinventering.

4.4 Ultraljud

Ett alternativ till att använda radiovågor är ultraljud. Principen är den samma som vid scanning med lågfrekvent radar. Fördelen med ultraljud är att det finns relativt billiga standardkomponenter tillgängliga på marknaden. Tekniken har dock flera nackdelar, t ex är det svårt att få acceptabel vinkelupplösning och ultraljuds signalen tappar mycket energi då den transporteras genom luft, vilket man måste ta hänsyn till när man bearbetar retursignalen.

4.5 Uppåttittande tekniker

En något udda variabel som tycks relativt lätt att mäta med automatiska metoder är kronslutenheten. Idag används kronslutenheten mycket sällan, dels för att den inte passar in i de beståndsbeskrivningar som används och dels för att det inte funnits någon snabb metod för att mäta denna direkt i fält utan man får använda tabellvärden baserade på beståndets grundyta och medelhöjd. Dock skulle det förmodligen för vissa alternativa skötselmetoder vara ett värdefullt mått beståndets utveckling. Till exempel för den omdiskuterade naturkulturmetoden med selektiva avverkningar och sk berikande föryngring i det kvarvarande beståndet.

Generellt borde kronslutenheten vara ett värdefullare mått i flerskiktade bestånd än i sådana med jämnt krontak. Å andra sidan kanske den är så hårt korrelerad till höjd och grundyta i helt jämna bestånd att man skulle kunna få ett acceptabelt mått på grundytan genom att omvänt läsa av samma typ av tabeller som används för att ta fram kronslutenheten idag.

För att få en bra skattning av kronslutenheten genom att mäta på slumpvis utlagda punkter krävs förmodligen en relativt stor arbetsinsats då variabeln har stor varians inom beståndet och avståndet från mätpunkten till närmaste stam ger ett stort utslag. Nedan redovisas tre olika typer av tänkbara sensorapplikationer för att mäta kronslutenheten, varav en får betraktas som utvecklad och fungerande medan de andra är av hypotetisk karaktär.

4.5.1 Video

En metod som redan utvecklats och testats praktiskt för skoglig användning är automatisk analys av andelen himmel och trädkronor i digitala bilder tagna rakt upp. Ett instrument kallt Hagner Crown Closure Meter och har utvecklats av professor Mats Hagner vid SLU (Hagner och Hällström 1997).

4.5.2 Radar

Radar vore förmodligen ett tänkbart alternativ till video för den här typen av mätningar. Fördelarna gentemot den billigare och enklare video tekniken är dock inte lika tydliga här som vid inmätning av de enskilda stammarna, eftersom det är graden av visuell täckning man vill åt och således inte behöver någon genomträngande signal. Å andra sidan är det fullt tänkbart att ekot för radiosignaler i olika våglängder innehåller intressant information utöver vad som finns i definitionen av kronslutenhet. Exempelvis borde man få ett mått som bättre speglar krontaketets totala grönmassa, vilket skulle kunna vara till hjälp för att detektera skogsskador.

Ett inte obetydligt problem om man skulle använda radar är att trädkronornas reflektionsegenskaper påverkas av fukt, vilket man troligtvis måste kalibrera för vid varje mättillfälle.

4.5.3 Passiv mikrovågs radiometri

Ett alternativ till att aktivt sända ut radarsignaler för att sedan registrera returen är att studera infallande kosmisk strålning och jämföra denna med en helt öppen referensyta. Skillnaden mellan det som mäts upp under krontaket och referensytan borde sedan kunna användas som ett mått på krontaketets slutenhet. Precis som vid användning av radar påverkar fukt i trädkronorna mängden infallande strålning, men på grund av den långa färdvägen genom atmosfären kommer även luftfuktigheten att ha betydelse.

5. LÖSNINGAR PÅ PRAKTISKA PROBLEM

Oavsett vilken teknik man använder uppstår en rad praktiska problem om man försöker automatisera insamlandet av beståndsdata. De mest påtagliga problemen rör transport och energiförsörjning av utrustningen i fält.

5.1 Orientering och positionsbestämning

Positionsbestämning av provytepunkter behövs dels för att kunna lägga ut punkterna objektivt och på önskad plats i fält och dels för att koppla fälldata till data insamlat med fjärranalys. Objektiv utläggning av provytor görs idag normalt så att man i förväg lottar ut en punkt på kartan från vilken ett rutnät av provytepunkter med lämpligt förband och orienterat i bestämd riktning får utgå. I fält orienterar man sedan till punkterna med kompass och mätlina. Den metoden fungerar tillfredsställande så tillvida att inte förättningsmannen i någon större utsträckning kan påverka vart mätpunkten hamnar. Däremot kan den verkliga mätpunktens position skilja sig avsevärt från vad som markerats på kartan då det finns åtskilliga felkällor vid såväl kartritning som orienteringen i fält. Informationen om ytans position i fält blir därför inte tillräcklig för att geografiskt kunna koppla provytedatat till exempelvis satellitbilder där man vill ha en noggrannhet om ca 5 meter. En annan nackdel med dagens metod är att sträckmätning med mätlina kan vara ganska tidsödande i besvärlig terräng då det förutsätter att man går någorlunda rakt fram.

Ett alternativt sätt att lösa orientering och positionsbestämning är att använda GPS-teknik. GPS används redan idag i inventeringssammanhang, bland annat för positionsbestämning av Riksskogstaxeringens fasta ytor. Då GPS-signalen innehåller en viss störning som ger en standardavvikelse på runt 50 meter måste man för att få godtagbar precision korrigera mätningarna mot en referensstation med känd position som gjort parallella mätningar. Metoden kallas Differentiell-GPS.

En begränsning med GPS är att precisionen i mätningarna är beroende av mättiden (se diagram i figur 7) samtidigt som en förutsättning för att en mer avancerad mätutrustning skall vara kostnadseffektiv är att mätningarna går snabbt. Om man tänker sig att en scannande sensor behöver ca en minut på sig för en mätning kommer man ner på precision på ca 6-7 meter om inte GPS mätningen skall fördröja arbetet.

Vill man i andra sammanhang ha en högre precision, exempelvis om man vill samköra data från två mätpunkter eller positionsbestämma de enskilda mätpunkterna får man göra en intern positionsbestämning av objekten t ex genom mätningar med måttband och syftkompass med provytepunkten som referens. De enskilda objektens positionsangivelse kommer då att ha samma standard avvikelse som provytepunkten, men deras läge relativt varandra kan anges med hög precision.

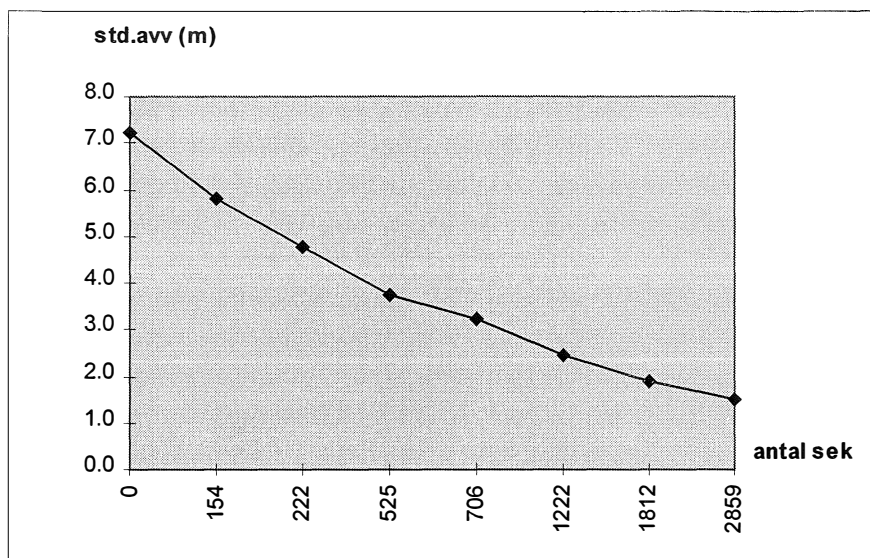


Fig. 7. Standardavvikelsens beroende av mättiden vid mätningar med differential. GPS (J Cedervind 1997).

5.2 Transport

Transporten av utrustningen är en mera komplex fråga än den först verkar, då den även innefattar problem av statistisk och inventeringsteoretisk karaktär. Om man tänker sig att utrustningen är så tung att den måste transporteras medelst någon typ av fordon är risken uppenbar att bias kan uppstå vid mätningarna eftersom flexibiliteten i valet av mätpunkt begränsas av fordonets framkomlighet, dock kan man tänka sig att den typen av systematiska fel kan korrigeras statistiskt. Ett annat sätt att avhjälpa problemet är att fordonet parkeras så nära den på kartan markerade provytepunkten som möjligt därefter bär förättningsmannen utrustningen ett antal meter i slumpvis vald riktning.

Den mest flexibla lösningen är att hela utrustningen är så pass lätt och smidig att den tillåter transport i någon sorts mes som bärs på ryggen. Gränsen för hur mycket en sådan utrustning får väga beror delvis på arbetets uppläggning. Till exempel huruvida man mäter kontinuerligt under gång eller om man stannar vid mätpunkterna och placerar utrustningen på marken. Betänker man att arbetet skall utföras dagligen under en längre period så kan man enligt erfarenheter från riksskogstaxeringen förmodligen inte lasta på mer än 10-15 kg. Ett alternativ är att man har två förättningsmän som delar på bördan men det innebär förstås en högre kostnad för arbetsinsatsen.

Satsar man på ett fordonsburet system bör man välja ett transportfordon som har hög framkomlighet men samtidigt är såpass smidigt att man kan framföra det utan att allvarligt skada den stående skogen. Lämpliga fordon skulle kunna gå att finna bland de varianter av fyra eller sexhjulsdrivna terrängmotorcyklar som finns på marknaden eller mindre bandfordon till exempel av "Järnhäst typ" där föraren går före och leder fordonet. Terrängmotorcyklarna är relativt billiga maskiner men det är tveksamt om framkomligheten är tillräcklig. Bandfordonen har bättre framkomlighet, särskilt på lösa underlag.

Utför man inventeringen vintertid är snöskoter ett alternativ, åtminstone i norra Sverige. Framkomligheten är mycket hög om man har bra snöförhållanden och man slipper de inte obetydliga markskador som även små fordon orsakar på barmark. En nackdel med att inventera vintertid är att snön i sig innebär ett inventeringsproblem då den skymmer sikten samtidigt som den gör det svårare att bedöma hur högt på stammen man mäter.

5.3 Kraftförsörjning

För att en teknik skall anses vara operativ krävs att man löser problemet med strömförsörjning på ett tillfredsställande sätt. Batterierna får inte väga för mycket samtidigt som de ska leverera tillräckligt med ström för en hel arbetsdag. Vidare måste elektroniken tåla fukt ock kyla.

Främst är det vid användning av laser och radar baserade sensorer som strömförsörjningen kan förväntas bli ett problem. Dels går det åt relativt mycket energi för att alstra laser eller radar signalen dels krävs det en energikrävande mekanik för att bära sensorerna.

5.4 Inventeringsdesign

Vid objektiv inventering med dagens metoder totalklavar man i regel en cirkelyta med bestämd radie kring provytepunkten. Om man tänker sig att man i stället försöker göra motsvarande mätningar med en scannande sensor placerad i provytecentrum finns det flera skäl att fundera på alternativa former på provytan, men principen måste hela tiden vara att man mäter in ett antal ytor med känd areal för att sedan väga samman datat så att det gäller för hela arealen som ytorna valts ifrån.

Till att börja med kan det rent tekniskt vara besvärligt att konstruera utrustning som kan scanna 360°. En cirkelsektor är då det naturliga alternativet men denna bör givetvis vara så vid som möjligt för att mätningen ska bli effektiv. Det kanske största problemet om man scannar från ett centrum är att det i de flesta fall kommer att vara stammar som helt eller delvis skuggar varandra samt andra för mätningarna ej relevanta objekt, exempelvis stenar eller vindfällan som skymmer sikten i någon riktning (se fig. 7)

Problemet kan förhoppningsvis till stor del avhjälpas genom att man monterar flera sensorer parallellt eller att man mäter in samma yta från två håll och hoppas att alla objekt kommer med i åtminstone en mätning. Förmodligen kommer det dock alltid kvarstå ett antal situationer där man inte kommer åt alla objekt på den tänkta provytan med en rimlig mätinsats utan man måste ha strategier för att behandla även "hopplösa" fall. En idé är att man drar av all areal som skuggas av objekt från provytearealen, men en sådan metod är förmodligen statistiskt svårbehandlad då glesa delar på ytan blir överrepresenterade.

Flera av de tekniker för automatisk inmätning av diametrar som diskuterats i uppsatsen, framförallt radar och ultraljud har svagheten att de brister i precision för enskilda mätningar. Samtidigt har dessa tekniker potential att åstadkomma en rationell, markbaserad datainsamling över stora arealer, särskilt om man utvecklar system som mäter kontinuerligt under rörelse och sedan taxerar längs en slumpvis utlagd linje. En metod för att utnyttja stora mängder data med låg precision i de enskilda mätningarna är tvåfassampling. Principen för tvåfassampling är att man först hämtar in ett primärt sampel med en snabb och billig men mindre noggrann metod från en stor andel av arealen för att få ett lågt representations fel. Därefter kalibreras datat från eventuella systematiska fel genom att man gör mer noggranna mätningar i ett subsampel, så kallat sekundärt sampel (Cochran 1977).

Ett idag vanligt utnyttjande av tvåfassampling i skogsinventeringssammanhang är när man kalibrerar subjektiva avdelningsvisa uppskattningar med hjälp av objektiva provytemätningar i ett subsampel av utlottade avdelningar. Om man applicerar metoden på de tekniker som berörs i den här rapporten skulle man kombinera en mindre noggrann linjetaxering med längs linjen utlagda provytemätningar av hög kvalitet (se fig 8). Exempelvis skulle det gå att tänka sig att förämningsmannen registrerar radar eller ultraljuds ekon kontinuerligt när han rör sig mellan provytorna, till fots eller med fordon, för att på dessa sedan göra mer noggranna mätningar med scannande lidar eller fotogrammetri digitala bilder. Dessa skulle då utgöra ett subsampel av den översiktligt inventerade linjen och användas som facitytor för kalibrering av denna. Naturligtvis skulle man också kunna tänka sig att man enbart använder sensorbaserade metoder för inmätningen av det primära samplet och mäter in provytorna med traditionella, manuella metoder.

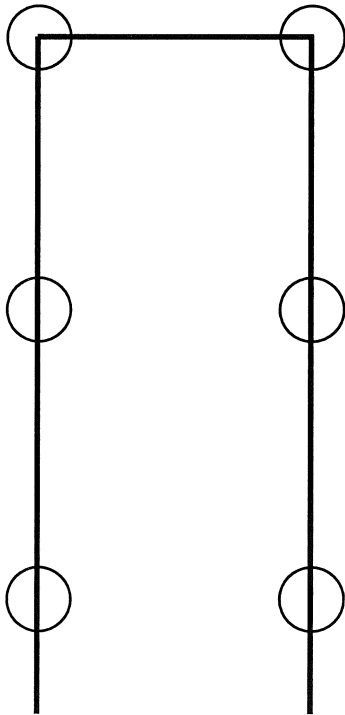


Fig. 8. Ett exempel på hur man längs en taxeringslinje slumpvis lägger ut provytor för att på dessa göra mätningar med högre precision.

6. SLUTORD

Att rangordna de olika tekniker som berörts i uppsatsen efter vilken potential de har att effektivisera insamlandet av skoglig information är en svår uppgift då det återstår mycket utvecklingsarbete innan en verkligt operativ utrustning skulle kunna presenteras. Den av de presenterade teknikerna som ligger närmast ett praktiskt utnyttjande idag tycks vara fotogrammetri i digitala bilder där lovande försök redan utförts med bilder av enskilda stammar.

Dock kan man därav knappast dra slutsatsen att digitala bilder har bättre förutsättningar än andra tekniker om man vill åstadkomma någon typ av automatisk datainsamling, exempelvis automatisk inmätning av de enskilda stammarna på en provyta. För den typen av mätningar har tvärtom tekniker som använder enbart bilder som informationskälla en begränsning då avståndsmätningen måste lösas med kompletterande sensorteknik eller genom stereomonterade kameror med de bildanalys och matchningsproblem som följer.

Aktiva sensorer som radar, laser eller ultraljud har den gemensamma fördelen att man kan erhålla avståndet till objektet då man registrerar retursignalen vilket är ett stort plus om man vill utveckla ett koncept som scannar av en cirkel eller sektor. Jämför man dessa tekniker inbördes utmärker sig radar och ultraljud på så sätt att de med sitt längre våglängds område kan se igenom objekt som kan vara störande i sammanhanget. Med laserbaserade sensorer kan man å andra sidan erhålla mycket hög vinkelupplösning.

Principiellt kan man därför säga att om man avser att utveckla ett koncept där det krävs hög vinkelupplösning och precision, exempelvis en scanner som registrerar vinkel och avstånd till stammarnas kanter, är laser den teknik som har bäst förutsättningar. Tänker man sig däremot att man inhämtar information genom att analysera signalernas totala retur för en större sektor och ej försöker urskilja de olika stammarna blir användningen av radar och ultraljudssensorer intressant.

För automatisk inmätning av provytor utkristalliserar sig några tekniska koncept som mer realistiska:

- Fotogrammetri i digitala bilder med avståndsmätning och positions bestämning av stammar med lidarsensor
- Fotogrammetri i digitala bilder med identifikation och avståndsmätning till stammarna genom stereomatchning.
- Scanning med lidar där diametern för varje enskild stam registreras.
- Scanning med radar med lägre frekvens där man studerar den totala retursignalen från en cirkelsektor utan att urskilja enskilda stammar.
- Scanning med ultraljud på motsvarande sätt.

För man in resonemanget om tvåfassampling blir metoder som samlar in data med relativt låg precision men till låg kostnad intressanta för insamling av det primära samplet. Om det ur såväl teknisk som inventeringsteoretisk synpunkt visar sig möjligt utveckla utrustning som mäter kontinuerligt under rörelse i beståndet tillkommer därför ytterligare möjligheter:

- Scanning med högfrekvent radar på motsvarande sätt som lidar.
- Så kallad ”optical flow” där man utnyttjar objektens rörelse relativt kameran för att få avståndet till objektet.
- Lågfrekvent radar eller ultraljudssensorer där man registrerar det totala ekot från en sektor.

7. REFFERENSER

Muntliga:

Sune Axelsson	FOA Linköping.
Lars Ulander	FOA Linköping.
Åke Wernersson	Luleå Tekniska Universitet.
Gunilla Borgefors	Centrum för bildanalys, SLU.
Christer Asplund	Institutionen för Skogsteknik, SLU.
Erkki Tomppo	Finska skogsforskningsinstitutet (METLA)
Jari Varjo	Finska skogsforskningsinstitutet (METLA)

Skriftliga referenser och relaterad litteratur:

Axelsson, H m fl (red): *Flygbildsteknik och Fjärranalys*. Skogsstyrelsen, Stockholm 1993.

Bårnsten, E (red): *Radiosystem*. Esselte Studium, Stockholm 1986.

Cedervind, J: *GPS under krontak i skog*. Arbetsrapport 20, Institutionen för skoglig resurshushållning och geomatik, Umeå 1997.

Cochran, W G: *Sampling Techniques*. John Wiley & sons Inc, 1997.

Hagner, M Hällström, H: *Crown Closure Meter a computer model for automatic estimation of forest density from fish-eye photos*. Arbetsrapporter 124, Institutionen för skogsskötsel, SLU, Umeå 1997.

Högström, T: *Telecommands for Semi Autonomous Control in Telerobotics*. Studies in Science and Technology Licentiate-Thesis No. 624, Linköping 1997.

Hurn, J: *GPS a Guide to the Next Utility*. Trimble Navigation Ltd, 1989.

Hurn, J: *Differential GPS Explained*. Trimble Navigation Ltd, 1989.

Hüppi, R m fl: *Microwave radiometer and scatterometer measurements of vegetation*. FOA Rapport C30494-3.2, Linköping 1988.

Johansson, I m fl: *Skogsinventering*. Arbetsrapport Luleå University of Technology, Luleå 1996.

Larsson, M: *Betydelsen av kvaliteten i skogliga avdelningsdata för skattningar av volymtillväxt och inoptimalförluster*. Avdelningen för skogsuppskattning och skogsindelning, SLU, Umeå 1994.

- Lebrun, J: *Bestämning av några trädkaraktärer med hjälp av markfotogrammetri*. Rapporter och Uppsatser Nr 4, Institutionen för skogsuppskattning och skogsindelning, Skogshögskolan, Stockholm 1974.
- Nilsson, M: *Estimation of Forest Variables Using Satellite Image Data and Airborne Lidar*. Silvestria 17, Swedish University of Agricultural Sciences, Umeå 1997.
- Nyström, K Kexi: M: *Individual tree basal area growth models for young stands of Norway spruce in Sweden*. Artikel ur Forest Ecology and Management 97, 1997.
- Russ, J C: *The Image Processing Handbook*. CRC Press Inc, 1995.
- Stjernman, A: *Design and Development of a Microwave Multifrequency Polarimetric Scatterometer for Biosphere Remote Sensing*. IRF Scientific Report 223, Institutet för rymdfysik, Kiruna 1995.
- Ståhl, G: *Optimizing the Utility of Forest Inventory Activities*. Report 27, Section of Forest Mensuration and Management, Swedish University of Agricultural Sciences, Umeå 1994.
- Svanberg, S: *Flourescence Lidar Monetoring of Vegetation Status*. Physica Scripta Vol. T58:79-85, Department of Physics, Lund Institute of Technology, Lund 1995.
- Sylvander, R: *Kompendium i skogsuppskattning II, Inventeringsmetoder*. Umeå 1981.
- Walter, F: *Extraction of forest tree volume from CARABAS SAR data*. Serial article Scandinavian Journal of Forest Research 1997 volym 12 (4). Centrum för bildanalys, SLU. Uppsala 1997.
- Walter, F: *The use of SAR in forest inventory-A survey study*. Rapport no18, Centrum för bildanalys, SLU. Uppsala 1995.
- Wernersson, Å m fl: *Activity Report R²A²-lab October 1996*. Linköping 1996.

Serien Arbetsrapporter utges i första hand för institutionens eget behov av viss dokumentation. Rapporterna är indelade i följande grupper: Riksskogstaxeringen, Planering och inventering, Biometri, Fjärranalys, Kompendier och undervisningsmaterial, Examensarbeten samt Internationellt. Författarna svarar själva för rapporternas vetenskapliga innehåll.

Riksskogstaxeringen:

- 1995 1 Kempe, G. Hjälpmedel för bestämning av slutenhet i plant- och ungskog. ISRN SLU-SRG-AR--1--SE
- 2 Riksskogstaxeringen och Ståndortskarteringen vid regional miljöövervakning. - metoder för att förbättra upplösningen vid inventering i skogliga avrinningsområden. ISRN SLU-SRG-AR--2--SE.
- 1997 23 Lundström, A., Nilsson, P. & Ståhl, G. Certifieringens konsekvenser för möjliga uttag av industri- och energived. - En pilotstudie. ISRN SLU-SRG-AR--23--SE.
- 24 Fridman, J. & Walheim, M. Död ved i Sverige. - Statistik från Riksskogstaxeringen. ISRN SLU-SRG-AR--24--SE.
- 1998 30 Fridman, J., Kihlblom, D. & Söderberg, U. Förslag till miljöindexsystem för naturtypen skog. ISRN SLU-SRG-AR--30--SE.
- 34 Löfgren, P. Skogsmark, samt träd- och buskmark inom fjällområdet. En skattning av arealer enligt internationella ägoslagsdefinitioner. ISRN SLU-SRG-AR--34--SE.
- 37 Odell, G. & Ståhl, G. Vegetationsförändringar i svensk skogsmark mellan 1980- och 90-talet. -En studie grundad på Ståndortskarteringen. ISRN SLU-SRG-AR--37--SE.
- 38 Lind, T. Quantifying the area of edge zones in Swedish forest to assess the impact of nature conservation on timber yields. ISRN SLU-SRG-AR--38--SE.

Planering och inventering:

- 1995 3 Holmgren, P. & Thuresson, T. Skoglig planering på amerikanska västkusten - intryck från en studieresa till Oregon, Washington och British Columbia 1-14 augusti 1995. ISRN SLU-SRG-AR--3--SE.
- 4 Ståhl, G. The Transect Relascope - An Instrument for the Quantification of Coarse Woody Debris. ISRN SLU-SRG-AR--4--SE.
- 1996 15 van Kerkvoorde, M. A sequential approach in mathematical programming to include spatial aspects of biodiversity in long range forest management planning. ISRN SLU-SRG-AR--15--SE.
- 1997 18 Christoffersson, P & Jonsson, P. Avdelningsfri inventering - tillvägagångssätt och tidsåtgång. ISRN SLU-SRG-AR--18--SE.

- 19 Ståhl, G., Ringvall, A. & Lämås, T. Guided transect sampling - An outline of the principle. ISRN SLU-SRG-AR--19--SE.
- 25 Lämås, T. & Ståhl, G. Skattning av tillstånd och förändringar genom inventerings simulering - En handledning till programpaketet "NVSIM".
ISRN SLU-SRG-AR--25--SE
- 26 Lämås, T. & Ståhl, G. Om dektektering av förändringar av populationer i begränsade områden. ISRN SLU-SRG-AR--26--SE

Biometri:

- 1997 22 Ali, Abdul Aziz. Describing Tree Size Diversity. ISRN SLU-SRG-AR--22--SE.

Fjärranalys:

- 1997 28. Hagner, O. Satellitfjärranalys för skogsföretag. ISRN SLU-SRG-AR--28--SE.
29. Hagner, O. Textur i flygbilder för skattning av beståndsegenskaper.
ISRN SLU-SRG-AR--29--SE.
- 1998 32. Dahlberg, U., Bergstedt, J. & Pettersson, A. Fältinstruktion för och erfarenheter från vegetationsinventering i Abisko, sommaren 1997. ISRN SLU-SRG-AR--32--SE.

Kompendier och undervisningsmaterial:

- 1996 14 Holm, S. & Thuresson, T. samt jägm.studenter kurs 92/96. En analys av skogstillståndet samt några alternativa avverkningsberäkningar för en del av Östads säteri.
ISRN SLU-SRG-AR--14--SE.
- 21 Holm, S. & Thuresson, T. samt jägm.studenter kurs 93/97. En analys av skogstillståndet samt några alternativa avverkningsberäkningar för en stor del av Östads säteri. ISRN SLU-SRG-AR--21--SE.

Examensarbeten:

- 1995 5 Törnquist, K. Ekologisk landskapsplanering i svenskt skogsbruk - hur började det?. Examensarbete i ämnet skogsuppskattning och skogsindelning.
ISRN SLU-SRG-AR--5--SE.
- 1996 6 Persson, S. & Segner, U. Aspekter kring datakvaliténs betydelse för den kortsiktiga planeringen. Examensarbete i ämnet skogsuppskattning och skogsindelning.
ISRN SLU-SRG-AR--6--SE.
- 7 Henriksson, L. The thinning quotient - a relevant description of a thinning? Gallringskvot - en tillförlitlig beskrivning av en gallring? Examensarbete i ämnet skogsuppskattning och skogsindelning. ISRN SLU-SRG-AR--7--SE.

- 8 Ranvald, C. Sortimentinriktad avverkning. Examensarbete i ämnet skogsuppskattning och skogsindelning. ISRN SLU-SRG-AR--8--SE.
- 9 Olofsson, C. Mångbruk i ett landskapsperspektiv - En fallstudie på MoDo Skog AB, Örnsköldsviks förvaltning. Examensarbete i ämnet skogsuppskattning och skogsindelning. ISRN SLU-SRG-AR--9--SE.
- 10 Andersson, H. Taper curve functions and quality estimation for Common Oak (*Quercus Robur L.*) in Sweden. Examensarbete i ämnet skogsuppskattning och skogsindelning. ISRN SLU-SRG-AR--10--SE.
- 11 Djurberg, H. Den skogliga informationens roll i ett kundanpassat virkesflöde. - En bakgrundsstudie samt simulering av inventeringsmetoders inverkan på noggrannhet i leveransprognoser till sågverk. Examensarbete i ämnet skogsuppskattning och skogsindelning. ISRN SLU-SRG-AR--11--SE.
- 12 Bredberg, J. Skattning av ålder och andra beståndsvariabler - en fallstudie baserad på MoDo:s indelningsrutiner. Examensarbete i ämnet skogsuppskattning och skogsindelning. ISRN SLU-SRG-AR--12--SE.
- 13 Gunnarsson, F. On the potential of Kriging for forest management planning. Examensarbete i ämnet skogsuppskattning och skogsindelning. ISRN SLU-SRG-AR--13--SE.
- 16 Tormalm, K. Implementering av FSC-certifiering av mindre enskilda markägares skogsbruk. Examensarbete i ämnet skogsuppskattning och skogsindelning. ISRN SLU-SRG-AR--16--SE.
- 1997 17 Engberg, M. Naturvärden i skog lämnad vid slutavverkning. - En inventering av upp till 35 år gamla föryngringsytor på Sundsvalls arbetsomsåde, SCA. Examensarbete i ämnet skogsuppskattning och skogsindelning. ISRN-SRG-AR--17--SE.
- 20 Cedervind, J. GPS under krontak i skog. Examensarbete i ämnet skogsuppskattning och skogsindelning. ISRN SLU-SRG-AR--20--SE.
- 27 Karlsson, A. En studie av tre inventeringsmetoder i slutavverkningsbestånd. Examensarbete. ISRN SLU-SRG-AR--27--SE.
- 1998 31 Bendz, J. SÖDRAs gröna skogsbruksplaner. En uppföljning relaterad till SÖDRAs miljömål, FSC's kriterier och svensk skogspolitik. Examensarbete. ISRN SLU-SRG-AR--31--SE.
- 33 Jonsson, Ö. Trädsikt och ståndortsförhållanden i strandskog. - En studie av tre bäckar i Västerbotten. Examensarbete. ISRN SLU-SRG-AR--33--SE.
- 35 Claesson, S. Thinning response functions for single trees of Common oak (*Quercus Robur L.*) Examensarbete. ISRN SLU-SRG-AR--35--SE.
- 36 Lindskog, M. New legal minimum ages for final felling. Consequences and forest owner attitudes in the county of Västerbotten. Examensarbete. ISRN SLU-SRG-AR--36--SE.

- 1998 40 Persson, M. Skogsmarksindelningen i gröna och blå kartan - en utvärdering med hjälp av riksskogstaxeringens provytor. ISRN SLU-SRG-AR--40--SE.
- 41 Eriksson, F. Markbaserade sensorer för insamling av skogliga data - en förstudie. ISRN SLU-SRG-AR--41--SE.

Internationellt

- 1998 39 Sandewall, M ., Ohlsson, B & Sandewall, R.K. People's options on forest land use. - a research study of land use dynamics and socio-economic conditions in a historical perspective in the Upper Nam Nan Water Catchment Area, Lao PDR. ISRN SLU-SRG-AR--39--SE.