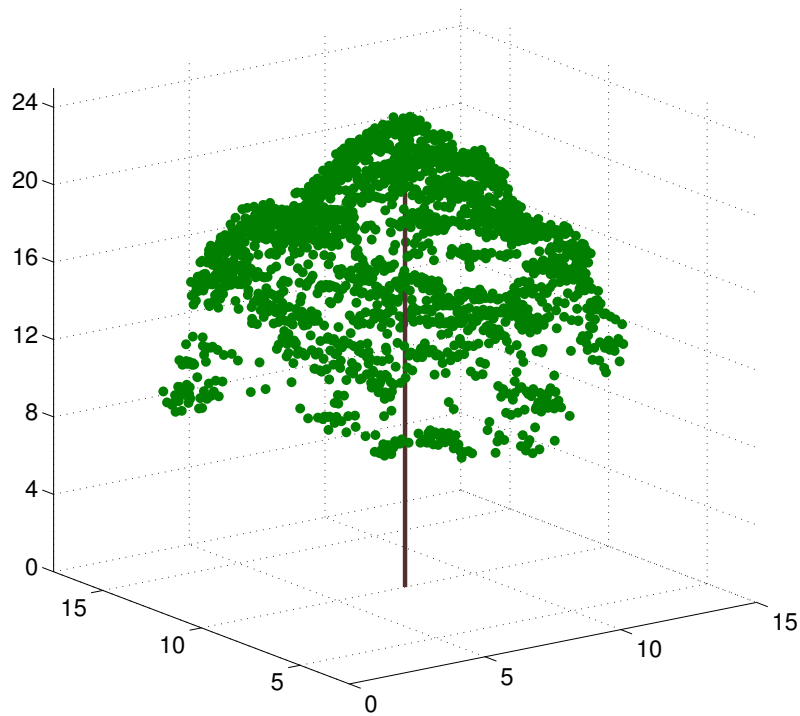


Uppskattning av biomassa för individuella träd med hjälp av luftburen laserskanning

Viktor Kärnstrand, Erik Landström, Maciej Soja
RRYX02-09 Kandidatarbete inom Radio- och rymdvetenskap
Chalmers tekniska högskola
Handledare: Gustaf Sandberg

21 maj 2008



Figur 1: Trädets krona består endast av datapunkter från lasermätningar. Stammen är inritad som ett streck från den högsta datapunkten till marken.

Sammanfattning

Högupplöst laserskanning används för att detektera enskilda träd och utvinna information om deras trädparametrar. I denna rapport redogörs för en algoritm som bestämmer enskilda trädets position, höjd, stamdiameter och biomassa utifrån laserskanning med en upplösning på 25 cm samt även den sammanlagda biomassan på områdesnivå. Studien är genomförd i nordlig skogsmiljö och slutprodukten bör således endast ha sitt giltighetsområde där. Algoritmen har utvecklats med 11 olika bestånd som grund, vilka förutom att de laserskannats också inventerats i fält. 54% av träden i de första 11 bestånden detekterades korrekt men på grund av att större träd i allmänhet detekteras lättare så motsvarade detta 88% av den totala biomassan. Algoritmen testades sedan på ytterligare 6 områden. RMSE för biomassan blev 37.5 ton/ha som motsvarade 19% av medelvärdet för den fältuppmätta biomassan.

Abstract

High-resolution laser scanning is used to detect single trees and extract information about their individual tree parameters. In this report an algorithm is presented which estimates the position, height, stem diameter and biomass for individual trees as well as the total biomass at the stand level. The raw data has a resolution of 25 cm. The model was developed in boreal forest and is hence restricted to such areas. The algorithm has been developed using 11 stands. These stands have in excess of the laser measurements also been measured on the ground. 54% of the trees in the first 11 stands were detected. They however corresponded to 88% of the total biomass as a consequence of larger trees more easily being detected. The algorithm has then been tested on 6 additional stands. The RMSE of the biomass was estimated to 37.5 ton/ha which corresponded to 19% of the mean of the fieldmeasured biomass.

Innehåll

1	Inledning	1
2	Teori	3
2.1	Överblick	3
2.2	Filter	4
2.2.1	Tröskelfilter	4
2.2.2	Nersampling/Uppsampling	4
2.2.3	<i>Active Contour Model</i>	4
2.2.4	Viktade rumsfilter	4
2.3	Bildanalys	5
2.4	Skattning av trädparametrar	5
3	Material	7
3.1	Laserskanning	7
3.2	Fältmätningar	8
4	Algoritm	9
4.1	Överblick	9
4.2	Filtrering	9
4.3	Trädsökning	10
4.4	Trädidentifikation	10
5	Statistisk analys	15
5.1	Stamdiametern	15
5.2	Biomassan	15
6	Resultat	17
6.1	Detektion av enskilda träd	17
6.1.1	Identifikation av laser- och fältträd	17
6.1.2	Bestämning av enskilda träds position	17
6.2	Uppskattning av trädhöjd	17
6.3	Uppskattning av stamdiameter	21
6.4	Uppskattning av biomassa	21
6.5	Beräkning av biomassa med Marklunds formel	24
7	Framtida projekt	28
7.1	Fourieranalys vid val av filterparameter	28
7.2	<i>Active Contour Model</i>	28
7.3	Artklassificering genom medelträff	30
8	Diskussion	32
8.1	Detektion och identifikation av träd	32
8.2	Statistisk analys	32
8.3	Utvärdering av arbetsgången	33
A	Individuella bidrag	36
A.1	Viktor Kärnstrand	36
A.2	Erik Landström	36
A.3	Maciej Soja	37

B	Datablad om fältmätningar	37
C	Datablad om lasermätningar	37

1 Inledning

Inventering av skog är en kostsam och tidskrävande process. De fältmetoder som man använder idag tillämpar man dessutom bara på mindre områden för att uppskatta skogsparametrar för större bestånd. De senaste tio åren har man, på högskolor och inom privat sektor, utvecklat en alternativ metod för att uppskatta skogsparametrar genom laserskanning av skog. Till en början, då upplösningen hos laserbilderna var dålig använde man olika former av *stand average methods*. Man tittade då på allmänna egenskaper såsom täthet av markträffar, för att ge ett samlat mått på exempelvis biomassa. Då upplösningen hos bilderna ökade, och man kunde urskilja enskilda träd, utvecklades *single tree based methods*. Som namnet antyder uppskattar man trädparametrar hos enskilda träd. En sådan metod kan exempelvis ge en god uppskattning på skogsparametrar som art, höjd, stamdiameter, stamvolym och biomassa hos specifika träd. Dessa mätningar måste kompletteras med vissa fältstudier, men besparar mycket av det arbete man tidigare fått lägga ner. Tillämpningarna är många redan idag, men det tycks ständigt finnas nya möjligheter att utöka metodiken till nya problemsituationer.

På skogsstyrelsen tillhandahåller man så kallade gröna skogsbruksplaner till markägare. De ska hjälpa skogsägaren att sköta och avverka sin skog på ett sådant sätt att man optimerar produktionen, men ställer också krav på markägaren hur man bör sköta och avverka sin skog på ett sätt som bibehåller ett gott ekosystem och en biologisk mångfald. Detta kallar man på skogsstyrelsen för Produktionsmålet och Miljömålet¹. Laserskanning av skog har redan blivit ett viktigt redskap när man tar fram skogsbruksplaner, kanske framförallt då det gäller Produktionsmålet. Då metodiken effektiviseras och det kommersiella bruket ökar bör också kostnadseffektivitet bli en faktor som talar för bruket av laserskanning. Idag är framförallt den nya tekniken till ekonomisk vinning för större skogsägare. Dessa ska, enligt Sveriges ledande företag på området, kunna tjäna ca 20% i jämförelse med att endast göra fältmätningar².

I Sverige finns det ytterligare ett fält där laserskanning visat sig värdefull, nämligen vid omarrrendering av skogsmark. I Sverige har vi haft egenheten att dela upp mark på längden mellan, exempelvis, två arvingar. Dessa arvingar har i sin tur också delat sina lotter på längden mellan sina arvingar o s v. Detta har levt kvar och ställer till det vid brukande av marken, därför har man börjat omarrrendera. Det vill säga byta mark så att varje markägare får lotter av mer kvadratisk form. För att man ska kunna garantera att ingen av markägarna gör en stor förlustaffär vid en sådan omarrrendering så tillämpar man laserskanning för att undersöka olika parametrar hos skogen som kan tänkas utgöra en grund vid värdering.

En annan tillämpning som blivit särskilt aktuell under senare år är användning av laserskanning vid studier av de konsekvenser som stora stormar ger för skogsmarken. Med en skenande växthuseffekt kommer stormar som Per och Gudrun att förekomma mer frekvent och laserskanning kommer att underlätta, både studier av hur man eventuellt kan förebygga stora förluster och uppskatta

¹<http://www.svo.se/episerver4/templates/SNormalPage.aspx?id=11845> från 29 april 2008

²Ulf Söderman, Foran Remote Sensing AB

dess omfattning. Bland annat pågår EU-projektet StormRisk³ som syftar till att studera detta. I StormRisk utgör laserskanning och *single tree based methods* ett centralt redskap. Med hjälp av dessa kan man lätt titta på hur enskilda träd påverkats.

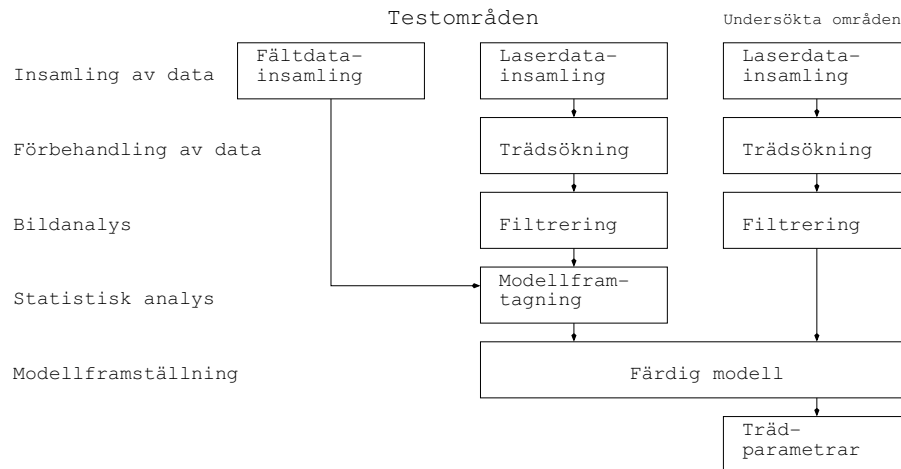
Vid laserskanning av skog erhåller man en höjdprofil. Denna höjdprofil behöver sedan viss bearbetning innan man med datorns hjälp kan börja identifiera enskilda träd och skapa sig en uppfattning om de variabler som ligger till grund för uppskattningen av olika trädparametrar. Den trädparameter som man vanligtvis är mest intresserad av vid kommersiella tillämpningar är biomassa. Men även andra parametrar som till exempel art, höjd och stamdiameter är av stort intresse. Dessa kan exempelvis ligga till grund för en uppskattning av skogens ålder och därmed huruvida det är fördelaktigt, ekonomiskt och biologiskt, att avverka. För att kunna uppskatta sådana parametrar på ett så bra sätt som möjligt behöver man, till att börja med, en algoritm som kan plocka ut de data från höjdprofilen som är intressanta. För att sedan omsätta dessa data i de önskade trädparametrarna behövs statistiska samband, vilka lämpligast tas fram genom jämförelse mellan laserdetektion och fältmätningar.

Det finns en rad olika laserdatabehandlingsalgoritmer idag. Vissa är redan i kommersiellt bruk medan andra fortfarande i utvecklingsstadiet. Olika algoritmer används vid databehandlingen och olika modeller tillämpas vid den statistiska analysen. De ledande kommersiella modellerna har en upplösning på ca 10 mätningar per m^2 och har en säkerhet i volymsuppskattning på över 90%⁴.

Målet för denna studie är att ta fram en metod som, med god säkerhet, uppskattar biomassa för ett skogsbestånd efter laserskanning och trädseparation. Som mål sätts även att algoritmen skall vara robust och ge bra resultat.

³<http://www.svo.se/episerver4/default.aspx?id=31636> från 29 april 2008

⁴Ulf Söderman, Foran Remote Sensing AB



Figur 2: Blockschema för dataflödet

2 Teori

2.1 Överblick

I detta avsnitt undersöks teoretiskt möjliga metoder vilka kan skapa den algoritm som löser problemet.

Efter laser- och fältdata är insamlade från testområden behandlas datan. Detta görs i följande fyra steg (se även Figur 2):

- förbehandling av laserdata
- bildanalys av laserdata och framtagning av parametrar
- statistisk analys av laserdata tillsammans med fältdata
- framtagning av en modell för parameterberäkning

Varje algoritm består av dessa fyra steg i bevarad ordning. Varje steg är nödvändigt men kan variera i omfattning mellan olika algoritmer.

Det finns två skilda sätt att angripa problemet. *Stand average*-metoden bygger på en statistisk analys av data på beståndsnivå och beskrivs av bland annat Holmgren i [6]. I denna metod används bland annat medelträffhöjden och trädträffintensiteten för att uppskatta volymen på alla trädskronor och relatera den till den fältuppmätta biomassan. Då får man ett statistiskt samband som kan användas på större områden. Det andra sättet, *single tree*-metoden, grundas på separation av träd. Först filtreras indata för att få en jämn yta och därefter separeras träd från varandra varpå det utförs statistisk analys på varje enskilt träd. Denna metod används bland annat av Hyypä i [3].

2.2 Filter

2.2.1 Tröskelfilter

I tröskelfiltret passerar laserdatan en tröskelfunktion som tar bort små störningar i form av lågt växande vegetation. Ett bra värde på tröskeln kan vara 3 m. Allting som är lägre än 3 m filtreras bort och sätts till 0 m.

2.2.2 Nersampling/Uppsampling

Nersampling är ett filter som sänker upplösningen genom att sammanfoga flera punkter i en, vars värde kan sättas till punkternas medelvärde eller punkternas maxvärde. Nedsampling medför att man filtrerar bort vissa variationer och markträffar. Uppsampling är ett filter som höjer upplösningen med hjälp av interpolation (linjär, spline eller annan). En punkt görs om till flera. Man tillför ingen ny information men bilden ser bättre ut och kanterna jämnas ut.

2.2.3 Active Contour Model

Ett komplement till ovanstående filter är *ACM* (*Active Contour Model*). Metoden har implementerats av bland annat Elmqvist (se [1]). Modellen används till att jämna ut krontan genom att applicera en dynamisk yta uppifrån. Ytan anpassar sig till krontan så att snabba variationer utplånas. Detta görs med hjälp av en energifunktion som har en term vilken minimeras vid total anpassning till data punkter, samt en term som minimeras vid plan yta. Då den samlade funktionen minimeras erhåller man den lämpligaste ytan, för givna värden på en samling parametrar.

2.2.4 Viktade rumsfilter

I matematiska termer kan man se på ett filter som en avbildning $f(A) = B$ där varje punkt i B , säg $b_{i,j}$ är summan av element i A med olika vikter, som $b_{i,j} = \sum_{k,l} w_{i-k,i-l} a_{i-k,j-l}$, där $w_{i-k,i-l}$ är en vikt. Man kan säga att pixeln $b_{i,j}$ inte enbart beror på $a_{i,j}$ utan även pixlar i en omgivning till denna.

Medelvärdesfilter

Ett viktat medelvärdesfilter är av typen:

$$A = \frac{1}{\Sigma} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 4 & \dots & 4 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 8 & \dots & 8 & 2 & 1 \\ 4 & 8 & 16 & \dots & 16 & 8 & 4 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 4 & 8 & 16 & \dots & 16 & 8 & 4 \\ 2 & 4 & 8 & \dots & 8 & 2 & 1 \\ 1 & 2 & 4 & \dots & 4 & 2 & 1 \end{pmatrix}$$

där Σ är summan av alla element i matrisen. De två generella egenskaperna hos ett medelvärdesfilter är:

- positiva koefficienter,
- summan av koefficienterna är 1.

Filtret sätter värdet i en punkt till ett viktat medelvärde av denna punkts värde och grannarnas värde. Detta filter används bland annat i [3]. Filtret kan utökas till fler rutor, till exempel 15 x 15 rutor. Alltså kommer även punkten som ligger 7 punkter bort från den behandlade punkten att påverka den behandlade punktens värde.

Gaussfilter

Gaussfiltret beskrivs av ekvationen:

$$G(x, y) = C \cdot e^{-\frac{1}{2}(\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2})}$$

där C är en normeringskonstant och σ_x samt σ_y beskriver filtrets tolleransnivå.

Val av filter är kritiskt i det här steget. Eftersom träden är väldigt ojämna finns det många kanter och ojämnheter som kan störa vidare analys. För stor eller för liten filtrering kan ge oönskade resultat. Därför måste man vara försiktig och välja sitt filter rätt. I det här fallet handlar det mer om valet av filterparameter (som antal rutor vid medelvärdesfiltret och σ_x samt σ_y vid Gaussfiltret). I artikeln [4] använder författarna sig av en funktion som dynamiskt väljer ett av tre olika värden på konstanten σ . Genom att anpassa paraboliska ytor till trädkronor hittas det bästa värdet på konstanten.

2.3 Bildanalys

För att separera träd från varandra behövs gränserna mellan topparna som detekterats. Till detta används *steepest descent*-metoden. Denna metod innebär att man går i gradientens största riktning tills man når en trädtopp. I praktiken innebär detta att man låter så kallade frön (*seeds*) klättra i den riktningen som har den högsta gradienten. Frön placeras ut i varje datapunkt och processen tillåts pågå tills inga frön rör sig (alla frön hittat sina toppar). Undersökning av varifrån varje frö härstammat ger tydliga gränser mellan träden. Genom att räkna antalet frön som kommit till samma topp erhålls kronstorleken för enskilda träd. Avläsning av det största datavärdet i segmentet ger trädets höjd.

2.4 Skattning av trädparametrar

För att beräkna trädparametrarna höjd, krondiameter, stamdiameter och stamvolym använder författarna av artiklarna [3] och [4] liknande metoder. Höjden för varje träd, h , ges av det maximala värdet inom sitt trädsegment enligt:

$$h = \max(h_i)$$

där h_i är de individuella trädhöjderna inom segmentet. Krondiametern, L beräknas utifrån arean av trädets segment, A , enligt:

$$L = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}.$$

Enligt [3] existerar det en hög korrelation mellan krondiametern och stamdiametern, d , för arter som tall (*Pinus sylvestris*), gran (*Picea abies*) och glasbjörk (*Betula pubescens*). Höjden korrelerar starkt med stamdiametern och höjden

kan bestämmas noggrant med laserskanning. En regressionsformel med h och L ansätts. [3] ansätter:

$$d = \alpha L + \beta h + \gamma$$

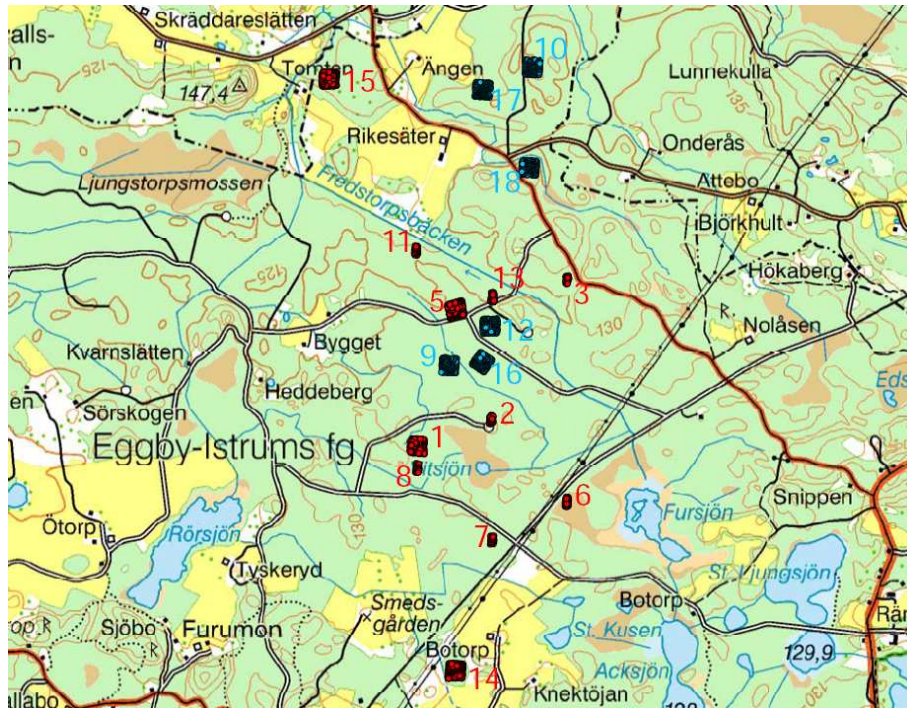
där koefficienterna α , β och γ bestäms med fältdata. [4] ansätter:

$$d = b_0 + b_1 \times h \times L + \varepsilon$$

där koefficienterna b_0 , och b_1 bestäms utifrån fältdata.

Med beräknad stamdiameter kan stamvolymen för enskilda träd erhållas med semiempiriska volymfunktioner. I [4] använder Persson sig av Näslunds stamvolymfunktioner (se bilaga) medan i [3] använder Hyypä sig av Laasaenahos volymfunktion. Båda dessa funktioner har stamdiametern och höjden som ingångsvariabler.

Till beräkning av biomassa kan man använda sig av Marklunds funktioner. Dessa funktioner finns att hitta i Appendix B. Marklunds funktioner kräver kunskapen om trädets art eller i alla fall trädets typ (löv- eller barrträd).



Figur 3: Karta över inventerade områden i Remningtorp, Västra Götaland. De blå områdena inventerades hösten 2006 och de röda våren 2007. (©Lantmäteriverket, Gävle 2007; bilden producerad av J. Fransson och M. Magnusson, SLU, Umeå)

3 Material

Mätningarna är gjorda i Remningtorp utanför Skövde i Västra Götalands Län (lat. $58^{\circ}30'N$, long. $13^{\circ}40'E$) som en del av BioSAR-kampanjen under våren 2007. De dominerande trädarterna är gran (*Picea abies*), tall (*Pinus sylvestris*) och björk (*Betula*). Området är essentiellt flackt med en variation i altitud mellan 120 till 145 m ö h (se [4]). På området har det utförts både lasermätningar och fältmätningar.

3.1 Laserskanning

Laserskanning utförs från flygplan eller helikopter med LiDAR-tekniken (Light Detection and Ranging), se Appendix C. Man flyger flera parallella flygningar i samma väderstreck med ett visst mellanrum som beror på vilken stråldivergens man har. På så sätt täcker man hela området. Under tiden som flygningarna görs skickar man pulser mot marken under. Dessa pulser reflekteras sedan och sträckan i z-led kan erhållas genom att multiplicera pulsens färdtid med ljushastigheten. Samtidigt samlas värden in via GPS (*Global Positioning System*) och INS (*Inertia Navigation System*) som ger information om positionen i x- och y-led.

Tabell 1: Resultat från fältmätningar på alla 17 områden i Remningstorp. Omr = områdesnummer (nummer, som används i texten om områden; t_n är testområden), Id = identifikationsnummer enligt bilagan, A = area i ha, B_r = total biomassa i ton/ha, $\bar{h}$ = medelhöjden i m, ρ = trädensitet i träd/m², $N_{t,g,l,a}$ = procentuell andel tall, gran, björk respektive andra träd i området. Märk att procentantal i de sista fyra kolumnerna inte alltid summeras till 100%. Vi presenterar dock fältdata i samma skick som vi fått dem.

Omr:	Id:	A :	B_r :	$\bar{h}$:	ρ :	N_t :	N_g :	N_b :	N_a :
1	1	0.6	212.7	22.1	433.7	49.6	42.8	3.2	4.3
2	2	0.1	253.2	16.2	878.0	37.8	31.7	25.6	4.9
3	3	0.1	155.0	18.8	501.1	64.3	28.6	4.8	2.4
4	5	0.6	167.1	16.5	852.8	48.2	0.4	9.6	41.8
5	6	0.1	75.3	10.4	1450.0	82.9	0.0	7.9	9.3
6	7	0.1	171.1	25.3	258.8	0.0	89.7	4.3	8.7
7	8	0.1	290.1	25.0	499.8	0.0	87.0	11.6	15.6
8	11	0.1	272.6	25.5	402.8	0.0	95.1	0.6	4.8
9	13	0.1	170.1	13.6	1185.5	36.4	0.0	93.4	2.3
10	14	0.7	54.3	13.9	521.9	0.0	4.3	47.7	40.3
11	15	0.6	117.0	15.4	658.4	0.0	11.9	0.5	2.0
t_1	9	0.6	228.5	26.3	534.1	0.0	72.8	1.0	2.3
t_2	10	0.6	156.5	20.8	617.8	0.0	96.8	0.0	4.9
t_3	12	0.6	277.8	27.9	549.3	12.6	82.1	4.7	58.9
t_4	16	0.6	272.7	26.8	633.8	0.2	97.3	0.0	0.0
t_5	17	0.6	149.0	21.7	581.4	0.0	95.0	2.4	2.7
t_6	18	0.6	257.6	25.9	488.2	0.0	94.6	0.3	5.1

3.2 Fältnätningar

Mätningarna på individuella träd utfördes av specialister som SLU (Sveriges Lantbruksuniversitet) anlitat under hösten 2006 och våren 2007. Totalt inventerades 17 områden som tillsammans utgör en databas på 4358 träd. Mätningarna från våren 2007 utgörs av 11 områden. I Figur 3 ses de elva områdena markerade med rött. Man har endast inkluderat träd som har en stamdiameter i brösthöjd på över 5 cm. Den beräknade biomassan och stamvolymen i datan har baserats på Näslunds formler (stamvolym) och Marklunds formler (biomassa), se bilaga. I Tabell 1 kan man se data från alla 17 områden.

4 Algoritm

4.1 Överblick

Rådatan består av en $m \times n$ matris där varje element motsvarar den högsta träffen i ett område om 25×25 cm. Den första svårigheten ligger i att denna matris innehåller markträffar och andra defekter. Detta ter sig till en början enbart som ett hinder. Men när man väl lyckats komma över hindret kan man faktiskt vända det till en fördel (till exempel vid artbestämning, se 7.3).

Iakttag den övre bilden i Figur 4. Det framgår tydligt vilka områden som utgör trädkronor och vilka som utgör mark. För att man med hjälp av dator skall kunna göra denna distinktion måste man dock bearbeta bilden. Man vill ha en slät yta i vilken en *steepest descent*-liknande metod kan tillämpas för att finna topparna. Det man gör är att tillämpa ett viktat rumsfilter⁵. Resultatet ses i Figur 4 och Figur 5.

Efter detta tröskelfiltrerar man bilden. Man sätter de pixlar som ligger under ett visst tröskelvärde till 0. Detta görs för att undvika att man till exempel blandar ihop buskar och stenar med träd. Som nästa steg utförs den tidigare nämnda *steepest descent*-algoritmen. Denna metod är krävande ur beräknings-synpunkt men mycket nödvändig. Den kopplar pixlar som tillhör det aktuella trädets krona samtidigt som den lokaliserar trädtoppen. Kopplingen av pixlar bildar trädets segment som sedan används för att approximera det detekterade trädets krondiameter.

Det är på denna information som man sedan baserar beräkningarna av de olika trädparametrarna såsom biomassa. För att ta fram en statistisk modell på trädnivå som överför den ur lasermätningar funna informationen till fysiska parametrar såsom stamdiameter och biomassa, behöver man identifiera vilket träd det är man har hittat. När man gjort detta kan man på ett systematiskt sätt testa hur olika trädparametrar beror av de variabler vi kan utvinna genom lasermätningar.

4.2 Filtrering

Det finns i huvudsak två problem att ta i beaktande när man utformar sitt filter:

- Hur gör man med hörnpunkterna?
- Vilket filter kommer att ta bort oönskade fluktuationer men samtidigt behålla mindre trädtoppar?

Den första av dessa två frågor kan lösas på följande sätt: Man använder en inbyggd funktion i Matlab som kallas `padarray`, vilken kommer att utöka matrisen med en ram som kopierar de element som ligger närmast i den ursprungliga matrisen. När man gjort detta utför man sin filteroperation och plockar bort ramen.

⁵Den vakna läsaren som studerat sektion (2.2) märker säkert att vi hoppat över steget som där kallats ACM (*Active Contour Model*). Faktum är att vi gjort långt gångna försök med ACM, men då dessa algoritmer visat sig tunga att genomföra och tillfört föga till vårt slutresultat så valde vi att avsluta dessa försök.

Det andra problemet är mer komplex och en lämplig strategi man kan anta här är att helt enkelt testa sig fram. För vår del har det visat sig användbart med ett rektangulärt medelvärdesfilter.

Här behöver vi bestämma medelvärdesfiltrets storlek. En större filtersida medför att även de mer avlägsna punkter ger ett bidrag till filtreringen samt att mittpunkten kommer att viktas mindre i förhållande till sin omgivning. Valet av denna parameter är viktig och kan göras på två sätt: antingen fixeras parametern till det värde som ger bäst resultat på den tillgängliga datan, eller så konstrueras en algoritm som själv anpassar parametern till datan.

4.3 Trädsökning

Principen för vår variant av *steepest descent*-funktionen är följande: en filtrerad matris matas in vari man placerar ett så kallat frö (*seed*) i varje punkt. Dessa frön tillåts sedan, ett i taget, klättra i den riktningen som har störst gradient. Då kommer inte bara topparna att lokaliseras utan även trädgränserna kommer att hittas. På så sätt kommer hela området att delas upp i segment, se Figur 6. Dessa segment motsvarar trädets krona och om man sedan approximerar kronan som en cirkel kan också motsvarande krondiametrar hittas. Krondiametern och den högsta punkten i varje segment blir sedan grunden till skattningen av trädparametrar.

En viktig sak som man bör tänka på vid konstruktionen av en sådan funktion är att stoppa fröet när det hamnat på en plåtå. Då ett tröskelfilter appliceras kommer alla punkter under tröskelvärde att bilda ett plan. Om fröet inte stoppas innan så kan följande två saker hända:

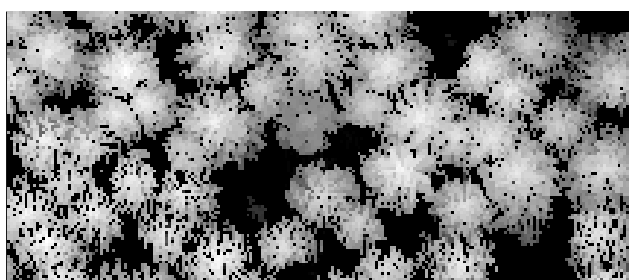
- varje plåtåpunkt definieras som en topp och då finnes toppar i varje markpunkt,
- fröet tillåts gå vidare och segmentet utökas med markpunkter.

4.4 Trädidentifikation

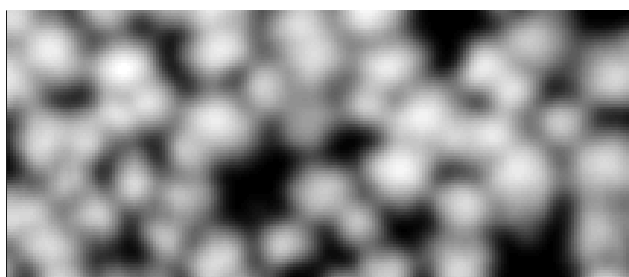
För att kunna göra en statistisk analys på trädnivå måste vi identifiera varje detekterat träd. För att veta vilket detekterat laserträd i testområdena som hör till vilket fältträd och inte dubbelkoppla tillämpas följande metodik: varje segment gås igenom för respektive detekterat laserträd och det undersöks vilka fältträd som ligger i området. Ett av följande tre scenarion uppkommer, se Figur 7:

- endast ett träd i segmentet – detta träd kopplas ihop med laserträdet,
- flera träd i området – det träd som passar bäst i norm $(\text{lägst } \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2})$ tas,
- inga träd i området – alla träd ges friheten att röra sig två pixlar i både x- och y-led och det undersöks därefter om några nya träd hamnat i segmentet. Om ja – förfarandet upprepas. Annars förkastas laserträdet.

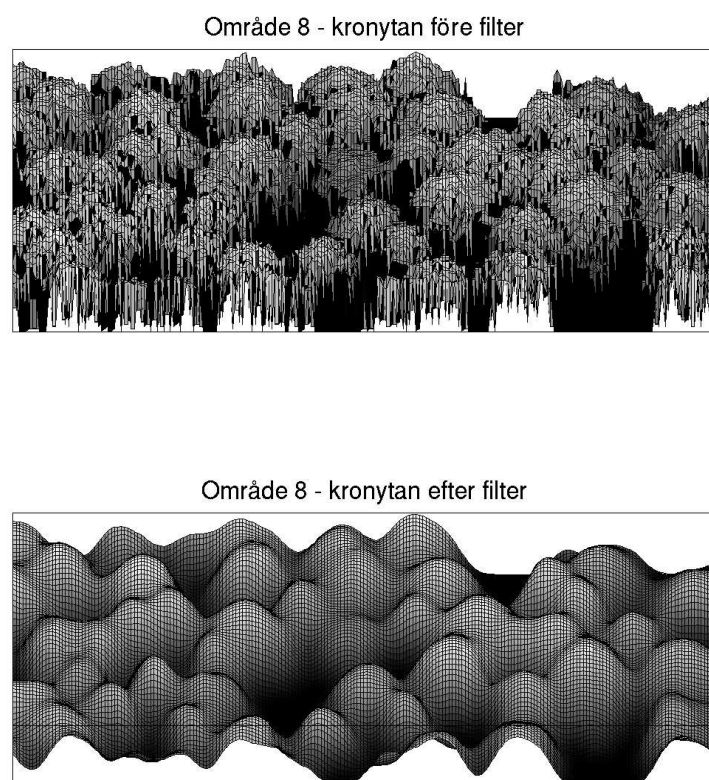
Område 8 – obehandlad bild



Område 8 – bild efter filter

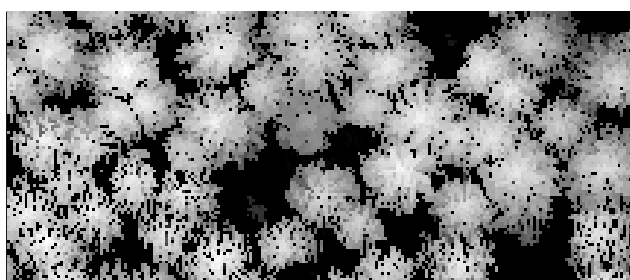


Figur 4: Område 8 visas här före och efter filtrering.



Figur 5: Här är en 3D-plot av testområde 8 före samt efter filtrering

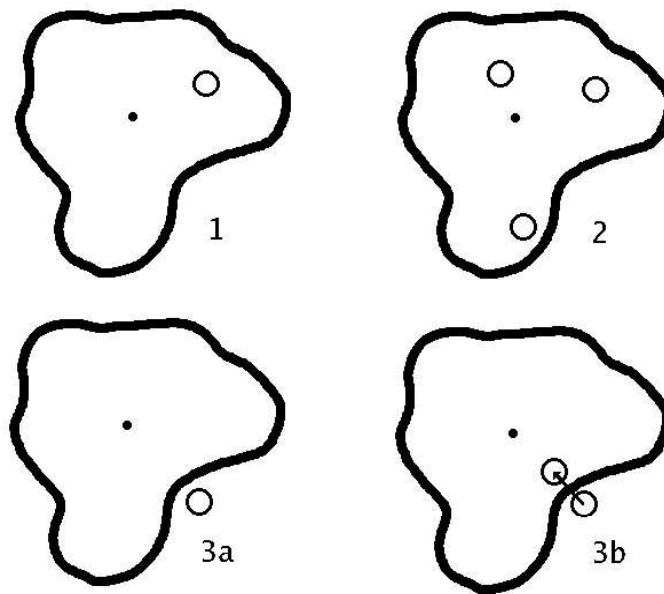
Område 8 – obehandlad bild



Område 8 – trädgränser



Figur 6: Här visas område 8 samt de hittade trädgränserna.



Figur 7: Här presenteras de tre olika fallen. Prickar motsvarar detekterade träd och cirklar fältuppmätta träd. I fall 1 ligger endast ett enda träd i segmentet. I fall 2 finns det flera fältträd i ett segment och det närmaste trädet kopplas. I fall 3 detekteras inget fältträd i området (a) men om ett fältträd precis utanför området tillåts röra sig en halv meter (b) så kan trädet paras med laserträdet.

När detta utförts ställs ytterligare ett kriterium: Avviker de kopplade träden för mycket i höjdled så tas kopplingen bort. Till synes verkar denna åtgärd vara oönskad. Dock görs detta med avsikt att skapa bra statistiskt underlag inför vidare analys och då är det berättigat att avlägsna uppenbara felkopplingar.

Som ett mått på hur väl laserdetektionen överensstämmer med fältmätningar definieras felfaktorn ff som:

$$ff = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |1 - N_i|$$

där n är antalet segment och N_i är antalet fältuppmätta träd i segment i .

Identifikationsalgoritmen möjliggör jämförelse av lasermätningar och fältmätningar på trädnivå. För varje träd kan beräknad längd, stamdiameter och biomassa utvärderas genom jämförelse med fältmätningar. En välskriven identifikationsfunktion utgör en nödvändig grund för statistisk analys.

5 Statistisk analys

5.1 Stamdiametern

För att bestämma stamdiametern ansätter vi en funktion som bygger på resultat framtagna av Hyypä i [3]. Dock lägger vi till några extra termer för att hitta eventuella andra samband. Den ansatta ekvationen blir som i ekvation (1).

$$d = C_1 + C_2h + C_3L + C_4hL + C_5h^2L + C_6hL^2 + C_7h^2L^2 \quad (1)$$

där d är stamdiametern, h den laseruppmätta höjden, L den laseruppmätta krondiametern och konstanterna C_1 till C_7 bestäms med hjälp av minstakvadratmetoden för bästa överstämmelse med fältdata. Minstakvadratanpassning av konstanter kommer även att avslöja för oss vilka termer i ekvation (1) som är relevanta och vilka som inte är det. Förhoppningsvis kommer vi fram till slutsatsen att endast C_1 till C_4 har någon betydelse (vilket då ger bra resultat jämfört med vad Persson och Hyypä kommit fram till i [4] respektive [3]). Se även 2.4.

5.2 Biomassan

För att bestämma biomassan tänker vi använda oss av tre olika metoder:

- statistiskt framtagen modell,
- Marklunds formler efter statistisk artsbestämning,
- anpassning med hjälp av "liknande träd"-principen.

Statistisk modell

Denna metod för biomassbestämning bygger på precis samma principer som den för stamdiametern. Vi ansätter en funktion med två ingångsvariabler – krondiametern L och höjden h – och anpassar konstanter D_1 till D_7 så att

de beräknade modellvärden B stämmer bäst med de fältuppmätta värden i minstakvadratmening. Se ekvation (2).

$$B = D_1 + D_2h + D_3L + D_4hL + D_5h^2L + D_6hL^2 + D_7h^2L^2 \quad (2)$$

Marklunds formler

Marklunds formler, som tidigare beskrivits i teoriavsnittet, kan ge oss bra värden på biomassa förutsatt att vi har tillgång till trädarten. Trädarten kan bestämmas på några olika sätt och ett av dessa beskrivs noggrannare i avsnitt 7.3 som har baserats på [5].

”Liknande träd”-anpassning

En tredje metod, som vi använder vid bestämning av biomassan, utförs i två steg:

- En tabell ställs upp för en grupp av referensträd (som bara utgörs av de kopplade träden). Den laserbestämda höjden och krondiametern ställs bredvid den fältuppmätta biomassan för varje referensträd.
- Det undersökta trädet jämförs med träden i tabellen. Det undersökta trädet antas ha samma biomassa som det tabellträdet som har mest lika höjd och krondiameter.

Denna metod implementeras enkelt. Träden jämförs på följande sätt:

1. alla tabellträd med höjden som avviker som mest med 10% från laserträdets höjd tas fram,
2. ur den gruppen väljs det trädet som avviker minst i krondiametern.

Tabell 2: Resultat av trädidentifikation. $b_{fält}$ är procentandelen av den riktiga fältbiomassan för alla identifierade träd på området. b_{modell} är procentandelen av den riktiga fältbiomassan som utgörs av den modellerade biomassan för länkade träd. n är procentandelen fältträd som hittats vid länkning.

Område	$b_{fält}$ (%):	b_{modell} (%):	n (%):
1	97	101	68
2	67	55	29
3	70	78	48
4	88	104	46
5	67	57	41
6	96	81	96
7	81	68	67
8	98	73	95
9	67	79	31
10	89	97	73
11	81	70	45

6 Resultat

6.1 Detektion av enskilda träd

6.1.1 Identifikation av laser- och fältträd

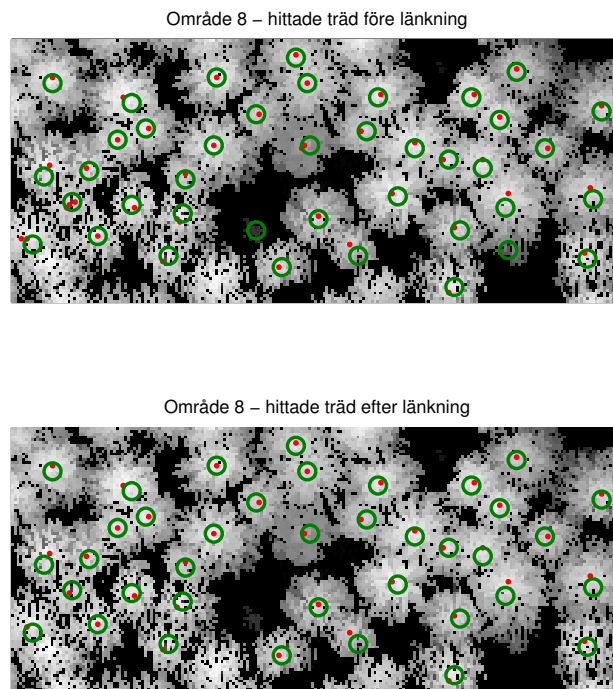
Den övre bilden i Figur 8 och Figur 9 visar resultatet från detektion av enskilda träd. Den undre bilden visar resultatet efter identifiering av träd och borttagning av icke-länkade träd och man kan se att resultatet varierar mellan områdena. Identifikationssäkerheten redovisas i Tabell 2. I område 8 hittades 95% av alla träd vilket motsvarade 98% av den totala biomassan. I område 3 hittades 48% av alla träd vilket motsvarade 70% av den totala biomassan.

6.1.2 Bestämning av enskilda träds position

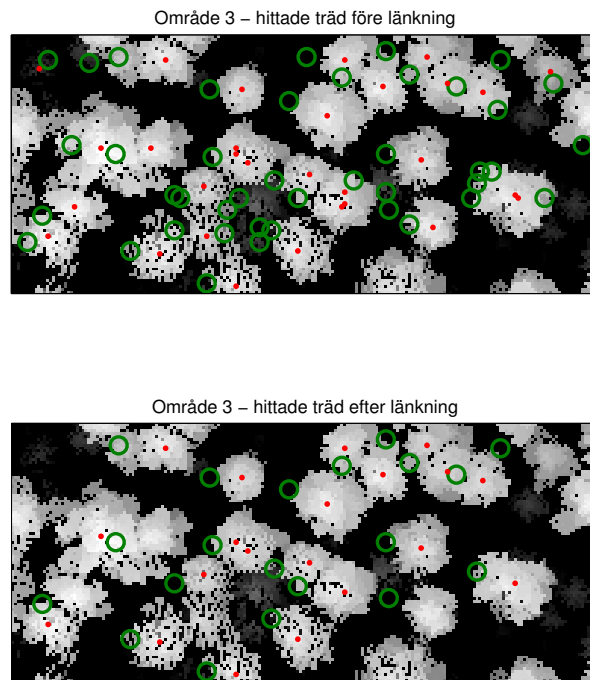
I Figur 10 redovisas avståndet mellan laserträdet och fältträdet för varje hittat par. Grafen till vänster visar avvikelse i nord-syd- och väst-öst-position medan histogrammet till höger visar fördelning för avvikelser i norm. Medelvärde för avvikelsen är 0.27 m norrut och 0.45 m västerut (fältträden ligger i genomsnitt 0.27 m norr och 0.45 m väst om laserträden). Standardavvikelsen är 0.84 m i nord-syd-riktning och 0.76 i väst-öst-riktning. I histogrammet kan man se att den vanligast förekommande avvikelsen i norm är 0.6 m.

6.2 Uppskattning av trädhöjd

I Figur 11 är laseruppmätt trädhöjd plottad mot fältuppmätt trädhöjd efter det att träden parats och felkopplingar borttagits. Linjen i grafen är anpassad till datan med minstakvadratmetoden och skär y-axeln vid 0.92 m, har en lutning av 0.98 och RMSE lika med 1.2 m (eller 5% av medelhöjden). Korrelationskoefficienten i kvadrat är $r^2 = 0.92$.



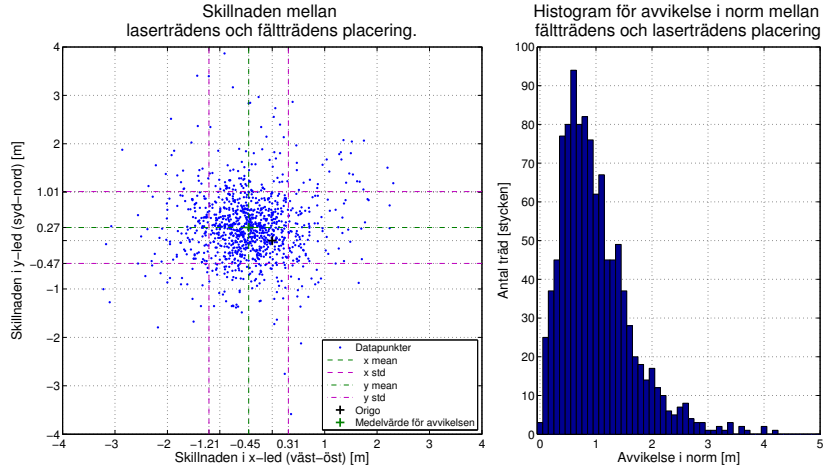
Figur 8: Resultat av identifikation: detekterade laserträd (visas som röda punkter) plockas bort om inget fältträd (visas som gröna ringar) finns i närheten och fältträd plockas bort om de avviker för mycket i höjd och avstånd från närliggande laserträd. Område 8 visas som ett exempel på ett område där parningen fungerar bra.



Figur 9: Resultat av identifikation: detekterade laserträd (visas som röda punkter) plockas bort om inget fältträd (visas som gröna ringar) finns i närheten och fältträd plockas bort om de avviker för mycket i höjden och avståndet från närliggande laserträd. Område 3 visas som ett exempel på ett område där parningen fungerar mindre bra.

Tabell 3: Resultat från lasermätningar på beståndsnivån. Omr = områdesnummer (nummer, som används i texten om områden; t_n är testområden), Id = identifikationsnummer enligt bilagan, A = area i ha, B_r = total biomassa i ton/ha, B_1 = procentuell andel av den totala biomassan hittad med den statistiska modellen, B_2 = procentuell andel av den totala biomassan hittad med "liknande träd"-metoden, ρ = trädensitet i träd/m², ρ' = "ytdensitet" (procentuell andel av den totala ytan, från luften sett, som tas upp av trädkronor), ff = felfaktor vid koppling (saknas för testområden), t = procentuell andel av fältträd som hittas med lasern.

Omr:	Id:	A :	B_r :	B_1 :	B_2 :	ρ :	ρ' :	ff :	t :
1	1	0.6	206.5	120	113	352	81	0.39	74
2	2	0.1	247.0	71	87	310	89	0.58	34
3	3	0.1	166.9	66	70	300	86	0.42	48
4	5	0.6	164.2	118	122	478	92	0.54	50
5	6	0.1	68.5	73	82	630	91	0.62	45
6	7	0.1	175.2	91	110	340	91	0.29	100
7	8	0.1	292.9	77	80	320	84	0.20	70
8	9	0.6	226.6	98	88	430	83	0.18	82
9	12	0.6	287.3	95	68	350	97	0.56	85
10	14	0.7	53.3	112	117	487	93	0.37	82
11	15	0.6	109.5	102	129	447	97	0.67	61
t1	10	0.6	160.8	97	110	522	87	-	90
t2	11	0.1	283.0	84	98	610	80	-	105
t3	13	0.1	172.4	88	97	510	88	-	33
t4	16	0.6	289.3	88	66	1013	89	-	79
t5	17	0.6	158.0	94	110	507	85	-	79
t6	18	0.6	266.6	79	69	473	82	-	86



Figur 10: Träffsäkerhet vid bestämning av laserträdens placering. Till vänster plottas avvikelsen i två dimensioner ($\Delta \vec{R} = \vec{R}_{field} - \vec{R}_{laser}$). Dessutom visas medelvärde och standardavvikelsen. Till höger visas ett histogram för normavvikelsen ($\Delta R = |\Delta \vec{R}|$).

Tabell 4: Konstanter till ekvation (1) som bestämts med hjälp av minstakvadrat-metoden. Märk att vissa konstanter är väldigt små och deras bidrag kan försummas.

C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7
6.7860	0.7846	-1.0026	-0.0862	0.0254	0.0050	-0.0007

6.3 Uppskattning av stamdiameter

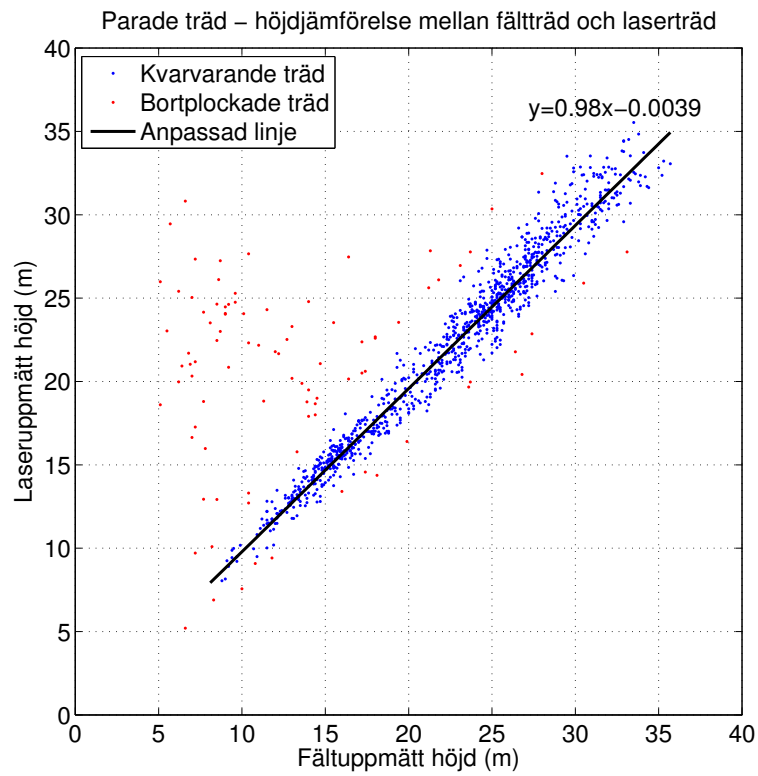
I Figur 12 plottas stamdiametern bestämd enligt ekvation (1) mot den fältuppmätta stamdiametern. Den anpassade linjen har lutning 1 och skär origo. RMSE är 4.15 cm och korrelationskoefficienten i kvadrat är $r^2 = 0.83$. Använda värden på konstanter i (1) kan ses i Tabell 4. Man kan se att det egentligen bara är de tre första konstanterna som bidrar till den totala biomassan. Ett samband av typen

$$d = 6.79 + 0.78h - 1.00L$$

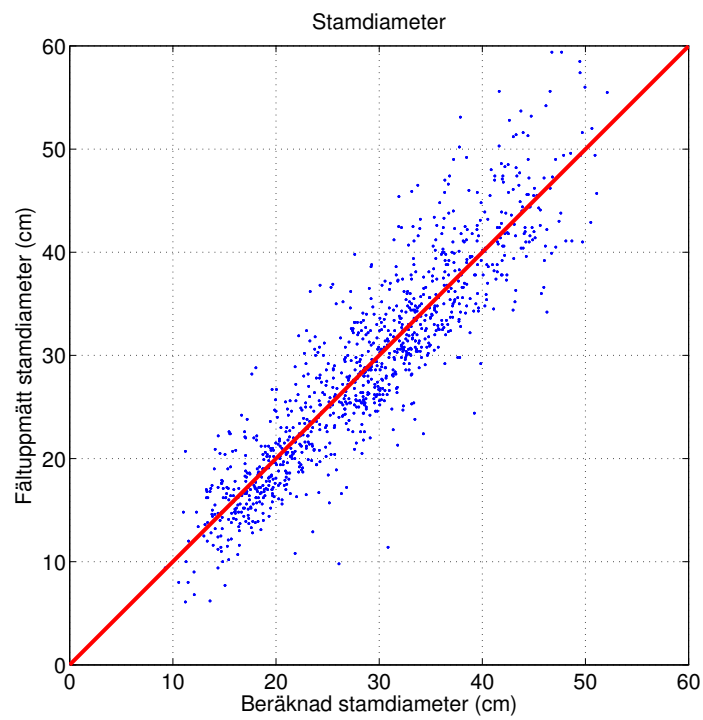
erhålls som ger formeln för stamdiametern d givet höjden h och krondiametern L .

6.4 Uppskattning av biomassa

I den vänstra grafen i Figur 13 plottas den fältuppmätta biomassan mot biomassan beräknad enligt ekvation (2) med konstanter som i Tabell 5 för de 1058 parade träden. Linjen i grafen är anpassad till datan men är i princip en $y = x$ -linje. Detta eftersom ekvation (2), som bestämmer den beräknade biomassan, väljs så att $y = x$ är en linjär regression av datan. RMSE är 123kg (eller cirka



Figur 11: Uppskattad höjd på laserträden plottad mot fältuppmätt höjd efter parning och bortplockning av tydliga felkopplingar (blå prickar), 1058 st. träd. De bortplockade kopplade träden plottas som röda prickar.



Figur 12: Stamdiameter beräknad med ekvation (1) plottas här mot den fältuppmätta stamdiameteren. Den röda linjen är anpassad i minstakvadratmening och följer $y = x$ -linjen mycket väl (vilket inte är så konstigt då funktionen (1) är framtagen för bästa överensstämmelse med fälldata).

Tabell 5: Konstanter till ekvation (2) som bestämts med hjälp av minstakvadrat-metoden. Märk att vissa konstanter är väldigt små och deras bidrag kan försummas.

D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7
-118.9445	21.1816	43.6753	-10.9909	0.6556	0.3280	-0.0152

30% av medelbiomassan). Korrelationskoefficienten i kvadrat är $r^2 = 0.83$.

I Figur 14 plottas den sammanlagda biomassan per areaenhet beräknad för alla 17 områden. Biomassan beräknas på två olika sätt, så som det står beskrivet i teoriavsnittet. Ekvationer för de anpassade linjerna kan ses i figuren. RMSE för biomassan bestämd med ekvation (2) är 37.5 ton (eller cirka 19% av medelvärdet för den fältuppmätta biomassan på alla områden) och korrelationskoefficienten i kvadrat är $r^2 = 0.82$. RMSE för biomassan bestämd med den "liknande träd"-metoden är 46.8 ton (eller cirka 24% av medelvärdet för den fältuppmätta biomassan på alla områden) och korrelationskoefficienten i kvadrat är $r^2 = 0.66$.

I Figur 15 kan man se skillnader mellan de fältuppmätta och laseruppmätta biomassorna på varje område. Till vänster plottas skillnaden i ton/ha och till höger plottas den procentuella avvikelsen från de fältuppmätta biomassorna. Medelvärden är: -20.3 ton/ha (alla områden), -42.8 ton/ha (små områden) och -4.54 ton/ha (stora områden). Motsvarande standardavvikelser är: 32.5 ton/ha (alla områden), 24.4 ton/ha (små områden) och 28.6 ton/ha (stora områden). På de små områden varierar skillnaden mellan -15.8 och -72.5 ton/ha. På de stora områden varierar skillnaden mellan -57.2 och 42.2 ton/ha.

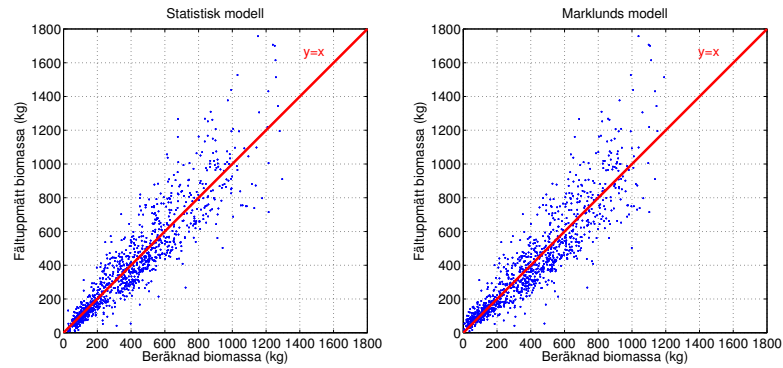
Man kan även mäta motsvarande storheter som procentuell avvikelse från de fältuppmätta biomassorna. Då blir medelskillnaden för alla områden -8.7% (alltså en underskattning på 8.7% av den totala, fältuppmätta biomassan). För stora områden blir detta tal 0.3% och för små områden -21.2%. Standardavvikelser för denna skillnad blir 16 procentenheter för alla områden, 13 procentenheter för stora områden och 9 procentenheter för små områden. Skillnaden varierar alltså mellan -21% och 20% för stora områden samt -34% och -9% för små områden.

6.5 Beräkning av biomassa med Marklunds formel

I den högra grafen i Figur 13 kan man se resultat av beräkningar av biomassa utförda med hjälp av Marklunds formler (se Appendix B). Dessa kräver höjden, stamdiametern och arten. Vi använde laserskattad trädhöjd, stamdiameter beräknad med ekvation 1 och arten bestämd enligt avsnitt 7.3. Det visade sig att Marklunds formler för biomassa ($B_{marklund}$) fick modifieras för att passa till fältdata. Då blev biomassan B alltså:

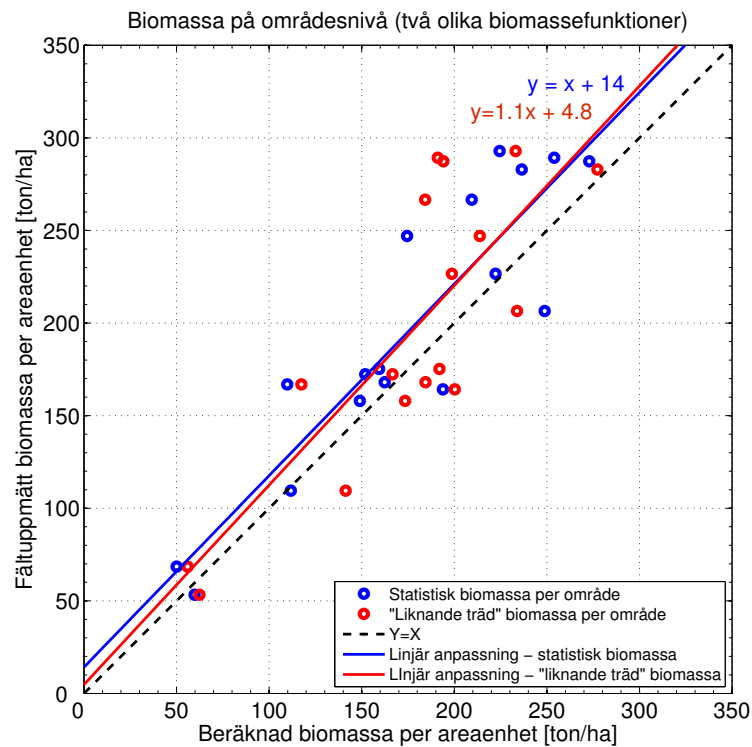
$$B = CB_{marklund} + D$$

där konstanten C bestämdes till 0.35 och D till -62.7 kg. RMSE beräknades till 128.31 kg och korrelationskoefficienten i kvadrat r^2 beräknades till 0.82.

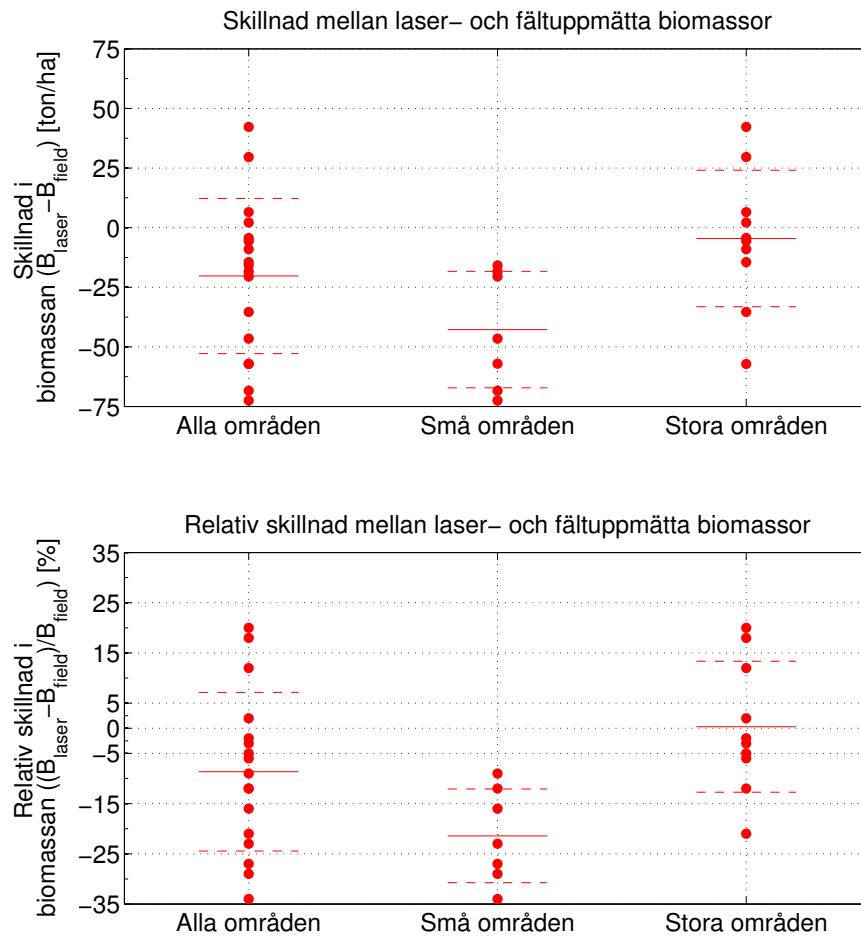


Figur 13: Fältuppmätt biomassa plottad mot den beräknade biomassan. Statistisk modell från ekvation (2) med konstanter som i Tabell 5 ger resultat till vänster och Marklunds formler ger resultat plottade i den högra grafen.

Marklunds formler användes inte vid bestämning av biomassa på beståndsnivån på grund av för stor osäkerhet vid artbestämningen.



Figur 14: Sammanlagd laseruppmätt biomassa för 17 områden plottas mot den fältuppmätta biomassan. Två skilda sätt att ta fram biomassan från laserdata används – den tidigare beskrivna funktionen (se vänstra bilden i Figur 13) samt en funktion som jämför varje hittat laserträd med de 1058 kopplade träden ("liknande träd"-funktionen). Funktionen hittar det träd som liknar det aktuella trädet mest och använder dess fältuppmätta biomassa. Beräknade värden (ringar) plottas tillsammans med anpassade linjära funktioner samt $y = x$ -linjen.



Figur 15: Här plottas skillnaden mellan fältuppmätt biomassa för alla 17 områden samt för de stora områden (80x80 meter) respektive de små områden (20x50 meter). Dessutom visas medelvärden (heldragna linjer) och standardavvikelser (streckade linjer) för varje områdesgrupp. I den övre grafen visas skillnaden i biomassa per areaenhet och i den undre grafen visas den relativa avvikelser i procent.

7 Framtida projekt

Under arbetsgången har vi fått några idéer som vi inte hunnit färdigställa men som vi ändå anser vara intressanta att presentera här.

7.1 Fourieranalys vid val av filterparameter

Den första idén handlar om Fouriertransform av höjddata. Tanken är att man skall kunna läsa av den dominerande fouriertermen (frekvensen) och på det sättet kunna bestämma bra värden för till exempel filterparametrar.

Ett problem vid användning av vanliga, icke-dynamiska filter (alltså sådana som inte anpassar sig efter förhållanden) är att om man använder för stor filterparameter så kommer en del mindre träd att filtreras bort medan för låg parameter kommer att medföra för liten filtrering och för många fiktiva träd.

I olika regioner i en skog växer det ofta en viss typ av träd. De har kanske liknande ålder och art, vilket bör betyda att de har liknande krondiameter. Rimligtvis bör detta implicera ett tydligt periodiskt beteende. Denna periodicitet kan tänkas vara ett tydligt mått på vilket filter som lämpligen används.

Efter att vi tittat på sambandet mellan den största toppen i fouriertransformen och felfaktor vid olika filter kan vi inte se något tydligt samband. Eftersom vi inte hunnit undersöka saken närmare kan vi inte säga huruvida denna brist på samband säger något om metodens funktionalitet.

7.2 Active Contour Model

Elmqvist använder i [1] en konturmodell innan han lägger på bildfiltret. Man jämför detta med att lägga en gummiduk v över trädprofilen I för att reducera bort markträffar och andra ojämnheter. Det man rent tekniskt gör är att minimera energiekvationen (3). Detta gör man genom att ge varje pixel frihet i z -led och iterera sig fram tills ens konvergensvillkor uppfylls. Ett sådant kan väljas på olika sätt men bör på något sätt garantera att modellen börjat närma sig ett jämviktsläge.

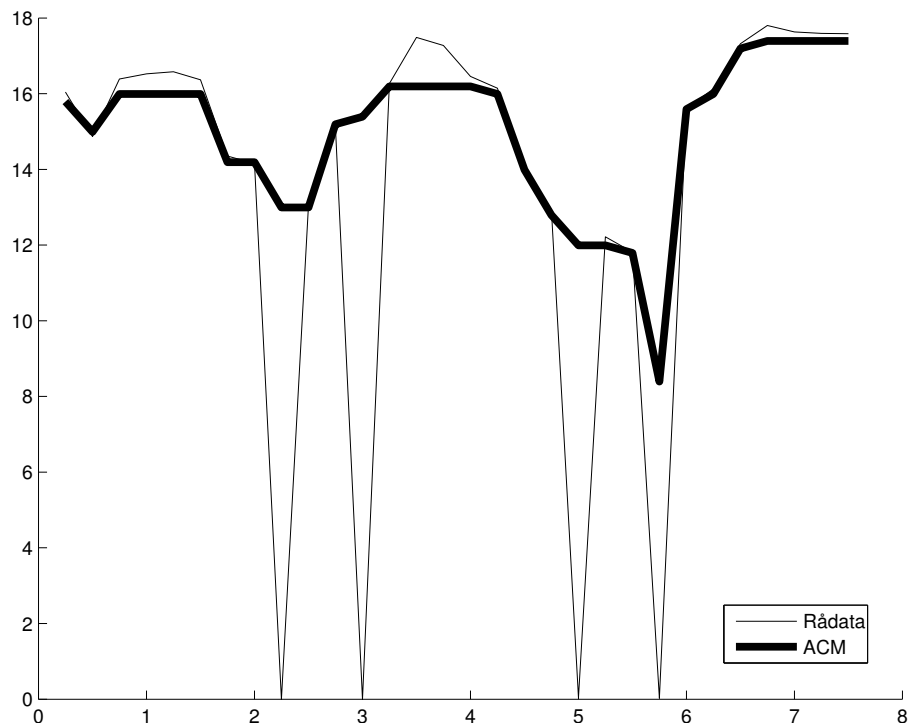
$$E(v) = \sum (E_{int} + E_{im} + E_{ext}) \quad (3)$$

$$E_{int} = C \sum_{m=x-1}^{x+1} \sum_{n=y-1}^{y+1} |\arctan(v(x, y) - v(m, n))| \quad (4)$$

$$E_{im} = -Ae^{-a(I(x, y) - v(x, y))^2} \quad (5)$$

$$E_{ext} = -Gv(x, y) \quad (6)$$

Termen E_{int} i (4) utgör den interna energin i gummiduken, eller om man så vill, dess styvhet. E_{int} kommer att få sitt minimum när $v(x, y)$ utgör ett plan. Termen E_{im} (5) utgör attraktionskraften mellan v och I och kommer att minimeras då v och I sammanfaller. Parametern A kommer att motsvara storleken på kraften och a kommer att motsvara räckvidden som kraften har. Vi applicerar vår kronmodell v ovanifrån och kommer därför till en början behöva en kraft

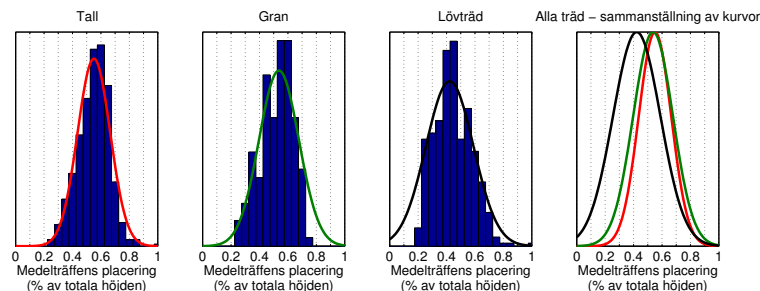


Figur 16: Här ser vi ett snitt ur område 4 som visar hur vår ACM anpassar energiekvationen 3 till vår rådata.

som trycker ner duken så att den kommer inom räckhåll för E_{im} :s attraktionskraft. Det är denna kraft som termen E_{ext} (6) bidrar med. Denna kraft kommer sedan att avta. När vi viktat dessa termer med bra parametrar kommer de att kompromissa fram en modell som kan liknas vid att v lägger sig som en gumminatta över I och eliminerar markträffar och andra penetrationer. Även ifall gumminattan har en viss styvhet så kommer den kanske att attraheras lite av vissa penetrationer och skapa små ojämnheter, dessa eliminerar vi med ett lätt bildfilter.

Fördelen med denna modell gentemot att bara använda ett rumsfilter är att man kan eliminera fluktuationer i större kronor utan att riskera att helt suda bort mindre kronor. Använder man bara ett filter kommer man att behöva kompromissa mellan dessa båda riskfaktorer. Nackdelen med denna modell är att den är mycket krävande att köra. Lämpligtvis så delar man in sitt område i en uppsättning mindre områden innan man applicerar algoritmen. Generellt sett verkar det som att denna metod mest är till fördel då man tittar på lövskog vars kronstruktur ofta har mer komplexa former.

I Figur 16 visas resultatet av en tillämpad ACM.



Figur 17: Snitträffen i procentuell del av trädets totala höjd, indelat i tall, gran och lövträd. Histogram och anpassad Gausskurva visas.

7.3 Artklassificering genom medelträff

Vill man använda sig av Näslunds formler för stamvolym eller Marklunds formler för biomassa måste man först artbestämma trädet man detekterat. Både Marklund och Näslund delar upp träden i de tre kategorierna gran, tall och lövträd. Här har vi inspirerats av Holmgrens och Perssons metod i [5]. Man räknar fram var snitträffen på varje detekterat träd ligger för att sedan analysera datan. Hypotesen är att denna variabel ska kunna ge en bra uppskattning på art. I Figur 17 ser man att tall och gran är mycket svåra att särskilja, men att dessa båda till viss del går att skilja från kategorin lövträd. Detta är positivt då Marklunds formler för biomassa, vilka är det primära objektet för studien, är relativt lika för gran och tall medan den för löv skiljer sig betydligt. Man leds till att istället dela upp de olika träden i kategorierna barr och löv, se Figur 18. Distinktionspunkten (skärningspunkten mellan kurvorna i Figur 18) beräknas till 0.5. Alla träd som man nu detekterar artbestämmer man enligt följande:

- Snitträffen för trädet ligger $> 50\%$ av den totala höjden: Trädet klassificeras som barrträd.
- Snitträffen för trädet ligger $< 50\%$ av den totala höjden: Trädet klassificeras som lövträd.

För att analysera felet, det vill säga hur stor del av alla barrträd som klassificeras som lövträd och vice versa så beräknar man de båda faktorerna:

$$fel_{barr} = \frac{\int_0^{0.5} P_{barr}(x) dx}{\int_0^1 P_{barr}(x) dx} \quad (7)$$

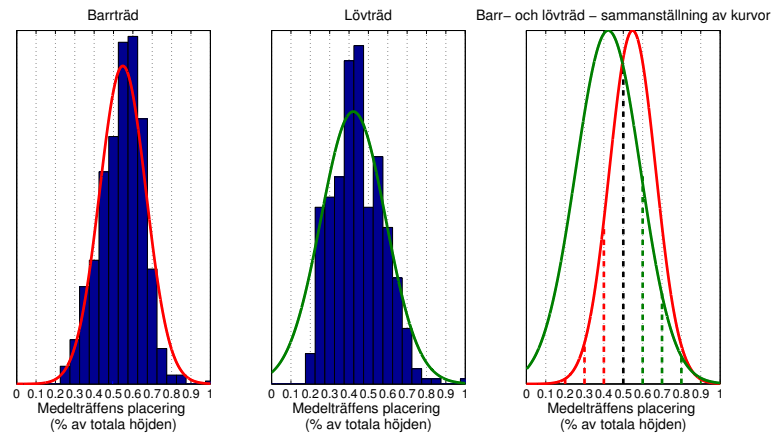
$$fel_{löv} = \frac{\int_{0.5}^1 P_{löv}(x) dx}{\int_0^1 P_{löv}(x) dx} \quad (8)$$

I vårt fall erhålls:

$$fel_{barr} = 0.34$$

och

$$fel_{löv} = 0.32.$$



Figur 18: Snitträffen i procentuell del av trädets totala höjd, indelat i barr- och lövträd. Histogram och anpassad Gausskurva visas.

Detta betyder alltså att i genomsnitt 34% av barrträd klassificeras fel som lövträd och 32% av lövträd klassificeras fel som barrträd. Efter denna, något osäkra steg, kan man gå vidare till beräkning av biomassa med hjälp av Marklunds formler. Detta redovisas i avsnitt 6.

8 Diskussion

8.1 Detektion och identifikation av träd

Iakttag Figur 9 och Figur 8. Här ser vi ett exempel på ett område där identifikationen har fungerat bra, samt ett där den fungerat sämre.

I fallet med område 3 kan man se att detektionen verkar fungera mindre bra, och vi missar relativt många träd. Vi lyckas para 48% av träden i område 3, vilka motsvarar 70% av den totala biomassan. Detta implicerar att vi missar de mindre träden. Detta kan bero på att dessa "gömmar sig" under de större, eller att vi filtrerar för hårt.

Det som ytterligare verkar fela på område 3 vid identifikation är fältmätningarna. Iakttag Figur 15. Figuren visar att det finns en avvikelse mellan detekterade träd och fältuppmätta träd. Detta skulle kunna bero på att stammens position och kronans position vanligtvis avviker. Avvikelsen beror på att fältträdet position tas vid brösthöjden från marken sett medan de detekterades position tas vid trädtoppen. Om ett träd lutar avviker de från varandra. En annan teori är att GPS-positioneringen, som har en osäkerhet i storleksordningen av vår felpositionering, kan bidra till avvikelsen. Dessa avvikelser tillsammans försvårar identifikationen. Att vi givit fältträden en frihetsgrad på två pixlar (en halv meter) i respektive led vid identifikationen bör dock överbrygga detta fel i de flesta fallen. Men vi har också en standardavvikelse på cirka en meter vilket kommer att bidra till att vi misslyckas med att identifiera träden i vissa fall.

När man utfört den första delen av identifikationen finns det fortfarande en viss risk att man gjort en felidentifikation. Dessa felidentifikationer är förstått inte till fördel då vi vill träna en statistisk modell på datan. Därför sällar vi bort de identifikationer där detekterat och fältuppmätt träd avviker för mycket i höjdd. Se Figur 11. De blå punkterna är trädpar efter jämförelse i höjd och de röda punkterna är de par som tagits bort. De blå punkterna tjänar mycket dåligt som värdemätare på detektions- och identifikationsalgoritmerna och det är egentligen de röda punkterna som är intressanta. Här kan vi se att vi ofta identifierar ett högre detekterat träd i par med ett mindre fältuppmätt. Detta uppstår troligen då man får en dubbelträff i en krona där ett mindre träd gömmer sig under ett större. En av detektionerna kommer då att identifieras som det stora trädet medan det mindre trädet återstår för den andra detektionen. En annan teori är att det helt enkelt finns så många små träd att en förskjutning av fältmätningarna kan resultera i att ett sådant råkar sammanfalla med detektionen.

8.2 Statistisk analys

Från början var tanken att vi skulle kunna bestämma arten för varje träd först och därefter använda Marklunds formler för att bestämma biomassan. Detta visade sig dock vara svårt då felet vid arbetstämningen blev drygt 30%, vilket vi ansåg för högt. Vi provade dock funktionen på trädnivån. Marklunds funktioner visade sig fungera bra först efter en viss linjär modifikation. Dock stötte vi även på lite problem vid bestämning av medelträffhöjden vilket gjorde det omöjligt

för oss att med god noggrannhet bestämma biomassan på beståndsnivån.

En trolig anledning till artbestämningens dåliga säkerhet är rådatan. Den oprocessade höjdprofilen vi från början erhåller från lasermätningarna är i viss mening redan nersamplad. Vår data innehåller nio träffar per m^2 , men fler mätningar har gjorts. Det är endast den största mätningen för varje område om 25×25 cm som vår data innehåller. Detta betyder att man många gånger kommer att eliminera markträffar, som förvisso kan ställa till det vid bildprocessering, men som innehåller potentiell information vid vår undersökning. Innan man förklarar nederlag bör man också ta i beaktande att konventionella modeller för artbestämning använder kompletterande indata som underlag. Det väntade är alltså att artbestämning med den enda variabeln ”snitthöjdräff” torde ge en dålig säkerhet.

Som ett alternativ till Marklunds formler ställde vi således upp en egen ekvation som bestod av sju delar och utgjorde ett slags polynom i två variabler. Formeln inspirerades till stora delar av Marklunds formler. Vi anpassade konstanterna med minstakvadratmetoden för bästa överstämmelse med fälttada. Vi fick en modell som gav oss bra resultat även på beståndsnivå. Varje träds biomassa kunde uppskattas med RMSE som motsvarade ca 30% av medelvärdet. Summering av alla träds biomassor på varje område gav totalt en RMSE-avvikelse på 37.5 ton/ha eller cirka 19% av medelvärdet. Felet är förvisso större än motsvarande fel för till exempel Persson i [4] eller Hyypä i [3] men vi har ändå en säkerhet på cirka 80%.

Den tredje metoden för bestämning av biomassan, nämligen jämförelse med referensträd, gav oss ett något sämre resultat. Detta är inte så konstigt om man tänker på att man jämför med alla parade träd. De parade träden är bara av sådant typ som går att hitta, alltså stora, tydliga träd. Därmed kommer alla små träd att approximeras med större och en överskattning bör ske med den andra metoden. Spridningen är större och metoden verkar vara allmänt sämre.

En intressant sak som bör noteras är att vår statistiska modell gav mycket bättre resultat på stora områden. Detta tycker vi är märkvärt eftersom vi räknar på biomassa per areaenhet och då bör inte storleken på beståndet påverka modellens säkerhet. En förklaring till detta kan heta ”kantträd”. Det är nämligen så att vår algoritm fungerar mindre bra vid höjdmatrisens kanter. Verkliga träd som finns vid kanter kan lätt filtreras bort eller förbises av andra anledningar. Träd som saknas medför en underskattning av biomassan vilket i sin tur förklarar varför medelvärdet på avvikelsen för biomassa i små områden är hela -21.2% jämfört med 0.3% för stora områden. Detta är ett typiskt tecken på ett systematiskt fel som kan åtgärdas med en korrektion i algoritmen eller i statistisk analys.

8.3 Utvärdering av arbetsgången

En problematik vi ställdes inför under arbetets gång var prioritering. Till exempel skulle det kännas tillfredsställande med en mer avancerad processering av rådatan, men detta måste ställas i proportion till tidsåtgången. Kanske används tiden bättre till mer noggrann statistisk analys av data. Denna avvägning

är mycket svår att göra men vi är över lag nöjda. En annan viktig lärdom man kan dra är att inse i tid när en hypotes inte kommer bära frukt. Vissa hypoteser kan se bra ut på ritbordet men visa sig svåra att genomföra, eller helt enkelt vara felaktiga. Lär man sig att avgöra detta kan man spara mycket tid till arbete som faktiskt kommer ge resultat.

Referenser

- [1] M. Elmqvist, 2002, *Ground Surface Estimation from Airborne Laser Scanner Data Using Active Shape Models*; In *Proceedings from the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) Commission III Symposium Graz 2002*, Austria, September 9-13, Vol XXXIV, Part 3A, pp. 114-118
- [2] E. Naesset, T. Gobakken, J. Holmgren, H. Hyypä, J. Hyypä, M. Maltamo, M. Nilsson, H. Olsson, Å. Persson och U. Söderman, 2004, *Laser Scanning of Forest Resources: The Nordic Experience*, In *Scandinavian Journal of Forest Research* 19, pp. 482-499
- [3] J. Hyypä, O. Kelle, M. Lehtikainen, M. Inkinen, May 2001, *A Segmentation-Based Method to Retrieve Stem Volume Estimates from 3D Tree Height Models Produced by Laser Scanners* In *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 39, No. 5, pp. 969-975
- [4] Å. Persson, J. Holmgren, U. Söderman, September 2002, *Detecting and Measuring Individual Trees Using an Airborne Laser Scanner* In *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 68, No. 9, pp. 925-932
- [5] J. Holmgren, Å. Persson, 2003, *Identifying Species of Individual Trees Using Airborne Laser Scanner*, *Acta Universitatis Agriculturae Sueciae*, Silvestria 278, Appendix V, Swedish University of Agricultural Sciences, Linköping, Sweden
- [6] J. Holmgren, 2003 *Estimation of Forest Variables using Airborne Laser Scanning - Doctoral Thesis*, *Acta Universitatis Agriculturae Sueciae*, Silvestria 278, Swedish University of Agricultural Sciences, Linköping, Sweden
- [7] J. Holmgren, 2003 *Prediction of Tree Height, Basal Area, and Stem Volume in Forest Stands Using Airborne Laser Scanning*, *Acta Universitatis Agriculturae Sueciae*, Silvestria 278, Appendix III, Swedish University of Agricultural Sciences, Linköping, Sweden
- [8] M. Näslund, 1947, *Functions and Tables for Computing the Cubic Volume of Standing Trees: Pine, Spruce and Birch in Southern Sweden and in the Whole of Sweden*, Report 36, National Forest Research Institute, Stockholm, Sweden, 81 p.
- [9] R.F. Nelson, P. Hyde, P. Johnson, B. Emesiene, M.L. Imhoff, R. Campbell, W. Edwards, 11 October 2006 *Investigating RaDAR-LiDAR synergy in a North Carolina Pine Forest*, In *Remote Sensing of Environment*, No. 110, pp. 98-108

- [10] J. Laasasenaho, 1982 *Taper Curve and Volume Functions for Pine, Spruce and Birch*, In *Commun. Inst. Forest Fenn.*, vol 108
- [11] Rafael C Gonzales, Richard E Woods, Steven L Eddins *Digital Image Processing using Matlab*, Pearson Education, Inc 2004. ISBN: 0-13-008519-7

A Individuella bidrag

A.1 Viktor Kärnstrand

Viktor har totalt lagt ner drygt 260 timmar på arbetet.

Ansvarsområden

- algoritmutveckling för bildbehandling och -analys
- marknadsundersökning

Bidrag till problemlösning, syntes och analys

- framtagning av *seed*-funktionen
- huvudansvarig vid utveckling av algoritmer identifikationsfunktion och ACM
- initiativtagare och huvudperson vid framtagning av algoritmen för artidentifiering och fouriertransformen
- samling av information till inledningen

Skrivna avsnitt

- sammanfattning (med Erik)
- inledning
- material (med Erik)
- algoritm
- framtida projekt
- diskussion (med Erik och Maciej)

A.2 Erik Landström

Erik har totalt lagt ner drygt 225 timmar på arbetet.

Ansvarsområden

- korrekturläsning
- framtagning av statistiska metoder
- litteraturstudier och kunskapsinhämtning

Bidrag till problemlösning, syntes och analys

- litteraturstudie i skattning och statistisk analys (framställning av bland annat biomassa stamdiameter)
- utveckling av algoritmer identifikationsfunktion och ACM (tillsammans med Viktor)

- utveckling av algorimter för statistisk analys (tillsammans med Maciej)

Skrivna avsnitt

- sammanfattning (med Viktor)
- material (med Viktor)
- statistiska delen i teori
- resultat (med Maciej)
- diskussion (med Maciej och Viktor)

A.3 Maciej Soja

Maciej har totalt lagt ner drygt 230 timmar på arbetet.

Ansvarsområden

- planering och teambuilding
- algoritmutveckling vid datainhämtning och förbehandling (med Viktor)
- algoritmutveckling vid statistisk analys och skattning av parametrar (tillsammans med Erik)
- grafisk framställning av resultat

Bidrag till problemlösning, syntes och analys

- framtagning av stamdiameter- och biomassafunktioner
- inläsning av data, koordinatomvandling och filtrering av fältdata
- delansvarig vid framtagning av algoritmen för artidentifiering och fouriertransformen (med Viktor)
- framtagning av rutiner för figurtillverkning

Skrivna avsnitt

- teori
- metod för statistisk analys
- resultat
- diskussion (med Erik och Viktor)
- referenser

B Datablad om fältmätningar**C Datablad om lasermätningar**