



Arbetsrapport

Från Skogforsk nr. 855–2014

Mobilt mätsystem för insamling av träd- och beståndsdata

Mobile measurement system for
collecting tree and stand data

Erik Willén, Lars Fridh och Andreas Barth Skogforsk;
Johan Holmgren och Kenneth Olofsson, Sveriges lantbruksuniversitet;
Erika Bilock, Philip Engström, Håkan Larsson och Joakim Rydell,
Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI):

Arbetsrapport

Från Skogforsk nr. 855-2014

I serien Arbetsrapport finns bakgrundsmaterial, metodbeskrivningar, resultat, analyser och slutsatser från både pågående och avslutad forskning.

Titel:

Mobilt mätsystem för insamling av träd- och beståndsdata.

Mobile measurement system for collecting tree and stand data.

Bildtext:

Fältmätningar i Östergötland.

Fotograf: Andreas Barth.

Ämnesord:

Mobila sensorer, laserskanning, gallringsskördare.

Mobile sensors, laser scanning, thinning harvester.

Redigering och formgivning:

Ingegerd Hallberg

© Skogforsk 2014

ISSN 1404-305X



SKOGFORSK

Uppsala Science Park, 751 83 Uppsala

Tel: 018-18 85 00 Fax: 018-18 86 00

skogforsk@skogforsk.se

skogforsk.se



Erik Willén, är jägmästare med mer än 18 års erfarenhet av skoglig fjärranalys. På Skogforsk är Eriks expertområden geodata och fjärranalys för skoglig planering.



Lars Fridh, jägmästare, anställd inom skogsbränsleprogrammet sedan 2011. Arbetar huvudsakligen med mätning av skogsbränslets kvantitet och kvalitet samt sortimentsfrågor.



Andreas Barth, SkogD. Anställd på Skogforsk mellan 2007 och 2014. Forskare inom inventering och planering i skogsbruket. (I dag anställd på företaget CGI Sverige AB).

Abstract

The purpose of this project was to develop a mobile system that can be mounted on a thinning harvester for automated collection and calculation of tree and stand data. Measurement systems have the potential to improve quality and efficiency, by providing decision support to harvester operators before, during, and after the thinning procedure.

The stereo camera-based positioning system used in this study was based on SLAM technology, which can be used to describe the position of the trees. The positioning system was supplemented with a laser scanner, and high-precision terrestrial laser measurements were used for the assessment.

The results at stand level showed an estimate of the number of stems with RMSE of 50 stems/ha, corresponding to a relative value of 9%, and an estimate of basal area with RMSE of 2.4 m²/ha (8% relative value). In contrast, the RMSE for diameter measurements at individual tree level was 58 mm (24% relative value), which includes a few measurements with large errors. The measurement system can be used to collect data for a distance of 80–100 metres, and produces results of 8–9% in the RMSE for number of stems and basal area.

Förord

Denna rapport beskriver utfört arbete och resultat från projektet Mobilt mätsystem för insamling av träd- och beståndsdata. Det har utförts av Skogforsk (projektledare), Sveriges lantbruksuniversitet och Totalförsvarets Forskningsinstitut i samarbete. Projektet har finansierats av Brattåsstiftelsen för skogsvetenskaplig forskning under 2013-2014.

Projektet vill speciellt tacka de markägare som visat intresse och haft möjlighet att ställa upp med skogsområden där tester med mätsystemet utförts. Vi vill bland annat tacka Jan Persson på Häradsmarken AB och den skördarförare (Anton Göransson vid Östgöta Skogsentreprenad AB) vars maskin projektet lät montera kameror på, för att mäta skördarens rörelser. För det andra skogsområdet i Södermanland ställde Holmen Skog AB upp som markvärd och i Sonstorp var det Linköpings Skogtjänst, förvaltare Jan Karlsson, men även markägaren Carl-Gustaf Mörner som visade stort intresse för den nya tekniken.

Uppsala december 2014

Skogforsk:

Andreas Barth (I dag anställd på företaget CGI Sverige AB).

Lars Fridh

Erik Willén

Sveriges lantbruksuniversitet:

Johan Holmgren

Kenneth Olofsson

Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI):

Erika Bilock

Philip Engström

Håkan Larsson

Joakim Rydell

Innehåll

Förord.....	1
Summary	3
Sammanfattning.....	4
Introduktion	5
Syfte och mål.....	7
Material och metoder.....	8
Försöksområden	8
Älvan.....	8
Högsten	8
Sonstorp.....	9
Mätutrustning.....	10
Förstudie	10
Positionering.....	12
Teknik.....	12
Avbildning.....	14
Algoritmer för beräkning av träddata.....	15
Höjdmodell och träddektekering	15
Skattning av stamdiameter	16
Referensdatainsamling	16
Utvärdering av systemet för att beräkna skogliga egenskaper.....	19
Resultat.....	20
System för mätning och bearbetning av data.....	20
Positionering.....	20
Beräknade skogliga egenskaper	22
Diskussion.....	25
System för mätning och bearbetning av data.....	25
Algoritmer för beräkning av träddata.....	25
Utvärdering av systemet för att beräkna skogliga egenskaper.....	27
Mätsystemets operativa tillämpning.....	28
Robusta mätsystem.....	28
Möjlighet till god positionering	29
Mätavstånd.....	29
Beräknade skogliga egenskaper	29
Användarutvärdering.....	30
Fortsatt forskning och utveckling.....	31
Slutsatser	32
Referenser	33

Summary

The purpose of this project was to develop a mobile system that can be mounted on a thinning harvester for automated collection and calculation of tree and stand data. Measurement systems have the potential to improve quality and efficiency, by providing decision support to harvester operators before, during, and after the thinning procedure.

The aim of the project was to develop a mobile system that could produce a tree map, with information about diameter and position, and an automatic calculation of the basal area of the stand, number of stems and diameter distribution. To evaluate the harvester movements, video cameras were mounted on the cab to monitor the harvesting work. The cameras showed that the harvester rocked considerably during tree felling, while all wheels were still, so a positioning system based on odometry is less suitable than a camera-based positioning system.

The camera-based positioning system used in the study was based on SLAM technology, which monitors objects from a stereo camera. This can be used to describe the position of the trees. The positioning system was supplemented with a laser scanner that measures the distance to the object within a 190-degree field of vision up to 80 metres. In order to obtain usable 3D forest data, the sensor must be moved through the forest and, in this project, the measuring system was mounted on a jeep. Five different forest areas, in Östergötland and Södermanland, were selected as sites for the trials. High-precision terrestrial laser measurements were used for the assessment.

The results at stand level showed an estimate of the number of stems with RMSE of 50 stems/ha, corresponding to a relative value of 9%, and an estimate of basal area with RMSE of 2.4 m²/ha (8% relative value). In contrast, the RMSE for diameter measurements at individual tree level was 58 mm (24% relative value), which included a few measurements with large errors.

The measurement system can be used to collect data for a distance of 80–100 metres, producing results of 8–9% in the RMSE for number of stems and basal area.

Further development of the currently available mobile laser scanners is recommended as technology advances and improves both price and performance. Mobile measuring systems are on the verge of operational implementation in forestry.

Sammanfattning

Syftet med detta projekt var att ta fram ett mobilt system som kan monteras på en gallringsskördare för automatisk insamling och beräkning av träd- och beståndsdata. Mätssystem har potential att ge skördarföraren stöd för kvalitets- och effektivitetsstödande beslut innan, under och efter gallringsingreppet.

Projektets mål var att ta fram ett mobilt system för att upprätta en trädlista med identifiering av diameter och position och möjlighet till automatisk beräkning av beståndets grundyta, stamantal och diameterfördelning.

För att utvärdera skördarens rörelser monterades videokameror på förarhytten vilka följde avverkningsarbetet. Det konstaterades att skördaren gungar kraftigt under trädavverkning samtidigt som samtliga hjul står stilla. Det medför att ett positioneringssystem som bygger på odometri passar sämre än ett kamerabaserat positioneringssystem.

Det kamerabaserade positioneringssystemet som användes bygger på SLAM-teknik, där en stereokamera används för att beskriva positionen för träden. Positioneringssystemet kompletterades med en laserskanner som mäter avstånd till objekt inom 190 graders synfält upp till 80 meter. För att få användbara 3D-data över skogen krävs att sensorn förflyttas, d.v.s. färdas genom skogen. I detta projekt genomfördes detta med mätssystemet monterat på en jeep. Fem olika skogsområden i Östergötland och Södermanland valdes ut som försöksområden. För utvärdering användes markbundna lasermätningar med hög precision.

Resultaten på beståndsnivå visade på en skattning av stamantal med ett skattat genomsnittligt fel (RMSE) på 50 stammar/ha, vilket motsvarar ett relativt värde på 9 % samt en skattning av grundyta med RMSE på 2,4 m²/ha (8 % relativt värde). Däremot blev RMSE för diametermätningarna på enskilda trädnivån 58 mm (24 % relativt värde), vilket inkluderar ett fåtal mätningar med stora fel.

Mätssystemet kan användas för att samla in mätvärden som summeras ihop för en körsträcka av 80–100 meter och ger då resultat med 8-9% i RMSE för grundyta och stamantal.

Fortsatt utveckling med de nu förekommande mobila laserskannerns rekommenderas då teknikutvecklingen avancerar, vilket påverkar såväl pris som prestanda positivt. Mobila mätssystem står inför operativ introduktion i skogsbruket.

Introduktion

Projektets vision är att med hjälp av ett mobilt mätsystem monterat på en gallringskördare göra det möjligt att mäta in beståndet runt omkring skördaren för att i realtid beräkna trädens position och diameter med hög precision. Informationen som samlas in med mobila mätsystem kan i framtiden ge föraren stöd för kvalitets- och effektivitetsstödjande beslut innan, under och efter gallringsingreppet.

Med ett mobilt system monterat på gallringskördare kan arbetslagen ges bättre stöd för utförande av gallringsåtgärder (Barth m.fl. 2012a, 2012b). Samtidigt får markägaren en uppmätt redovisning av utförda åtgärder. Genom realtidsmätning kan skördarföraren få information om aktuell grundyta och stamantal för att kontinuerligt anpassa uttaget till variationen i beståndet. Ett mobilt mätsystem ökar dessutom möjligheterna att kartera träd som kan vara skydda vid enstaka mätningar. Brunner & Gizachew (2014) rapporterar om mätfel på uppemot 10 m² i grundyta i enstaka svep med stationär laserskanning.

Markägare kan ha olika mål med gallringen. Ibland eftersträvas exempelvis ett jämt gallringsuttag över hela beståndet medan man i andra fall vill uppnå en jämn grundyta över hela beståndet. Genom införande av ett mobilt mätsystem skulle det vara möjligt att minska riskerna för oavsiktligt höga uttag i någon del av beståndet. Detta minskar även riskerna för skador och förlorad virkesproduktion. Simuleringar som Skogforsk har gjort i kalkylverktyget ”Runes snurra” (Rosvall m.fl. 2007) visar att en avvikelse med 5 % från optimalt grundyteuttag i förstagallring kostar markägaren mellan 1 000–2 000 kr per ha i minskat nuvärde och/eller avverkningsnetto (Barth m.fl. 2012a). Andra fördelar med en uppföljning i realtid är att skördarföraren snabbare kan fatta beslut om antal träd som skall avverkas. För osäkra och framförallt oerfarna skördarförare skulle detta innebära en ökad produktivitet.

Informationen är också viktig ur ett arbetsmiljöperspektiv då det ger ett omedelbart kvitto på hur nära rätt gallringsuttag som avverkningen ligger. Det minskar stressen för förarna att veta hur man ligger till. I ett parallellt projekt, tillsammans med maskintillverkare, kommer Skogforsk att anpassa skördarnas system för att beräkna uttagen grundyta per hektar (Hannrup m.fl. 2011). Med en mobil sensor kan ett sådant system i framtiden kompletteras med information om beståndets grundyta, också före åtgärd. För att metoden skall bli robust och tillräckligt säker för att fungera i alla typer av skogar och i alla delar av ett bestånd behövs kompletterande mätningar på den stående skogen närmast kring skördaren. Med data från mobila mätsystem sker mätningen direkt i det aktuella beståndet och kan på sikt stärka dessa beslutstöd som nu utvecklas. Den direkta mätningen av beståndsuppgifter har också en fördel gentemot luftburna sensorer där skattningar av grundyta sker indirekt via funktioner baserade på trädhöjder. Den direkta mätningen har förutsättningar att bli mer exakta.

Med en bra beskrivning av det kvarvarande beståndet, tillsammans med skördarens produktionsfil, kan informationen från mobila mätsystem höja precisionen och den geografiska upplösningen också i gallringsuppföljningen. Ett fungerande system ger möjlighet till en kvalitetssäkring och objektiv uppföljning av gallringsåtgärden som är värdefull för maskinförare, entreprenörer, markägare och skogsföretag. Vid virkesaffärer lämnas ibland garantier till skogsägare att arbetet skall hålla en viss kvalitet, och med hjälp av informationen från mätsystemet kan markägaren få en detaljerad karta som visar grundyta före och efter utförd åtgärd för alla delar av beståndet. Vidare kan tekniken utvecklas till en detaljerad digital trädskarta som kan öka värdet av skogsbruksplanen genom bättre utbytesberäkningar och ett förbättrat beslutsstöd för framtida åtgärder. Kartan kan också utvecklas till att bekräfta utförd naturhänsyn vid både gallring och slutavverkning. Med ett system för automatisk insamling av träd-data kan informationen ersätta fältinventeringar för process av flygburen laserdata (Holmgren m.fl. 2012).

Skogforsk har tillsammans med FOI och SLU genomfört projektet ”Mätning av bestandsdata med ny sensorteknik på gallringsskördare”. Projektet avslutades under våren 2012 och finansierades av Brattåsstiftelsen. Det avslutade projektet visade på några potentiella tekniker för att mäta bestånd från gallringsskördare. Utifrån den erfarenhet FOI har av bildalstrande lasersensorer valdes teknikerna pulsad linjeskanner samt Short Range Flash (2D-kamera med djupinformation) som de mest lovande teknikerna. För att kunna rekonstruera skogens geometri utifrån dessa båda tekniker krävs det god kännedom om sensorernas position och orientering och därför integrerades dessa sensorer med tröghetsnavigering (IMU), GPS och odometer (varvräknare på ett av fordonets hjul). Försök utfördes 2011 från personbil i skog med en sensorplattform monterad på bilens takräcke, Figur 1 visar de då ingående komponenterna (Engström & Larsson, 2012; Larsson m.fl., 2011). Efterbearbetning av data visade lovande resultat vid användning av en pulsad laserskanner integrerad med IMU och odometer.



Figur 1.
Mätsystemets komponenter monterat på personbil. Laserskanner SICK LMS-511 till vänster och till höger odometer monterad i hjulnavet.

Från ett testområde mättes diametern i 65 % av fallen (13 av 20 undersökta träd) med ± 2 cm noggrannhet, jämfört med en markbunden högupplöst laser-skanner. Trädens position mättes i de flesta fall in med 2 dm noggrannhet. År 2011 kunde vi dock endast göra detta utmed en rak rörelseförflyttning. Då vi började svänga kraftigt med bilen i en cirkelbana i skogen fick vi problem med positioneringen. I ett tidigare projekt har Öhman m.fl. (2008) använd 2D-laser för att positionera plattformen i ett plan. Med stereovision väntas det vara möjligt att lösa positionering i tre dimensioner och även plattformens orientering.

I ett tidigare projekt har befintliga algoritmer använts för att beräkna skogliga data från de 3D-data som sensorerna samlar in (Barth m.fl. 2012a). Här behövs en vidareutveckling av algoritmerna för att skatta stamdiameter även i områden med mycket grenar och undervegetation. Med bättre positionering och algoritmer för att beräkna skogliga variabler finns också möjlighet att i större skala utvärdera tekniken.

Syfte och mål

Syftet med detta projekt var att ta fram ett mobilt system som kan monteras på en gallringsskördare för automatisk insamling och beräkning av träd- och beståndsdata. Mätssystem har potential att ge skördarföraren stöd för kvalitets- och effektivitetsstödande beslut innan, under och efter gallringsingreppet.

Projektets mål var att ta fram ett mobilt system för att upprätta en trädkarta med identifiering av diameter och position och möjlighet till automatisk beräkning av beståndets grundyta, stamantal och diameterfördelning. Projektets delmål var att ta fram i) ett mobilt laserbaserat system som automatiskt kan samla in

3D-information om skogen, ii) förbättra positionering av skördaren, iii) utveckla metoder för att beräkna trädens position och diameter samt beståndets grundyta och stamantal, samt iv) utvärdera systemets möjligheter att beskriva skogen och trädens egenskaper. Vid lyckat projektutfall återstår arbete med att testa mätssystemet på skördare och integrera informationen i skördarnas egna system för beslutsstöd.

Material och metoder

FÖRSÖKSOMRÅDEN

Inom projektet valdes tre olika skogsområden ut för att ge variation vad gäller skogstyper, gallringsstadier, undervegetation, platt och kuperad terräng samt raka och slingriga stickvägar. Syftet med varierande terräng har även varit att utsätta positioneringssystemet för olika typer av rörelser.

Älvan

Ett skogsparti i närheten av Älvan i Östergötland (mellan Linköping och Motala) består av högvuxen granskog med lite undervegetation, se Figur 2. Partiet är dessutom minimalt kuperat. Skogen hade en grundyta på 44 m²/ha och en täthet på 812 stammar/ha. Vi lade upp en rutt genom skogen (och delvis på grusväg) som blev ca 400 m lång.



Figur 2.
Skogsområdet i närheten av Älvan består av högvuxen granskog

Högsten

Utanför Malmköping i Högsten valdes två olika skogspartier ut. Det första bestod av gles ungskog och en del undervegetation (Figur 3). I detta valdes en krokig rutt på ca 500 m med många snäva svängar (ruten kallad "Högsten slinga"). Skogen hade en grundyta på 17 m²/ha och en täthet på 366 stamantal/ha. I det andra området körde vi på en stickväg (ruten kallad "Högsten rågång"), som var tämligen rak, men kuperad, med en längd av 400 m. Skogen hade en grundyta på 17 m²/ha och en täthet på 509 stammar/ha.



Figur 3.
"Högsten slinga", till vänster består av ung gles tallskog och en del stubbar (nygallrad yta). Terrängen är förhållandevis platt. "Högsten rågång", till höger, består av en tämligen rak, dock kuperad, stickväg.

Sonstorp

I närheten av Sonstorp utanför Finspång i Östergötland valdes två partier ut. Skogen här består i huvudsak granskog med en del undervegetation. I det första området skapade vi en ca 200 m lång rutt (kallad "Sonstorp korta"), till hälften bestående av grusväg, se Figur 4, grundyta 37 m²/ha och 668 stammar/ha. Det andra valda området är det mest svårkörda av alla områden, på grund av kraftig kupering. Vi körde en ca 500 m lång slingrig stickväg (kallad "Sonstorp långa") där skogen hade en grundyta på 35 m²/ha och tätheten 573 stammar/ha (Figur 5).



Figur 4.
"Sonstorp korta" består av tät granskog med mycket grenar. Hälften av slingan var förlagd på grusväg.



Figur 5.
"Sonstorp långa" består av slingrig kuperad stickväg, tät skog och en del undervegetation.

MÄTUTRUSTNING

Förstudie

I tidigare projekt (Barth m.fl. 2012a, 2012b), konstaterades att laserskanner (pulsad linjeskanner) är en bra teknik för mätning av beståndsdata. Den stora utmaningen verkade ligga inom positionering och huvudsyftet med detta projekt är att lösa positioneringsproblemet tillräckligt bra för att kunna utvärdera skanningstekniken under realistiska förhållanden.

Positioneringsproblemet försvåras avsevärt genom att tillåta godtyckliga rörelser av typen som förekommer vid terrängkörning. Samtidigt är kvaliteten hos insamlade data direkt relaterad till osäkerhet i position och orientering. Orienteringen är extra viktig då även ett litet vinkelfel resulterar i större fel på längre avstånd. Därför har positioneringen varit central i det här projektet och målsättning har varit att komma i närheten av samma resultat som i det tidigare projektet trots det svårare problemet (d.v.s. en relativ positioneringsnoggrannhet på 0,2 m och en stamdiameter uppmätt med mindre än 2 cm avvikelse för 65 % av de undersökta träden).

För att ge medarbetarna från FOI en grundläggande kunskap om hur en gallring går till i praktiken gjordes ett fältförsök där alla projektmedarbetare från FOI besökte en skogsskördare i samband med en pågående gallring. Medarbetarna fick se skördaren i arbete och även möjlighet att ställa frågor till skördarföraren. En risk som tidigt identifierades var att skak och vibrationer i skördaren eventuellt skulle kunna ställa till problem för ett bildbaserat system. För att utreda detta monterades två videokameror (Figur 6) och en enklare tröghetsnavigering på skördaren och några minuter data spelades in medan skördaren arbetade.

De tre största lärdomarna från försöket var att:

- Vibrationer och skakningar på själva hytten är relativt små.
- Skördarens rörelser är i huvudsak ganska mjuka och enkla att prediktera.
- Skördaren gungar kraftigt under trädavverkning (även då fordonet är stillastående på en position).

De två första lärdomarna kom från inspelningarna där det visade sig att även de enklare kamerorna som monterats tillfälligt kunde ge väldigt bra videosekvenser vid maskinrörelser som kan anses vara ganska mjuka och förutsägbara. Detta stärkte tilltron till att ett kamerabaserat positioneringssystem skulle vara en framkomlig väg. Den tredje lärdomen medförde dock ett ändrat tankesätt vid systemdesignen. I det tidigare projektet konstaterades odometri (varvräknare på hjul) som en bra metod för att mäta förflyttning under låga hastigheter. Problemet som uppdagades nu var att skördaren kan gunga ganska kraftigt samtidigt som samtliga hjul står helt still, exempelvis när skördaren drar tag i ett träd.

Förstudien resulterade i att odometri (varvräknare på hjul) ströks, eftersom det ansågs vara en olämplig metod för att mäta skogsskördarens körda sträcka i terräng. Ett kamerabaserat positioneringssystem bedömdes vara en bättre lösning utifrån iakttagelser vid besöket av skördaren och den platsen i skogen där den arbetade.



Figur 6.

Videokameror monterades på hytten på en skogsskördare för att undersöka vilken bildkvalitet som kan förväntas under realistiska förhållanden.

Positionering

I projektet användes ett positioneringssystem baserat på simultaneous localization and mapping (SLAM). Med detta avses en teknik för att bygga upp en karta över en miljö samtidigt som man lokaliserar sig själv relativt den skapade kartan. Tekniken, som baseras på kameror (alternativt andra avbildande sensorer), löser både positionerings- och karteringsproblemen parallellt. Eftersom kartan byggs upp efter hand, behövs ingen tidigare kännedom om miljön. Metoden är inte heller beroende av förinstallerad infrastruktur (till exempel markörer eller radiosändare). Detta gör att den är användbar i till exempel tät skog eller inomhus, där GPS fungerar dåligt (eller inte alls). En annan fördel med SLAM-teknik, i förhållande till GPS, är att en mycket god positioneringsnoggrannhet kan uppnås lokalt. Under några meters förflyttning är det fullt realistiskt att upprätthålla centimeternoggrannhet. Utöver positionen, kan även sensorns orientering bestämmas med god noggrannhet. Nackdelen jämfört med GPS är att den estimerade positionen driver bort från sitt rätta värde över tiden.

FOI har under flera år utvecklat SLAM-tekniker för positionering av soldater inomhus. För utveckling och utvärdering av SLAM-teknik används det egenutvecklade systemet Chameleon, ett experimentsystem bestående av en tröghetsnavigationssensor (inertial measurement unit, IMU; accelerometrar och gyron), en visuell stereokamera och ett stereopar av termiskt infraröda kameror (IR-kameror), som under vissa förutsättningar kan se genom tjock rök och i mörker. Experimentsystemets tröghetsensorer används för att uppskatta systemets ungefärliga position, hastighet och orientering, medan kamerorna används för att korrigera felen i dessa estimat.

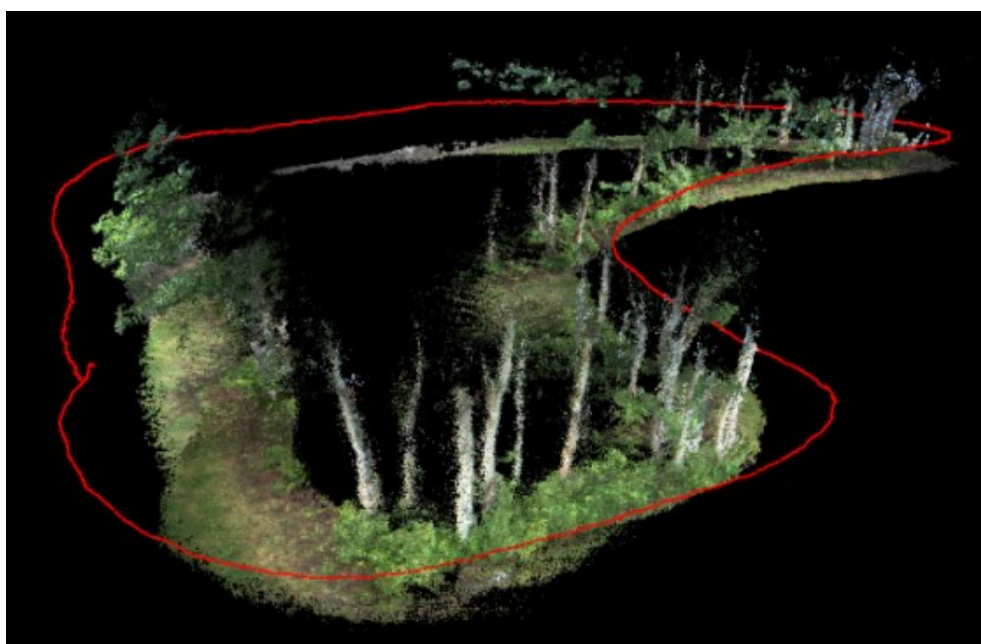
I projektet har ett Chameleonsystem för utomhusanvändning utarbetats. Den huvudsakliga skillnaden jämfört med inomhussystemet är att det är större avstånd mellan kamerorna i det visuella stereoparet. Detta medför förbättrad precision i avståndsmätningar till de objekt som befinner sig på avstånd som är större än ett fåtal meter från sensorn. Utomhussystemet använder inga termiska sensorer.

Teknik

Den utvecklade metoden för SLAM bygger på att "landmärken" detekteras och följs i en sekvens av bilder från stereokameran. Landmärken bör vara stillastående och lätt identifierade strukturer i bilderna, exempelvis hörn och symmetripunkter. Kamerans förflyttning beräknas relativt dessa landmärken. Tröghetsnavigering används för att underlätta följningen av landmärken och för att stödja navigationen när få landmärken är synliga i bilderna.

Den karta som skapas av SLAM-systemet beskriver endast positionen för de landmärken som följs. För att identifiera och mäta enskilda träd, behövs en mycket tätare representation av miljön. En sådan kan skapas genom att, i varje punkt längs rörelsebanan, använda alla mätningar från laseravståndsmätaren. Punkterna från varje enskild mätning roteras och translateras enligt SLAM-systemets estimat om position och orientering. Detta ger ett punktmoln, där varje punkt ligger på ytan av något objekt i miljön.

I princip är det också möjligt att mäta avstånd till objekt i varje bildpar från stereokameran. Detta leder dock till ett punktmoln med förhållandevis låg precision, eftersom avståndsnoggrannheten hos stereokameran är betydligt sämre än hos laseravståndsmätaren, framför allt hos punkter på större avstånd. (De punkter som används som landmärken kan dock positionsbestämmas med stor noggrannhet med hjälp av stereokameran. Detta eftersom endast väldefinierade punkter, som är lätta att matcha mellan vänster och höger bild, används som landmärken.) Tekniken fungerar däremot förhållandevis väl inomhus, där avstånden typiskt är ganska små. Ett utomhusexperiment med denna teknik genomfördes i det föregående projektet. Ett exempel på det återskapade punktmolnet visas i Figur 7. Punkter visas endast längs skogsdungens ytterkant, eftersom avståndsnoggrannheten var alltför dålig längre från rörelsebanan (den röda linjen).



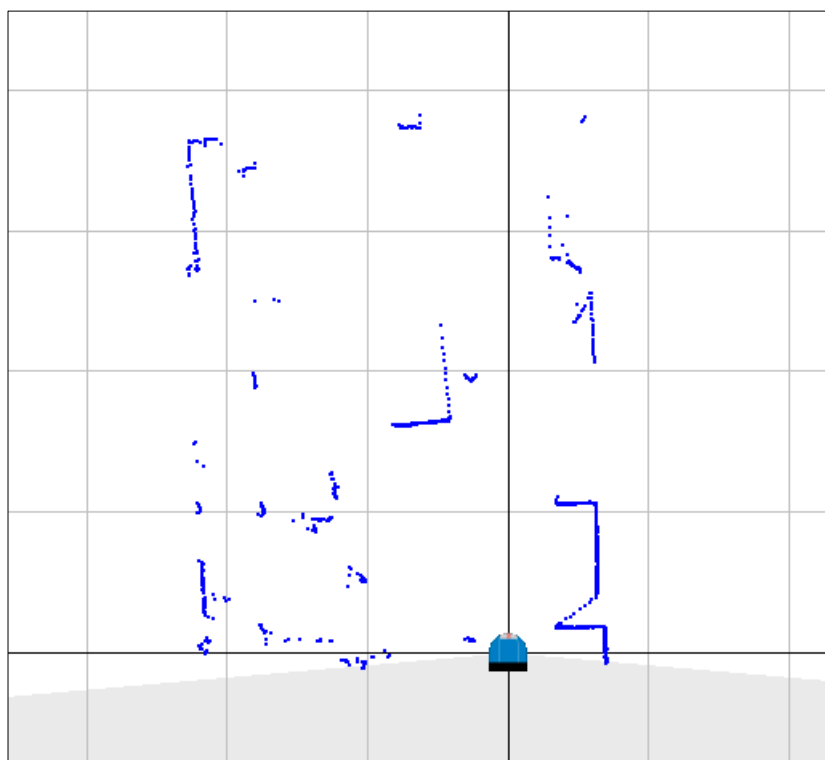
Figur 7.
Det återskapade punktmolnet, baserat på kamerabilder från stereokameran i Chameleon.

Figur 13 visar ett punktmoln från en större skog, uppmätt med laser-avståndsmätaren tillsammans med positions- och orienteringsdata från SLAM-systemet. En annan utomhusmiljö, från en av Försvarsmaktens strid i bebyggelse-anläggningar (Figur 14), är färgkodad baserat på beräknade höjdestimat (röd längst ner, blå högst upp).

Punktmolnet från den bebyggda miljön gör det lättare att utvärdera systemet, eftersom geometrin hos byggnaderna är känd (Figur 15). Viss vridning kan noteras om resultatet jämförs med en karta över motsvarande område. Detta på grund av drift hos positionsestimatet.

Avbildning

Lasersensorn som använts i projektet var densamma som i tidigare projekt, en SICK LMS-511. Denna skanner är en pulsad linjeskanner med 190 graders synfält och räckvidd upp till ca 80 m. Sensorn kan liknas vid en roterande avståndsmätare som med en fast frekvens mäter avståndet till ett antal punkter inom dess synfält. Antalet inmätta punkter är 1 140 för 190 graders synfält och 25 horisontella rotationer per sekund. Detta motsvarar 6 punkter per grad. För varje utsänd laserpuls kan SICK LMS-511 mäta upp till 5 ekon. Det data som fås ut från sensorn ger bara en tvådimensionell ögonblicksbild av det som finns framför scannern och är i sig väldigt svårtolkad Figur 8.



Figur 8.
Bilden illustrerar ett svep från laserskanner SICK LMS-511.

För att erhålla meningsfull 3D-data i form av punktmoln måste antingen sensorn eller objektet förflyttas. Om små föremål ska mätas kan dessa placeras på ett roterande bord eller transportband och sedan kan mätningarna göras medan föremålet rör sig. En mer komplett bild av föremålet byggs ihop genom att kombinera de enskilda mätningarna, förutsatt att man vet hur föremålet förflyttades.

I fallet skogskartering är det naturligt att i stället förflytta sensorn, genom att låta den färdas kontrollerat genom skogen. I det tidigare projektet valdes ett fast montage på ett fordon, främst av mekaniska skäl, och så gjordes även i detta projekt. Till skillnad från det förra projektet har skannern i detta projekt monterats på taket av ett terränggående fordon (tidigare vanlig personbil), vilket gjort att vi kunnat simulera en mer skördarmaskinlik körning genom skog.

Figur 9 visar laserskannern monterad tillsammans med positioneringssystemet på ett optiskt bord (en mycket styv metallplatta med förborrade hål för montering). Det är viktigt att positioneringssystemet och skannern förblir statiskt monterade i förhållande till varandra och att det inbördes förhållandet är känt.



Figur 9.
Mätutrustningen monterad på ett optiskt bord som i sin tur monterades på takracket på en Landrover. Till vänster laserskanner SICK LMS-511, till höger positioneringssystemet bestående av stereokamera (guldfärgad) och IMU (orange).

ALGORITMER FÖR BERÄKNING AV TRÄDDATA

Höjdmodell och träddetektering

En höjdmodell av marknivån skapades från laserdata med en tidigare utvecklad algoritm (Lindberg m.fl. 2012). För varje lasermätning beräknades det vertikala avståndet till marken från den skapade höjdmodellen av marknivån. Sedan valdes laserreflektioner ut inom ett höjdintervall där höjden var avståndet till marken (0,5 – 2,0 m). Endast punkter inom detta intervall användes sedan för att detektera träd och skatta stamdiameter för de detekterade träden. En tidigare utvecklad algoritm (Rabbani m.fl. 2006) användes för att identifiera kontinuerliga trädstammar i punktdata. Denna algoritm avgränsar områden som har en liten variation lokalt med avseende på ytors planhet och riktning. För varje lasermätning beräknades normaler ("riktning") för lokala ytor med hjälp av andra lasermätningar i närområdet. Sedan användes dels spridningen runt ytorna och dels normalernas riktning för att slå ihop punkter så att de bildade segment, d.v.s. laserreflektioner med samma unika identitet. För beräkning av normaler och för att söka efter andra punkter i närområdet användes programmeringsbiblioteket "CGAL – Computational Geometry Library" (www.CGAL.org). Om ett segment innehöll tillräckligt många punkter, hade en viss minsta utbredning i höjddled och hade punkter både under och över brösthöjd (1,3 m ovan marknivå) klassificerades de som stampunkter.

Skattning av stamdiameter

För att beräkna stammarnas diameter användes endast laserreflektioner som var klassificerade som stampunkter. På flera ytor fanns det granar som hade många och kraftiga grenar i brösthöjd som hade kommit med i trädstammens segment. Om en vanlig cirkelanpassning skulle användas på dessa data skulle man i många fall få stora överskattningar eftersom cirkeln då skulle anpassas även till data som fanns på grenar. Därför användes en modifierad version av RANSAC-algoritmen (Olofsson m.fl. 2014). Med denna algoritm slumpas det minsta antal punkter, d.v.s. tre stycken, som behövs för att beräkna en cirkel och för denna bestämning av en cirkel beräknas antalet punkter som är inom ett största tillåtet avstånd från cirkeln, alltså hur många punkter som ger stöd för denna cirkelbestämning. Sedan slumpas tre punkter på nytt och antalet punkter inom intervallet beräknas. Detta upprepas ett stort antal gånger till dess att sannolikheten är stor att en bra cirkelbestämning har valts. Den bästa cirkelbestämningen, alltså den med flest stödjande punkter, används för att välja ut punkter som troligen kommer från stammen och inte från grenar. De punkter som väljs ut är de stödjande punkterna. Sedan anpassades en cirkel till dessa punkter genom att minimera summan av kvadraterna på avstånden mellan cirkeln och datapunkterna. För att ytterligare minska risken för att stamdiametern överskattades beroende på grenar och diskontinuitet i positioneringsdata beräknades stamdiametern dels vid avståndet 1,3 m från marken men även vid tre höjder nedanför och tre höjder ovanför, skilda åt med 0,1 m avstånd. Sedan valdes den minsta diametern som diameterskattning, vilket var ett effektivt sätt att minska andelen diameterberäkningar som var en kraftig överskattning även om det då också fanns risk för underskattningar.

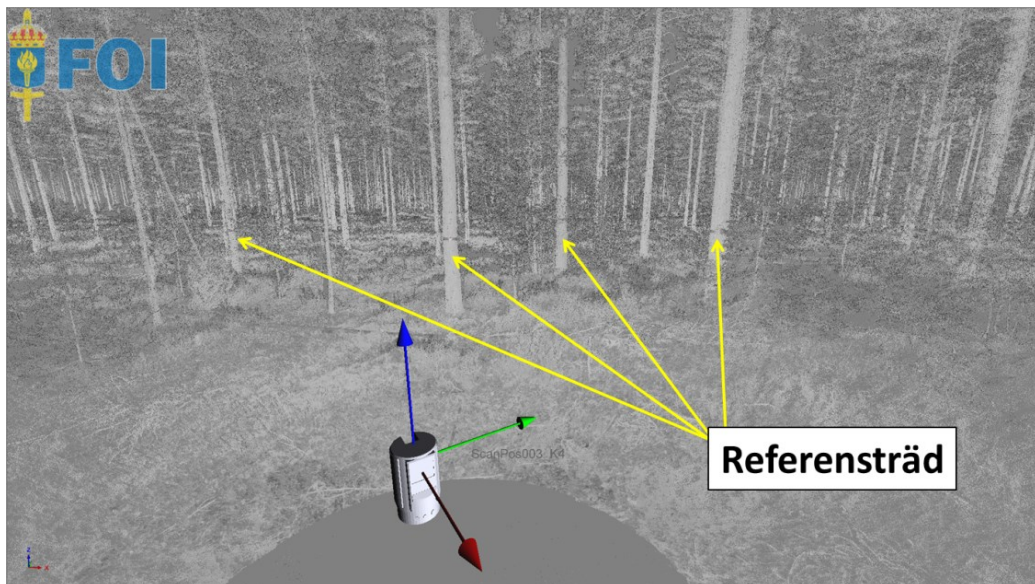
REFERENSDATAINSAMLING

En markbunden laserskanner, Riegl VZ-400, har använts för att verifiera noggrannheten i det bilburna lasersensorsystemet (Figur 10). För varje skogsområde har en 3D-modell i form av ett punktmoln tagits fram som referens. Enstaka punkter mäts med en precision på 3 mm och avståndsnoggrannhet 5 mm.



Figur 10.
Markbunden laserskanner Riegl VZ-400.

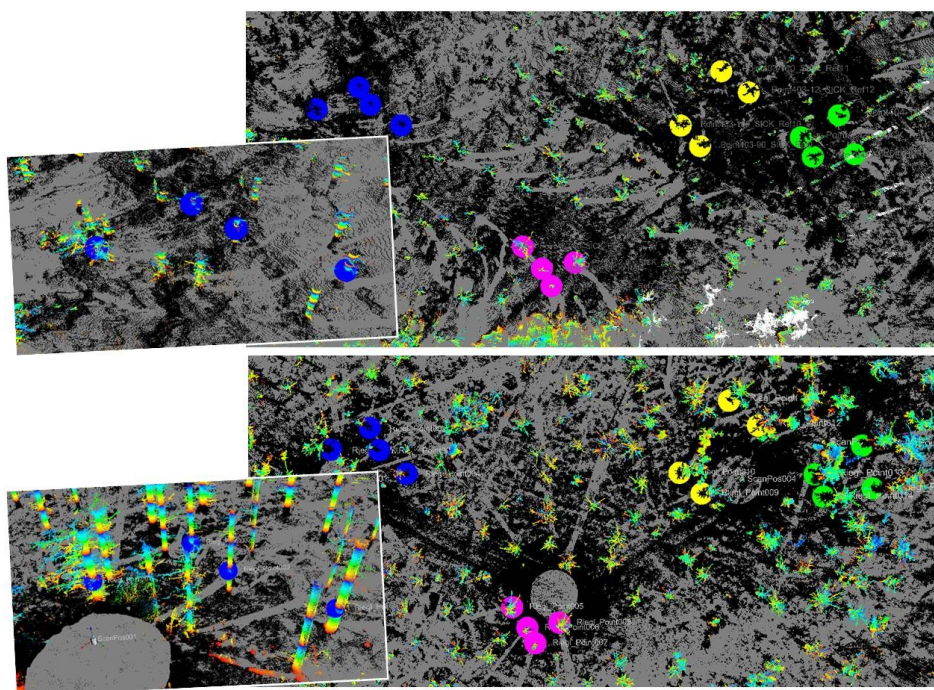
I varje skogsområde har 4 områden med 4 referensträd markerats och mätts in. Markeringen gjordes med ett varv tejp som tydligt kan ses i laserns reflektansdata (Figur 11).



Figur 11.
Exempel på referensträd inskannat med Riegl VZ-400.

För att utvärdera den automatiska detekteringen och inmätningen av trädstammar klavades träd inom rektangulära områden utefter sensorns rörelsebana. Provytorna placerades nära sensorns rörelsebana och dess centrum var drygt 10 m från denna bana. De träd, inom respektive provyta, som hamnade längst från sensorn var på runt 20 m avstånd (större distanser än detta ansågs vara för långa avstånd för mätsystemet). Därför användes enbart träd inom den halvcirkel som fanns närmast sensorn för utvärdering på provytanivå. Vid klavning av träden mättes trädens position relativt provytans centrum med POSTEX-utrustning (www.haglofcg.com). Denna utrustning mäter positionen med hjälp av ultraljudsavståndsmätning till tre transpondrar som är placerade nära provytacentrum. Med POSTEX klavades samtliga träd inom en referensruta om 20 × 20 meter. Inom varje referensruta valde fyra träd ut som referensträd för laserskanning.

Referensträden som mättes in med den högupplösta laserscannern, Riegl VZ-400, identifierades och koordinatbestämde i SICK-scannerns punktmoln, se Figur 12. För dessa fyra träd fanns det därför koordinater från klavningen men också från SICK-mätningen, vilket gjorde att SICK-koordinater kunde beräknas för samtliga klavade träd. På så sätt blev det möjligt att koppla klavade träd till träd som mättes med SICK-sensorn. De små bilderna visar punktmolnen sedda en aning från sidan. Datainsamlingen från SICK-skannern når inte lika högt upp på trädstammarna som Rieglskannern. Träd kopplades för utvärdering om differensen mellan klavade de trädens positioner och inmätta träd i genererade punktmoln från laserscannern understeg 0,5 m från varandra.



Figur 12.
Fyra referensområden med 4 markerade referensträd i varje område. Den undre raden visar träden markerade i den markbundna laserskannerns punktmoln (Riegl VZ-400) och den övre motsvarande för den bilburna (SICK LMS-511).

Utvärdering av systemet för att beräkna skogliga egenskaper

Automatiskt detekterade träd som kunde kopplas till manuellt klavade träd jämfördes om de var inom 10 m från sensorn. För att beräkna summamått av felen användes ekvationerna 1–3. I dessa ekvationer är n antalet observationer \hat{y} är det värde som har skattats med SICK systemet, y är det värde som uppmätts med manuell fältmätning och i är ett index för en individuell observation. Det relativa värdet beräknades genom att dividera med medelvärdet av de mätningar som utförs med klavning.

$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (1)$
RMSE beskriver i detta fall avvikelsen mellan beräknade och i fält observerade värden.
$Bias = \sum_{i=1}^n \frac{(\hat{y}_i - y_i)}{n} \quad (2)$
Bias beskriver systematiska fel i insamlingen från mätsystemet.
$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n \hat{y}_i - y_i }{n} \quad (3)$
MAE mäter hur väl skattade värden överensstämmer med i fält observerade värden. Den ger en bättre beskrivning av mätfelen när det finns några mätvärden som har väldigt stora fel. Dessa fel överskattas vid användningen av RMSE.

Resultat

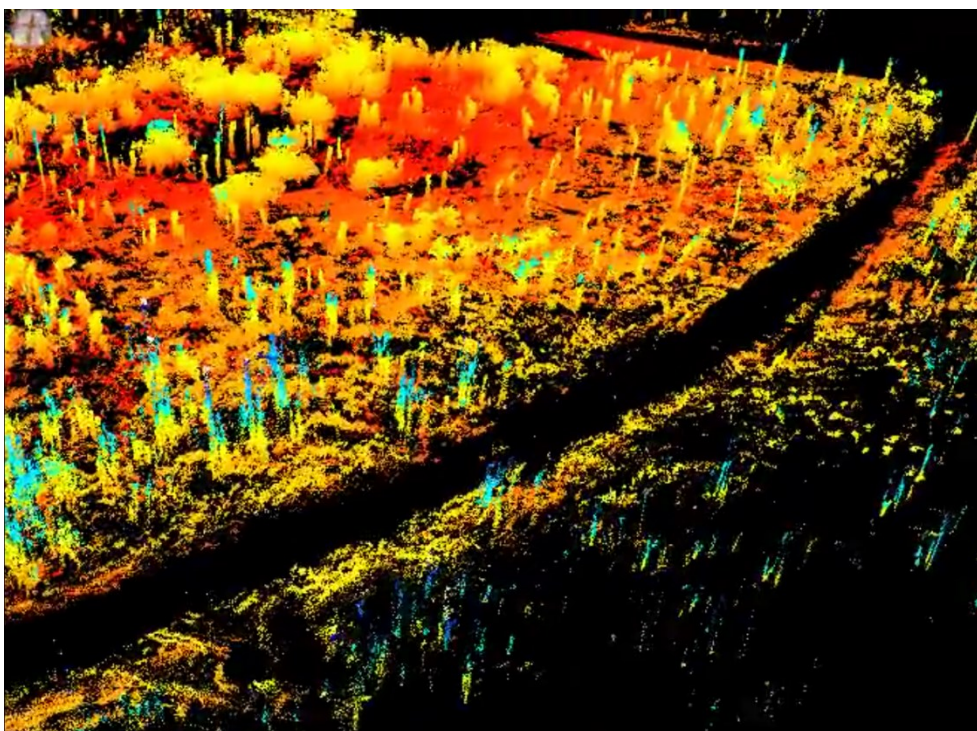
SYSTEM FÖR MÄTNING OCH BEARBETNING AV DATA

Positionering

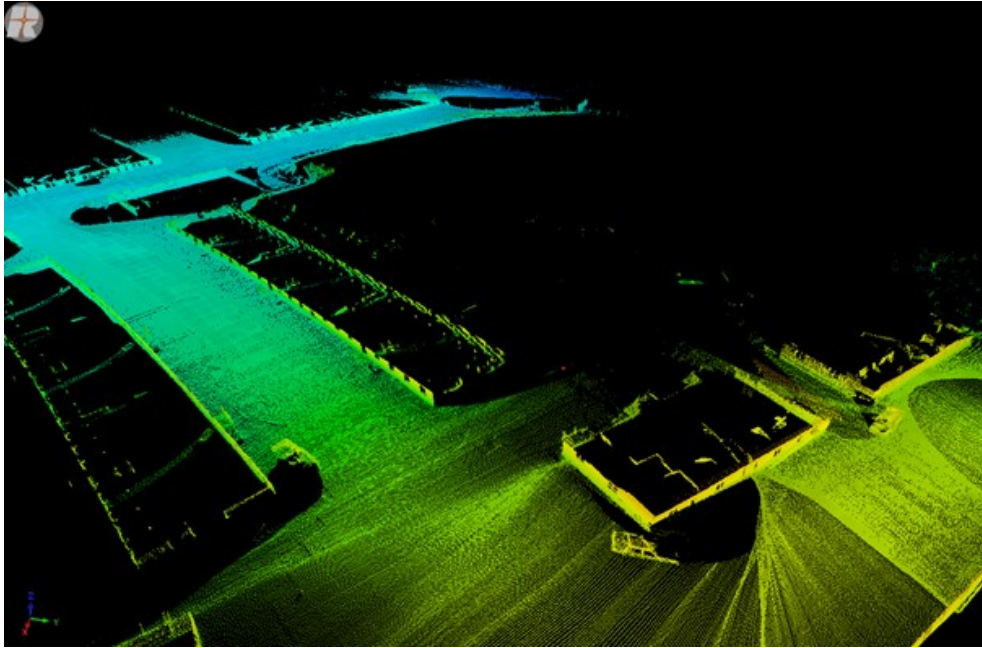
Positioneringssystemets noggrannhet är mycket hög på korta mätavstånd, men driver över tiden. Inom de försöksområden där det kördes i slutna banor kan det konstateras att resultatet inte blev perfekt. Det är mycket svårt att ange ett fel i procent.

Då fordonet har rört sig i större slutna banor, har positionsestimaten ibland visat sig innehålla stora fel i sid- eller höjddled. Detta spelar inte någon större roll så länge man inte ska georeferera träden, utan (som i det här projektet) ser på skogen relativt. Vid eventuella krav på georefererade träd måste man dock ta hänsyn till dessa positionsfel.

Positioneringsnoggrannheten hos det kamerabaserade positioneringssystemet skulle kunna förbättras ytterligare genom återmatning av information om hur de respektive laserskanner passar in i det större punktmolnet. Detta är dock svårt så länge mätsystemet använder en laserskanner som bara skannar med en linje. På marknaden finns nu skannrar med multipla linjer, som skulle kunna förenkla denna återmatning avsevärt.



Figur 13.
Punktmoln från försöksområdet i Sonstorp, baserat på laseravståndsmätningar i kombination med positionsdata från SLAM-systemet.



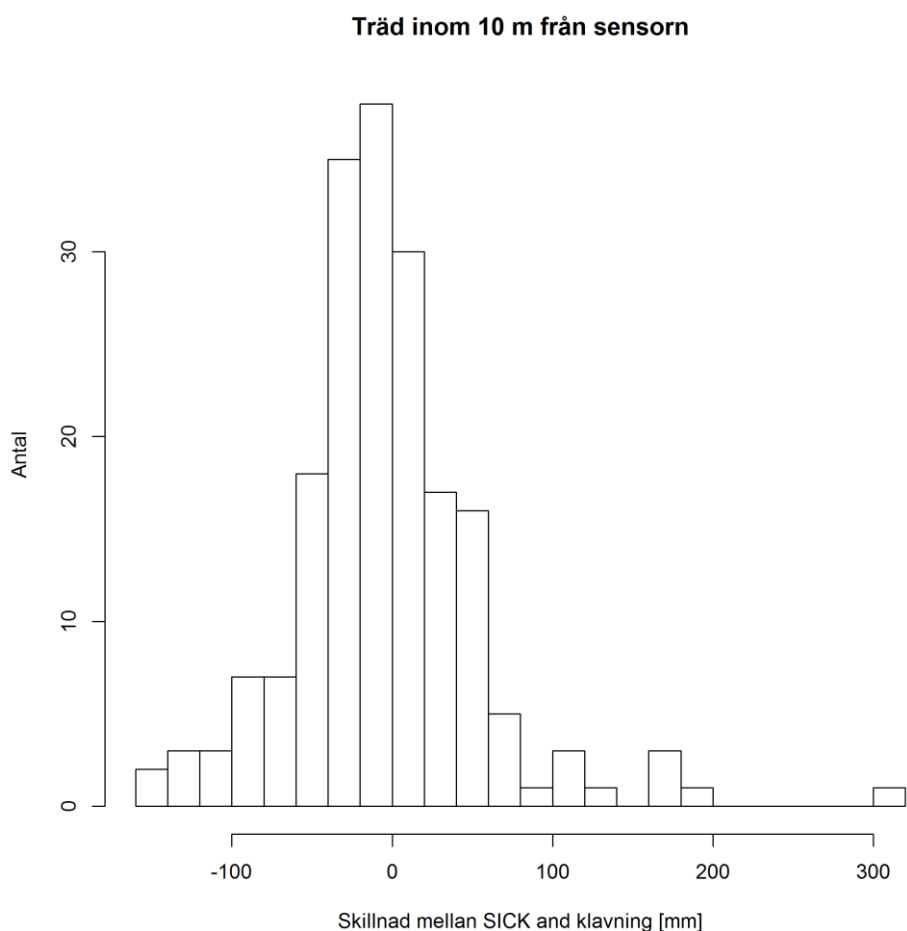
Figur 14.
 Punktmoln från en bebyggd miljö, baserat på laseravståndsmätningar i kombination med positionsdata från SLAM-systemet. I figuren visas att mätsystemet kan användas för att bygga stora punktmoln. Viss vridning kan noteras om resultatet jämförs med en karta över motsvarande område. Detta på grund av drift hos positions-estimatet.



Figur 15.
 Punktmoln från en bebyggd miljö, baserat på laseravståndsmätningar i kombination med positionsdata från SLAM-systemet. I figuren kan noteras att systemet kan leverera mycket detaljrika punktmoln. Det vita spåret i figurens nedre vänstra hörn motsvarar mätfordonets färdväg.

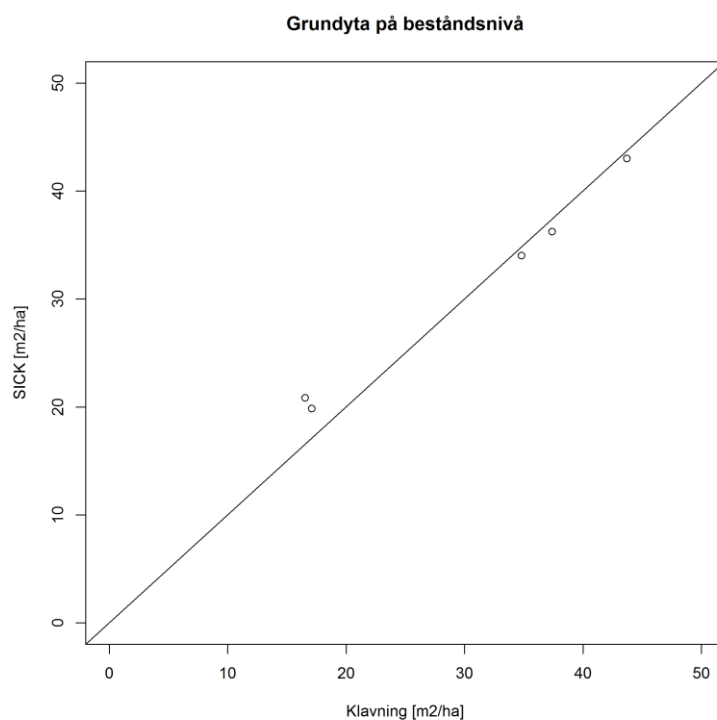
BERÄKNADE SKOGLIGA EGENSKAPER

För diametermätningar på enskilda-träd-nivå var RMSE 58 mm, vilket motsvarade ett relativt värde på 24 %. Eftersom RMSE beräknas med kvadraten på avvikelserna från det klavade värdet så får ett fåtal mätvärden med stora fel ett stort inflytande. För ett fåtal träd fanns det SICK mätningar med stora överskattningar som hade en stor inverkan på resultatet (Figur 16). På trädnivå var MAE (mean average error) 41 mm, och relativa MAE var 17 %. Det systematiska felet var lågt med ett bias -4.6 mm, vilket motvarar ett relativt Bias på -1,9 %. Att det systematiska felet var lågt kunde också observeras i Figur 16.

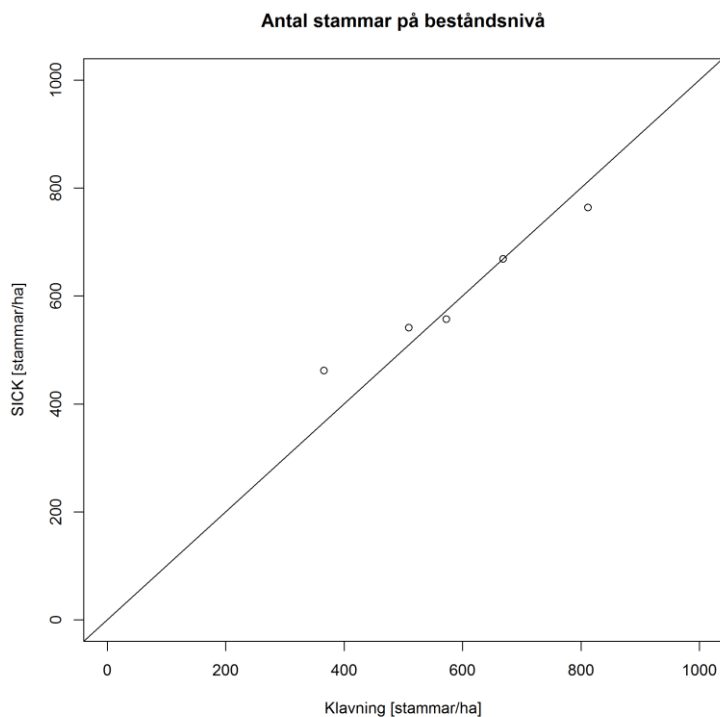


Figur 16.
Skillnaden i diametermätning för automatisk mätning med SICK och klavning för samtliga detekterade träd inom 10 m från sensorn.

Då resultaten summerades för samtliga provytor inom respektive bestånd kunde en god överensstämmelse mellan automatiskt och manuell mätning av grundyta (Figur 17) respektive stamantal (Figur 18) observeras. När resultaten summerades användes endast den halvan av varje provyta som var närmast sensorn eftersom den bortre halvan var på ett så stort avstånd från sensorn att mätvärdena inte var tillförlitliga, ofta på ett avstånd upp till ca 20 m. En halv provyta definierades som en halv cirkel med 10 m radie och eftersom ytorna ofta var placerade intill körbanan så innebar det att större delen av denna halva fanns inom 10 m från den närmaste platsen utefter körbanan. Det är uppenbart att felet reducerades när resultaten aggregerades till beståndsnivå även om endast ca fyra halva provytor representerade ett bestånd i detta fall. På beståndsnivå var RMSE för grundyta $2,4 \text{ m}^2/\text{ha}$, vilket motsvarar ett relativt värde på endast 8 %. På beståndsnivå var RMSE för stamantal 50 stammar/ha, vilket motsvarar ett relativt värde på 9 %.

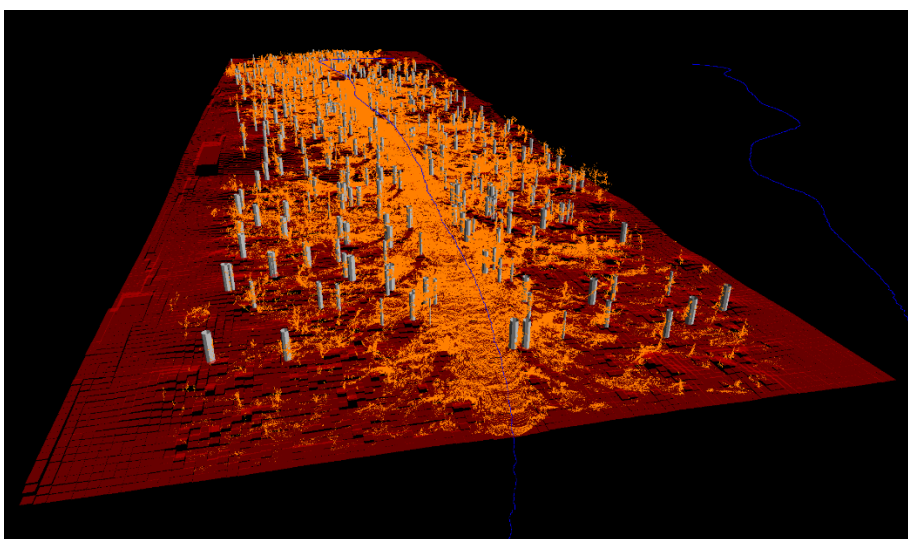


Figur 17.
Grundyta summerat till beståndsnivå med mätningar endast inom den cirkelhalva (10 m radie) som var närmast sensorn för provytor inom respektive bestånd.



Figur 18.
Antal stammar summerat till beståndsnivå med mätningar endast inom den cirkelhalva (10 m radie) som var närmast sensorn för provytor inom respektive bestånd.

Förutom diameter för varje upptäckt träd beräknades även markytans höjd och trädens position från laserdata (Figur 19). Ett rött raster representerar den från laserdata automatiskt beräknade markytan. Den blåa linjen visar sensorns rörelsebana. Punkter med orange färg markerar laserreflektion på ett avstånd upp till 20 m från skannern. Mätvärdena var mer tillförlitliga nära sensorns rörelsebana jämfört med på längre avstånd från sensorn eftersom tätheten av reflektionspunkter är låg för långa avstånd (>10 m).



Figur 19.
Figuren visar automatiskt detekterade träd med automatiskt beräknade stamdiametrar representerade som cylindrar. Punkterna med orange färg visar laserdata och beräknad markhöjd visas med röda rasterceller.

Diskussion

SYSTEM FÖR MÄTNING OCH BEARBETNING AV DATA

En nackdel med den typ av SLAM-teknik som används i projektet är att felet hos positionsestimatet växer med tiden. I nuläget är feltillväxten några procent av den totala sträckan. Detta är en effekt av att de landmärken som observeras i en viss bild i första hand begränsar rörelsen relativt andra bilder från ungefär samma tillfälle. Små fel ackumuleras därför över tiden. För att lösa detta kan så kallad loopslutning användas. Loopslutning syftar på metoder för att detektera att sensorn återvänt till ett tidigare observerat område, och för att korrigera driften baserat på detta. Loopslutningen kan till exempel baseras på igenkänning av geometri (i punktmolnet), eller på igenkänning av bilder från stereokameran.

Ett annat sätt att begränsa feltillväxten över tid är att inkludera information från GPS i positioneringssystemet. I de flesta utomhusmiljöer ger GPS ett positionsfel på en till tio meter, vilket är betydligt sämre än den lokala noggrannheten hos SLAM-systemet. Till skillnad från SLAM-systemet, har GPS däremot ingen feltillväxt över tid. Därför kan även relativt osäkra GPS-positionsmätningar användas för att begränsa feltillväxten hos SLAM-systemets positionsestimat.

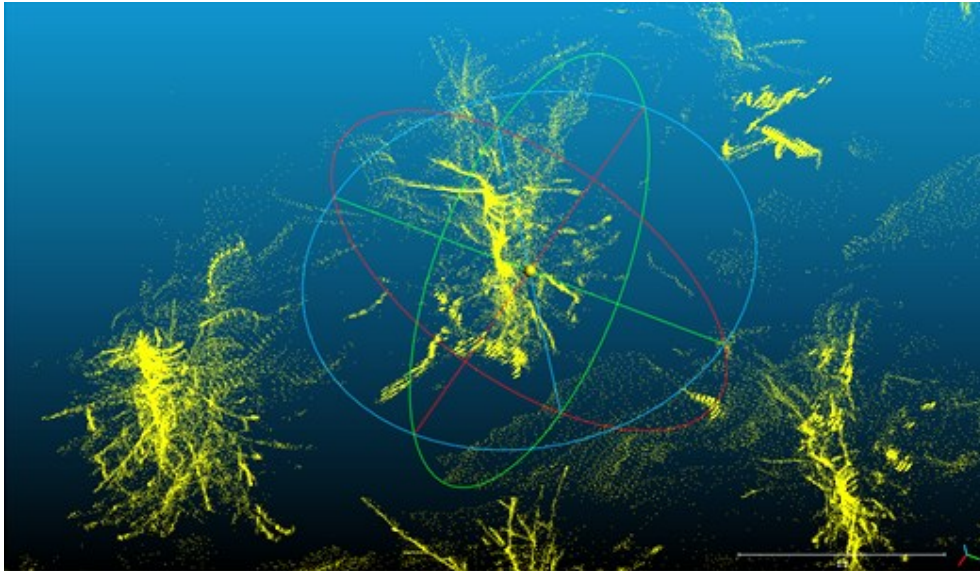
En ytterligare förbättring av positioneringsnoggrannheten kan uppnås genom att använda geometridata från laseravståndsmätaren, tillsammans med observationer av landmärken, för att estimerar den relativa förflyttningen mellan successiva mätningar.

Notera att den lokala noggrannheten är god redan i nuläget i de flesta fall, eftersom feltillväxten är relativt långsam. Detta medför att positionsfelet är ungefär detsamma för alla lasermätningar där ett visst träd syns, vilket gör att enskilda träd avbildas med korrekt geometri, men inte alltid på sina exakta globala positioner.

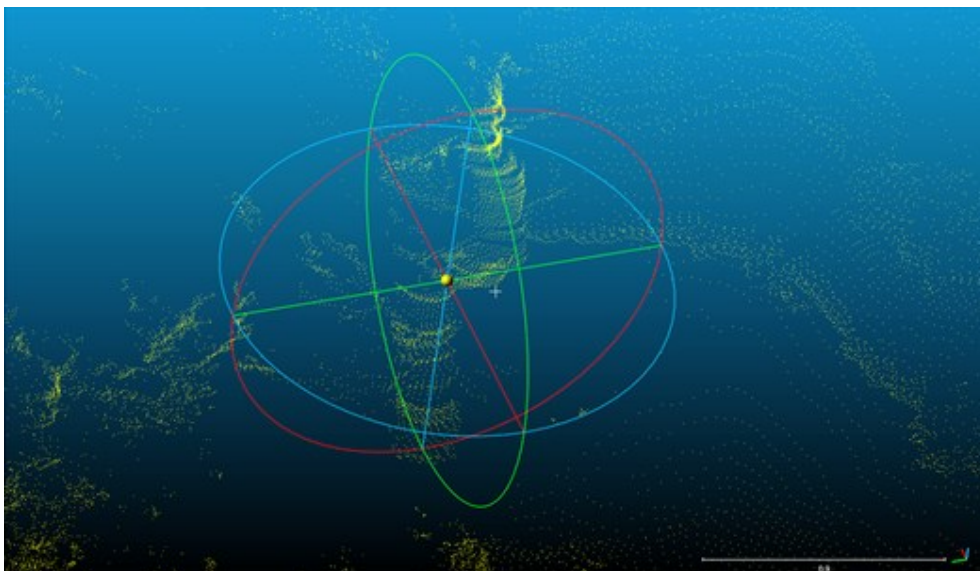
ALGORITMER FÖR BERÄKNING AV TRÄDDATA

Inom detta projekt utvecklades och testades algoritmer för att automatiskt detektera träd och mäta stamdiametrar för vanliga svenska skogsbestånd med varierade stamtäthet och i en del fall med mycket grenar och vegetation nära marknivå. Det fanns framför allt två utmaningar: (1) reducera antalet falska träddetekteringar utan att andelen automatiskt detekterade träd minskade mycket, och (2) minska risken att träddiametrar överskattades p.g.a. mycket grenar nära brösthöjd (1,3 m ovan marknivå). För att minska dessa problem i skog med mycket grenar (Figur 20) och undervegetation användes dels en segmenteringsalgoritm, dels en modifierad version av RANSAC-algoritmen (Olofsson m.fl. 2014). Det varierade hur bra punktmolnets geometri var beroende på hur SLAM-algoritmen hade klarat att beräkna position och orientering av sensorn. Därför fanns datapunkter på trädstammar som ibland hade en förskjutning i sidled på ett eller flera ställen (Figur 21). Rotation av data från trädstammen testades genom att beräkna trädstammens huvudsakliga utbredning, vilket fungerade bra i skog med lite grenar medan det var en allt för osäker metod i skog med mycket grenar. I stället användes ett litet utsnitt i

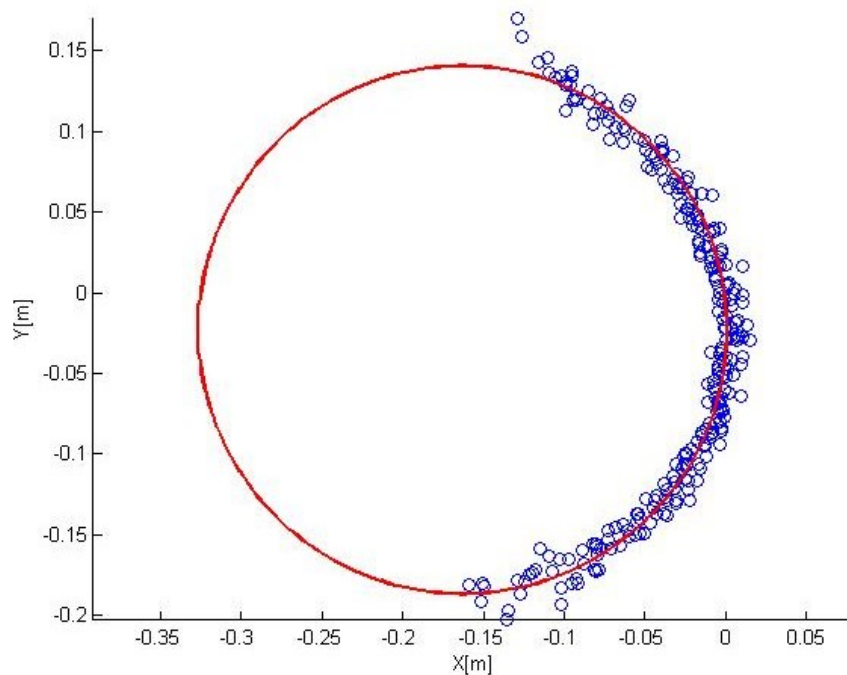
höjddled som anpassades beroende på mängden datapunkter. Eftersom punkternas täthet avtar med avståndet från sensorn så var det ändå nödvändigt att använda ett ganska stort höjdivtervall för områden på lite längre avstånd från sensorn. Det var möjligt att anpassa cirklar till trädstammen med ett litet fel för de delar av data där det var bra geometri på punktmolnet och där det fanns lite grenar längst ner på stammen (Figur 22).



Figur 20.
Laserdata från en trädstam med mycket grenar nära marken, vilket innebär att filteringsalgoritmer måste användas för att reducera mängden data från grenar innan beräkning av stammens diameter kunde utföras.



Figur 21.
Laserdata från en trädstam som visar problem vid den kontinuerliga positioneringen av sensorn, SLAMalgoritmen, vilket innebär att det fanns brytpunkter i data, t.ex. var data för en del av en trädstam ibland förskjutet åt sidan.



Figur 22.
Exempel på en bra cirkelanpassning för skattning av stamdiameter utan någon betydande inverkan av grenar och med bra geometri på punktmolnet.

UTVÄRDERING AV SYSTEMET FÖR ATT BERÄKNA SKOGLIGA EGENSKAPER

På enskilda-träd-nivå var felet större jämfört med det tidigare försöket som har utförts med samma SICK skanner (Barth m.fl. 2012a). I det tidigare försöket observerades en avvikelse inom ± 20 mm för 65 % av träden medan motsvarande siffra i detta försök var 36 %. Inom ett intervall på ± 40 mm avvikelse observerades 63 % av träden i detta senare försök. Det skall påpekas att utvärderingarna skiljde mellan de olika försöken. Det var olika avvikelser som observerades i de två försöken eftersom diameter från cylinderpassning jämfördes med högupplöst marklaser i den tidigare studien medan SICK data jämfördes med manuell klavning denna studie. I den tidigare studien mättes därför i större utsträckning samma del av trädstammen, d.v.s. cylinderanpassningen gjordes från ett bestämt höjdintervall medan klavning endast är en enskild mätning 1,3 m ovanför marknivå och enbart utfördes i en riktning utan s.k. korsklavning. Utvärderingen i den tidigare studien gjordes enbart för 20 träd i ett enda bestånd med björkar som hade få grenar nära marken, vilket är ett lättare fall jämfört med granar som ofta har mycket grenar nära marknivå. I den tidigare studien valdes data för en trädstam ut manuellt innan cylinderanpassningen utfördes, vilket minskade risken för att få med data från grenar och undervegetation. I den tidigare studien samlades data in utefter en rak vägsträcka, vilket innebar att beräkningen av sensors position var betydligt bättre och därför var också punktmolnets geometri betydligt bättre. SICK skannern var riktad åt sidan i det tidigare försöket och den var riktad framåt i detta försök, vilket också kan ha påverkat resultatet. I detta försök testades mätsystemet under mer realistiska förhållanden, vilket var ett syfte med projektet men som

också innebar att större fel kunde observeras. Då skattningarna på trädnivå aggregerades till beståndsnivå reducerades felen så att RMSE var 8 % respektive 9 % för grundyta och stamantal. Det skall påpekas att ett bestånd endast kunde representeras av ca 4 halva provvytor med 10 m radie eftersom manuell klavningen enbart hade utförts på provvytor och för att enbart den halva av en provvyta som var närmast sensorn användes.

MÄTSYSTEMETS OPERATIVA TILLÄMPNING

Robusta mätsystem

Det utvärderade mätsystemet har testats i mer variationsrika skogsmiljöer än tidigare projekt. Den jeep som användes kunde köra i gallringsbasvägar med goda resultat till skillnad från tidigare projekt där tester utfördes från skogsbilvägar. Själva laserskannern, men även de stereokameror som stöttar för positioneringen fungerade väl även om det blev nödvändigt att välja skannerområde och valet föll på en skanning framför fordonet och inte åt sidorna. Vid en operativ användning skulle det då ge begränsad information om utförd gallring. För användning vid gallringsuppföljning och återkoppling till skördarföraren måste datainsamling ske även från sidorna och snett bakåt. Ett annat alternativ, när priserna på mätsystem går ner, skulle vara att montera en skanner på förarhytten som i huvudsak mäter innan och under avverkning och en andra skanner monterad på motorn bakom hytten som registrerar utfallet efter gallring.

Det använda mätsystemet var oskyddat vid monteringen på fordonet. Det skulle i praktiken orsaka stora bekymmer med ris och damm som rivs upp i samband med avverkningen och skulle landa på mätsystemet och orsaka begränsningar i datainsamlingen. De utförda testerna måste kompletteras med fler mätningar under svårare avverkningssituationer med smuts, dis och varierande väderförhållanden. Vid avverkning i andra ljusförhållanden kommer skördarens strålkastare visserligen ge ljus, men även helt andra skuggeffekter vilket, kan påverka positioneringen. Själva laserskanningen påverkas inte av ljus, däremot blir det lite olika resultat med och utan löv där det generellt blir enklare att mäta trädstammar under årets avlövide tider. Det är helt enkelt färre störande moment. Vid testerna i projektet noterades vissa problem med direkt motljus i stereokamerorna vilket måste kompenseras vidare för att problemet ska elimineras.

Före operativ användning på skördare måste en inkapsling av mätsystemet ske, men det är i ett senare skede under utvecklingen än vad som genomfördes som tester i detta projekt.

Möjlighet till god positionering

En av de största utmaningar med datainsamling i täta skogar är hur positioneringen av mätdata ska bli tillräckligt bra. Mätdata kan aggregeras för att med god positionering beskriva provtytor eller andra mindre delar av ett bestånd.

I det genomförda projektet användes SLAM-teknik för positioneringen. Den lokala positioneringen blev bra även om felet driver lite över tiden. Tekniken är mycket lovande och har en god potential att komma i operativ användning, kanske tillsammans med en GPS som kan knyta ihop den lokala geometrin med den globala vid utvalda intervall under ett avverkningsarbete. Det utvärderade system kan även kombineras med en skanner som mäter i flera plan, vilket stärker upp positionen under förflyttning.

Mätavstånd

Under testerna användes ett mätavstånd som i stort sammanfaller med skördarens räckvidd. Det måste vidare utvärderas i fler skogstyper, men indikerar på att de mätningar som utförs täcker in det operativa arbetsområdet. Vid mätning vid enskilda punkter blir det en del skymda träd, men när mätningen fortsätter i rörelsen täcks alla träd in. Här kan det naturligtvis bli mer bekymmersamt i väldigt kuperade områden och i täta yngre gallringar, men det är samtidigt inte i dessa skogar som nyttan av ett mätsystem är störst.

Mätdata aggregeras ihop för att representera del av beståndet och här måste senare en filtrering av insamlade data till för operativ nytta. Hur stor denna aggregering ska vara måste vidare utvärderas för att kunna fungera som återkoppling till utförd gallring och ge en representativ del av beståndet.

Under mätavstånd återkommer man till placeringen av mätsystemet då mätningar framåt ger en bra bild på tätheten, vilket kan styra skördarföraren. Vid skanning åt sidorna ges information om den utförda gallringen, men det kan ju även mätas med hjälp av skördardata. Däremot ger sidoskanning en detaljerad bild över kvarvarande bestånd för framtida planering.

Beräknade skogliga egenskaper

Diameterberäkningen på enskilda träd resulterade i ett relativt högt RMSE på 24 %. I praktiken var det relativt få men större avvikelser, vilket visas med ett det absoluta felet var 17 % med låg bias. Både RMSE och det absoluta felet är dock högre än de 20 mm som är målet för mätningen av diameter. Det betyder att det även skulle bli för stora fel i beräkningen av volymen på enskilda träd, däremot kan en uppfattning om diameterfördelningen från beståndet ges, vilket kan uppdatera de skogliga registren efter avverkning. Skanningen av stammarna kräver fler skannerlinjer för att bättre beskriva diameter, stamform samt för detektering av eventuella kvalitetsproblem som krökar och kvistar. Då kan bättre stöd även ges till pågående aptering både före kapning, men även för kontrollmätningar.

Den trädskarta som producerades visar lokaliseringen av stammarna och skattar stamantal. På beståndsnivå var RMSE 9 %, vilket är ett gott skattningsresultat, lika bra eller bättre än med andra skattningsmetoder. Detsamma gäller beräkningen av grundyta med ett RMSE på 8 % på beståndsnivå. Stamantalet och grundyta på beståndsnivå är mycket bra och kan användas för återkoppling till såväl skördarförare som beståndsdata.

Resultaten kan även användas under traktplaneringen. Mätssystemet ger bättre resultat än det som kan beräknas via flygburna skannrar och kan fungera som ett mobilt relaskop för aggregering till lämpliga nivåer. En kontinuerlig mätning ger helt andra tillförlitliga underlag än mer subjektivt valda relaskopytor. Här kan då andra alternativ till skördare utvärderas som terrängfordon. Med en montering på en fyrhjuling kan insamling av mätvärden ske innan avverkning som en del av traktplaneringen för bättre kvalitet på insamlade skogliga egenskaper.

Felen är större vid enskilda mätningar, vilket talar för att mätvärden ska aggregeras ihop under drivningen. Mätssystemet som utvärderades är inte operativt för återkoppling av stamantal eller grundyta vid varje avverkningspositionering. För en återkoppling till skördarföraren kan resultaten aggregeras ihop på en 80–120 m körsträcka för att motsvara den provyteareal där RMSE ligger på 8–10 % för grundyta och stamantal. I praktiken skulle detta motsvara cirka en timmes gallring innan resultat om avverkad grundyta kan aggregeras med god noggrannhet. Därefter kan den både ge återkoppling till skördarföraren och till drivningsledare om det visar sig att utfallet från gallringen kraftigt avviker från plan. Återkopplingen höjer även kvaliteten på den stickprovisvisa gallringsuppföljningen som skördarföraren gör med relaskop till en mer kontinuerlig mätning med en jämnare och högre kvalitet på uppföljningen.

Användarutvärdering

För vidare förankring av dessa resultat är det dags med en bredare diskussion med skogsmaskintillverkare, skogsbolag och maskinlag, för att fånga upp synpunkter och användningsområden. Det kan resultera i ett upptag av tekniken som även identifierar hur mätresultaten ska integreras i förarmiljön mer operativt.

Det behövs fler mätningar i olika typer av gallringsskogar för att fånga upp den stora variation som förekommer både i form av terräng och trädslagsblandningar och trädformer. Även om dessa försök fångade en relativt stor variation var försöken koncentrerade till en begränsad del av Sverige.

Vidare kommer frågan upp om mätssystemets förmåga att fungera väl under dygnets alla timmar. Här finns identifierade problem med motljus och det är oklart hur skördarens strålkastare påverkar möjligheten till god positionering av mätssystemet.

I grunden är de resultat som presenteras mycket lovande och naturligtvis har projektet inte haft möjlighet att täcka in alla aspekter som framkommer vid ett operativt bruk. Projektet har framgångsrikt demonstrerat ett mätsystem med god potential att bygga vidare på både när det gäller positionering i täta skogar som beräkning av skogliga egenskaper. Det som tydligast är intressant framöver är en skanner som mäter i flera plan, vilket även kan bidra till en än säkrare mätning och positionering även utan GPS.

FORTSATT FORSKNING OCH UTVECKLING

Projektresultaten är positiva, men det går naturligtvis att identifiera behov av fortsatt forskning och utveckling på vägen mot operativ implementering. Projektgruppen söker aktivt finansiering för fortsatta insatser. Följande områden bedöms vara att störst intresse för fortsatt FoU baserat på projektgruppens erfarenheter:

- **Anpassning till skogsbrukets behov:** Nya sensorer utvecklas för användning i andra branscher, vilket gör att de blir än mer robusta och användarvänliga. Dessutom blir de billigare. Det är möjligt att dra nytta av detta samtidigt som det finns behov att testa och anpassa användningen för skogsbrukets behov. Här är det viktigt att nya projekt knyter maskintillverkare och användare till sig för bättre förankring för kommande operationalisering av utvecklade mätsystem.
- **Bättre mätsystem:** Nya sensorer som mäter i flera plan, har möjlighet att förbättra såväl positioneringen som skattningar av skogliga egenskaper. Det öppnar även upp för kartering av stamform, vilket kan stötta apteringen och identifiera kvalitetsproblem på stammarna.
- **Förbättrad positionering:** Den SLAM-teknik som används har en god potential att komma in i fler skogstillämpningar där GPS-signalen inte är tillräckligt bra. Det är därför motiverat med fortsatt FoU kring lokala och globala fel i positioneringssystemet.
- **Mätning av skogliga parametrar:** Det finns en förbättringspotential av detektering och mätning av trädstammar framförallt genom att förbättra punktmolnens geometri och mäta med större punkttäthet på längre avstånd. Skattningen av stamdiameter för enskilda träd kan troligen förbättras genom att använda mer avancerade algoritmer för att bättre ta bort datapunkter på grenar. Den skanner som användes i detta projekt skannade endast framåt medan en skanner som mäter 360 grader skulle tillsammans med fordonets rörelse producera mätdata från flera håll av en trädstam, vilket skulle underlätta stamdiameterberäkningen.
- **Integrering i skördarnas förarmiljö:** Ett viktigt område för FoU är hur mätresultaten ska integreras i skördarnas förarmiljö för att stötta den pågående drivningen. Det handlar om stora datamängder som ska hanteras för att ge bra information vid rätt tillfälle.
- **Andra användningsområden** för mobila sensorer kan vara att de monteras på andra fordon som exempelvis fyrhjulingar eller fjärrstyrda terrängfordon som samlar in mätvärden. Erfarenheter finns att få från parallella projekt vid RWTH Aachen Universitet i Tyskland eller vid Finska geodetiska institutet (FGI).

Slutsatser

- En mobil insamling av skogliga egenskaper ger stora fördelar jämfört med fasta insamlingspunkter vad gäller exempelvis skynda träd samt hur skogen representeras. Det kommer bli bättre mätvärden med en mobil insamling jämfört med slumpvis valda relaskopytor.
- SLAM-tekniken för positionering är lovande och ger en huvudsakligen god position på träden även om det finns mer att utveckla när det gäller svåra ljusförhållanden och olika skogstyper.
- Totalt sett ger mätsystemet mycket goda resultat på beståndsnivå under realistiska förhållanden i olika skogstyper medan det krävs mer FoU för användning på trädnivå. Resultaten på beståndsnivå kan redan nu användas för uppdatering av beståndsregister. Vid sammanställningen av resultatet för automatiska mätningar av stamdiameter på trädnivå visade det sig att felet var större jämfört med tidigare projekt där enbart ett fåtal träd med lite grenar nära marken användes för utvärderingen. Nu var bestånden mer variationsrika. Då resultaten aggregerades till beståndsnivå var felet betydligt lägre med RMSE 8 % och 9 % för grundyta respektive stamantal.
- Mätningen av diameter på enskilda träd i försöksområdena blir inte tillräckligt noggrann för operativ användning med den använda tekniken utan här krävs sannolikt nya sensorer som mäter i flera plan samtidigt för bättre avbildning av stammen.
- Fortsatta tester och demonstrationer på skördare eller annat terrängfordon är nödvändigt för att fånga in hur ett mätsystem bäst kan integreras i olika beslutsstöd.

Referenser

- Barth, A., Sonesson, J., Larsson, H., Engström, P., Rydell, J., Holmgren, J., Olofsson, K., Forsman, M. & Thor, M. 2012a. Beståndsmätning med mobila sensorer i skogsbruket. Arbetsrapport 773, Skogforsk.
- Barth, A., Sonesson, J., Thor, M., Larsson, H., Engström, P., & Holmgren, J. 2012b. Sensorteknik på skördare ger data om skogen. Resultat 8-2012, Skogforsk.
- Brunner, A., Gizachew, B. 2014. Rapid detection of stand density, tree positions, and tree diameter with a 2D terrestrial laser scanner. *Eur J Forest Res* 133:819-831.
- Engström, P. & Larsson, H. 2012. New Sensor Technology on Forest Harvester, Proc. of SSBA (Swedish symposium on image analysis).
- Hannrup, B. Bhuiyan, N. & Möller, J. J. 2011. Utvärdering av ett system för beräkning och återföring av skördarbaserad information till skogliga register och planeringssystem. Arbetsrapport 757. Skogforsk, Uppsala, 71 s.
- Holmgren, J., Barth, A., Larsson, H. & Olsson, H. 2012. Prediction of stem attributes by combining airborne laser scanning and measurements from harvesters. *Silva Fennica* 46:227–239.
- Larsson, H., Engström, P. & Rydell, J. 2011. Measurement of tree population with new sensor technology at forest harvester – Study and test of existing laser imaging systems, FOI-D--0433--SE, November 2011.
- Lindberg, E., J. Holmgren, K. Olofsson, and H. Olsson. 2012. "Estimation of stem attributes using a combination of terrestrial and airborne laser scanning." *European Journal of Forest Research* 131 (6):1917-1931. doi: 10.1007/s10342-012-0642-5.
- Olofsson, K., J. Holmgren, and H. Olsson. 2014. "Tree Stem and Height Measurements using Terrestrial Laser Scanning and the RANSAC Algorithm." *Remote Sensing* 6 (5):4323-4344. doi: 10.3390/rs6054323.
- Rabbani, T, F van Den Heuvel, & G Vosselmann. 2006. "Segmentation of point clouds using smoothness constraint." *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 (5):248–253.
- Rosvall, O., Simonsen, R., Rytter, L., Jacobsson, S. & Elfving, B. 2007. Tillväxthöjande skogsskötselåtgärder för privatskogsbruket – underlag för lönsamhetsberäkningar. Arbetsrapport 640, Skogforsk
- Öhman, M., Miettinen, M., Kannas, K., Jutila, J., Visala, A. & Forsman, P. 2008. Tree Measurement and Simultaneous Localization and Mapping System for Forest Harvesters. In *Field and Service Robotics, STAR* 42: 369–378.

Arbetsrapporter från Skogforsk fr.o.m. 2013

2013

- Nr 786 Grönlund, Ö. & Eliasson, L. 2013. Knivslitage vid flisning av grot. Effects of knife wear on performance and fuel consumption for a small drum chipper. 12 s.
- Nr 787 Sonesson, J. & von Hofsten, H. 2013. Effektivare fältarbete med nya datakällor för skogsbruksplanering.
- Nr 788 Bhuiyan, N., Arlinger, J. & Möller, J.J. 2013. Kvalitetssäkring av beräkningsresultat från hprCM och konvertering av pri- till hpr-filer. – Quality assurance of calculation results from hprCM and conversion of prifiles to hpr files. 24 s.
- Nr 789 Brunberg, T. 2013. Bränsleförbrukningen hos skördare och skotare 2012. – Fuel consumption in forest machines 2012. 12 s.
- Nr 790 Eliasson, L. 2013. Skotning av hyggestorkad grot. 11 s.
- Nr 791 Andersson, G. & Frisk, M. 2013. Skogsbrukets transporter 2010. – Forestry transports in 2010. 91 s.
- Nr 792 Nordström, M. & Möller, J.J. 2013. Kalibrering av skördarens mätsystem. – En kartläggning av nuläge och utvecklingsbehov. A review of current status and development needs. 15 s.
- Nr 793 Lombardini, C., Granlund, P. & Eliasson, L. 2013. Bruks 806 STC. 0150 – Prestation och bränsleförbrukning. 9 s.
- Nr 794 Fridh, L. 2013. Kvalitetssäkrad partsmätning av bränsleved vid terminal. – Quality-assured measurement of energy wood at terminals.
- Nr 795 Hofsten von, H. & Brantholm, M.-Å. 2013. Kostnader och produktivitet i stubbskörd – En fallstudie. 9 s.
- Nr 796 Brunberg, T. & Iwarsson Wide, M. 2013. Underlag för prestationshöjning vid flerträds-hantering i gallring – Productivity increase after multi-tree handling during thinning. 7 s.
- Nr 797 Spatial distribution of logging residues after final felling. – Comparison between forest fuel adapted final felling and conventional final felling methods. Trädresternas rumsliga fördelning efter slutavverkning. – Jämförelse mellan bränsleanpassad och konventionell avverkningsmetod. 19 s.
- Nr 798 Möller, J.J., Arlinger, J. & Nordström, M. 2013. Test av StanForD 2010 implementation i skördare.
- Nr 799 Björheden, R. 2013. Är det lönsamt att täcka grotten? Effekten av täckpappens bredd på skogsbränslets kvalitet. – Does it pay to cover forest residue piles? The effect of tarpaulin width on the quality of forest chips. 15 s.
- Nr 800 Almqvist, C. 2013. Metoder för tidig blomning hos tall och gran. – Slutrapport av projekt 40:4 finansierat av Föreningen skogsträdsförädling. – Early strobili induction in Scots pine and Norway spruce. – Final report of Project no. 40:4, funded by the Swedish Tree Breeding Association. 26 s.
- Nr 801 Brunberg, T. & Mohtashami, S. 2013. Datoriserad beräkning av terrängtransportavståndet. – Computerised calculation of terrain transport distance. 8 s.
- Nr 802 Sonesson, J., Eliasson, L., Jacobson, S., Wilhelmsson, L. & Arlinger, J. 2013. Analyses of forest management systems for increased harvest of small trees for energy purposes in Sweden.

- Nr 803 Edlund, J., Jonsson, R. & Asmoarp, V. 2013. Fokusveckor 2013 – Bränsleuppföljning för två fordon inom ETTdemo-projektet, ST-kran och ST-grupp. – Monitoring fuel consumption of two rigs in the ETTdemo project, ST-crane and ST-group. 22 s.
- Nr 804 Iwarsson-Wide, M., Olofsson, K., Wallerman, J., Sjödin, M., Torstensson, P. O., Aasland, T., Barth, A. & Larsson, M. 2013. Effektiv volymuppskattning av biomassa i vägkanter och ungskogar med laserdata. – Effective estimate of biomass volume on roadsides and in young forests using laser data 40 s.
- Nr 805 Iwarsson-Wide, M., L., Bäfver, Renström, C. & SwedPower, P. 2013. Fraktionsfördelning som kvalitetsparameter för skogsbränsle – Kraft- och värmeverkens perspektiv. 38 s.
- Nr 806 Englund, M. & Jönsson, P. 2013. LED-lampor i såglådan – En pilotstudie. – LED lamps in the saw box – A pilot study. 8 s.
- Nr 807 Nordlund, A., Ring, E., Högbom, L. & Bergkvist, I. 2013. Beliefs among Formal Actors in the Swedish Forestry Related to Rutting Caused by Logging Operations. – Attityder och åsikter med koppling till körskador inom olika yrkesgrupper i skogsbruket 18 s.
- Nr 808 Arlinger, J. & Jönsson, P. 2013. Automatiska tidsstudier i skogsmaskinsimulator. – Driftuppföljning och produktionsdata enligt StanFord 2010. Automatic time-studies in forest machine simulators – Operational monitoring and production data according to StanForD 2010. 10 s.
- Nr 809 Englund, M., Mörk, A. & Jönsson, P. 2013. Skotartävling på Elmia – Kran- och motorinställningars påverkan på bränsleförbrukning och tidsåtgång. Forwarder contest at Elmia. – Effect of crane and engine settings on fuel consumption and speed of work. 9 s.
- Nr 810 Eliasson, L., Lombardini, C., Lundstruöm, H. & Granlund, O. 2013. Eschlböck Biber flishugg – Prestation och bränsleförbrukning – Rangering av fliscontainrar med en John Deere 1410 containerskyttel.
- Nr 811 Eliasson, L. 2013. En simulering av en integrerad skördare för förpackad flis vid energiuttag i gallring. – Simulation of an integrated harvester for pre-packaged chips during energy harvest in early thinning. 16 s.
- Nr 812 Englund, M. 2013. Test av stolar och tillbehör med avseende på helkroppsvibrationer. Test of seats and associated equipment in terms of whole-body vibrations. 32 s.
- Nr 813 Enström, J., Athenasiadis, D., Grönlund, Ö. Öhman, M. 2013. Framgångsfaktorer för större skogs bränsleterminaler. – Success factors for larger energy wood terminals. 37 s.
- Nr 814 Wennström, U. 2013. Holmens fröbehov, produktion och genetisk kvalitet 2012-2060. – Holmen's seed requirements: production and genetic quality 2012–2060. 50 s.
- Nr 815 Hannrup, B., Andersson, M., Larsson, J., Sjöberg, J. & Johansson, A. 2013. Slutrapport för projekt "Beröringsfri diametermätning i skördare – Utveckling av skräpreducerande skydd". Final report of the project 'Hands-free measurement of stem diameter in harvesters. – Development of waste-reducing protection'. 71 s.
- Nr 816 Eriksson, E. & Täljeblad, M. 2013. Prekal – Självföryngring före slutavverkning. – Slutrapport Försök 1–6. Prekal. – Natural regeneration before final felling. Final report, Experiments 1–6. 28 s.

2014

- Nr 817 John Arlinger, Torbjörn Brunberg, Hagos Lundström och Johan Möller. Jämförelse av JD1170E och JD1470E i slutavverkning hos SCA Skog AB hösten 2013. Comparison of JD1170E and JD1470E in final felling at SCA Skog AB, autumn 2013. 29 s.
- Nr 818 Bergkvist, I., Friberg, G., Mohtashami, S. & Sonesson, J. 2014. STIG-projektet 2010–2014. The STIG Project, 2010-2014. 19 s.
- Nr 819 Björheden, R. 2014. Studie av Fixteri FX15a klenträdsbuntare. – Study of Fixteri FX15a small-tree bundling unit. 21 s.
- Nr 820 Löfroth, C. & Brunberg, T. 2014. Bränsleförbrukningen hos rundvirkesfordon 2008 och 2013. Fuel consumption of roundwood vehicles in 2008 and 2013. 12 s.
- Nr 821 Jönsson, P., Hannrup, B., Gelin, O. & Löfgren, B. 2014. Utvärdering av sågenheten R5500 med avseende på kaptid och energiåtgång. Evaluation of the R5500 sawing unit in terms of bucking time and fuel consumption. 24 s.
- Nr 822 Eliasson, L. & Johannesson, T. 2014. Effekten av olika bottensäll på prestation, bränsleförbrukning och flisens fraktionsfördelning för flishuggarna Kesla 645 och Eschlböck Biber-92. – Effects of sieve size on chipper productivity, fuel consumption and chip size distribution for the chippers Kesla 845 and Eschlböck Biber-92. 18 s.
- Nr 823 Eliasson, L., Lombardini, C., Granlund, P., Magagnotti, N. & Spinelli, R. 2014. Prestation och bränsleförbrukning för en lastbilsmonterad Pezzolato PTH 1200/820 flishugg. – Performance and fuel consumption of a truck-mounted Pezzolato PTH 00/820 chipper. 12 s.
- Nr 824 Iwarsson- Wide, M. Grönlund, Ö. 2014. Lastindikatorer och lastbärarvägar. 15 s. – Load indicators and weighing devices on load carriers 12 s.
- Nr 825 Sikström, U. 2014. Föryngring av gran under högskärm: Försöksverksamhet vid Bergvik Skog – Uppföljning 2013. – Regeneration of Norway spruce under shelterwood: Comparison of two types of thinning at the preparatory felling. 48 s.
- Nr 826 Englund, M. 2014. Mätning av mental arbetsbelastning – En metodstudie. 27.
- Nr 827 Jönsson, P., Björheden, R. & Eliasson, L. 2014. Destinering och lägesbyten för att effektivisera transportererna av sko gsfis. – Destination and location exchange will reduce transportation distance. 11 s.
- Nr 828 Barth, A., Holmgren, J., Wilhelmsson, L. & Nordström, M. 2014. Evaluation of single tree based estimates with terrestrial laser scanning in Sweden.
- Nr 829 Jacobson, S. Asktilförsel och dess påverkan på trädens tillväxt och näringsstatus – Revision av sex fältförsök. 32 s.
- Nr 830 Björheden, R. 2014. Proceedings of the Nordic Baltic Conference OSCAR14. Solutions for Sustainable Forestry Operations, June 25-27, NOVA Park Conference, Knivsta, Sweden. – Proceedings från den Nordiska Baltiska konferensen OSCAR14 Solutions for Sustainable Forestry Operations, June 25–27, 2014, NOVA Park Conference, Knivsta, Sverige. 114 s.
- Nr 831 Widinghoff, J. 2014. Kontinuerlig uppföljning av drivmedelsförbrukning och lastfyllnadsgrad för ETT- och ST-fordon. – Continual monitoring of fuel consumption and load utilisation of ETT- and ST-vehicles. 21 s.
- Nr 832 Fridh, L. 2014. Utvärdering av fukthaltsmätare METSO MR Moisture Analyzer. Evaluation of the METSO MR Moisture Analyzer. 8 s.

- Nr 833 Eliasson, L., Lundström, H. & Granlund, P. 2014. Bruks 806 STC. – En uppföljande studie av prestation och bränsleförbrukning. – A performance and fuel consumption when chipping logging residues of beech 10 s.
- Nr 834 Sonesson, J., Berg, S., Eliasson, L., Jacobson, S., Widenfalk, O., Wilhelmsson, L., Wallgren, M. & Lindhagen, A. SLU. Konsekvensanalyser av skogsbrukssystem. – Täta förband i tallungskogar. 105 s.
- Nr 835 Eliasson, L. 2014. Flisning av bränsleved och delkvistad energived med en stor trumhugg–CBI6400.
- Nr 836 Johansson, F., Grönlund, Ö., von Hofsten, H. & Eliasson, L. 2014. Huggbilshaverier och dess orsaker. – Chipper truck breakdowns and their causes. 12 s.
- Nr 837 Rytter, L. & Lundmark, T. 2014. Trädslagsförsök med inriktning på biomassaproduktion – Etapp 2. – Tree species trial with emphasis on biomass production. 20 s.
- Nr 838 Skutin, S.-G. 2014. Simulering av TimberPro drivare med lastanordning i slutavverkning.
- Nr 839 Fridh, L. 2014. Evaluation of the METSO MR Moisture Analyser. – Utvärdering av fukthaltsmätare METSO MR Moisture Analyzer. s. 8.
- Nr 840 Andersson, G. & Svenson, G. 2014. Viktsutredningen del 2. Vägning för transportvederlag.
- Nr 841 Mullin, T. J. 2014. OPSEL 1.0: a computer program for optimal selection in forest tree breeding. s. 20.
- Nr 842 Persson, T. & Ericsson, T. 2014. Projektrapport. Genotyp – Miljösamspel hos tall i norra Sverige. – Projektnummer 133. 12 s.
- Nr 843 Westin, J., Helmersson, A. & Stener, L.-G. 2014. Förädling av lärk i Sverige – kunskapsläge och material. 55 s.
- Nr 844 Hofsten von, H., Nordström, M. & Hannrup, B. 2014. Kvarlämnade stubbar efter stubbskörd. – Stumps left in the ground after stump harvest. 15 s.
- Nr 845 Pettersson, F. 2014. Röjnings- och gallringsförbandets samt gödslingsregimens (ogödslat/gödslat) effekter i tallskog på skogsproduktion och ekonomi. 69 s.
- Nr 846 Pettersson, F. 2014. Behovet av borttillsel vid kvävegödsling av barrskog på fastmark. 32 s.
- Nr 847 Johannesson, T. 2014. Grövre bränsle en omöjlig uppgift? 13 s.
- Nr 848 Johannesson, T. 2014. Simulering av TimberPro drivare med lastanordning i slutavverkning Biomass Harvest and Drying Education Fond du Lac Reservation Cloquet, Minnesota. 13 s.
- Nr 849 Jönsson, P., Eliasson, L. & Björheden, R. 2014. Location barter may reduce forest fuel transportation cost. Destinering och lägesbyten för att effektivisera transporter av skogsflis. s 10.
- Nr 850 Englund, M., Häggström, C., Lundin, G. & Adolfsson, N. 2014. Information, struktur och beslut, – en studie av arbetet i gallringsskördare och skördetröska.
- Nr 851 Berlin, M., Ericsson, T. & Andersson-Gull, B. 2014. – Plantval – manual and background to technical implementation. 57 s.
- Nr 852 Jansson, G. & Berlin, M. 2014. Genetiska korrelationer mellan tillväxt- och kvalitetsegenskaper- – Genetic correlations between growth and quality traits. 26 s.

- Nr 853 Hofsten von, H. 2014. Utvärdering av TL-GROT AB's stubbaggregat. – Evaluation of the TL-GROT AB stump harvester. 10 s.
- Nr 854 Iwarsson Wide, M., Nordström, M. & Backlund, B. 2014. Nya produkter från skogsråvara – En översikt av läget 2014 – New products from wood raw material – Status report 2014. 62 s.
- Nr 855 Willén, E. & Fridh, L. & Barth, A. 2014. Mobilt mätsystem för insamling av träd- och beståndsdata. – Mobile measurement system for collecting tree and stand data. 33 s.

SKOGFORSK

– Stiftelsen skogsbrukets forskningsinstitut

arbetar för ett lönsamt, uthålligt mångbruk av skogen. Bakom Skogforsk står skogsföretagen, skogsägareföreningarna, stiftelsen, gods, skogsmaskinföretagare, allmänningar m.fl. som betalar årliga intressentbidrag. Hela skogsbruket bidrar dessutom till finansieringen genom en avgift på virke som avverkas i Sverige. Verksamheten finansieras vidare av staten enligt särskilt avtal och av fonder som ger projektbundet stöd.

FORSKNING OCH UTVECKLING

Två forskningsområden:

- Skogsproduktion
- Virkesförsörjning

UPPDRAG

Vi utför i stor omfattning uppdrag åt skogsföretag, maskintillverkare och myndigheter.

Det kan gälla utredningar eller anpassning av utarbetade metoder och rutiner.

KUNSKAPSFÖRMEDLING

För en effektiv spridning av resultaten används flera olika kanaler: personliga kontakter, webb och interaktiva verktyg, konferenser, media samt egen förlagsverksamhet med produktion av trycksaker och filmer.

Från Skogforsk nr. 855–2014



www.skogforsk.se