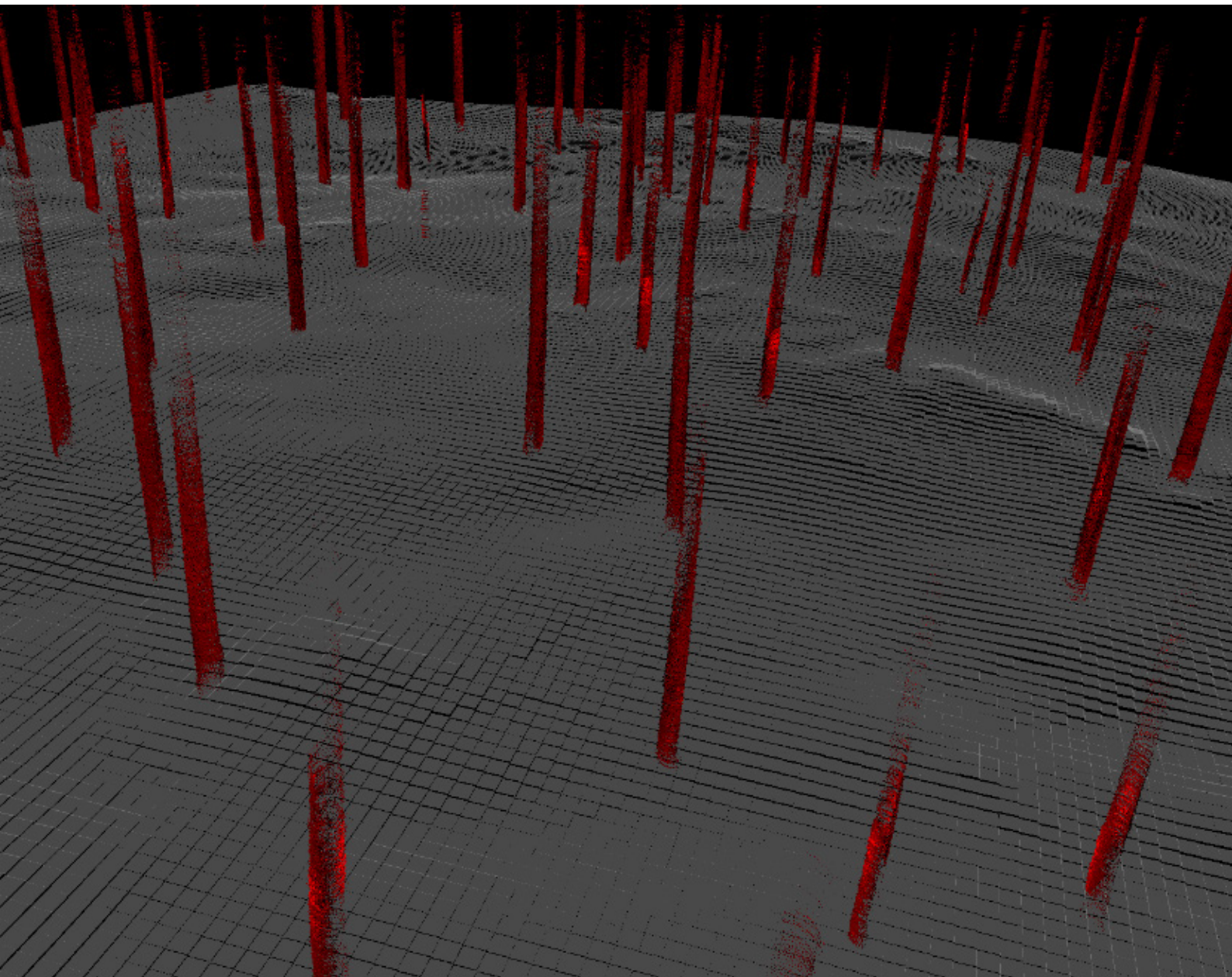


Mobil laserskanning för insamling av träddata

Collection of tree data using mobile laserscanning



©: SLU

Summary

The purpose of this project was to further develop and evaluate a mobile personalized mapping unit with the aim of demonstrating the use for forestry.

The measurement system consisted of a laser scanner (Velodyne VLP 16) which emits approximately 300,000 laser pulses per second. The laser scanner was placed on a backpack and combined with various inertial navigation systems to have a system independent of GNSS inside the forest.

Evaluation of the measurement accuracy was made in forests in Västergötland and Västerbotten to calipered and positioned tree stems. The mapping units had a mean error of 19 mm or 6% (bias 3 %) in dbh in Västergötland and 10 mm (0 in bias) in Västerbotten. The project results were very promising even though it was more difficult to measure smaller stems (<10 cm in diameter). Similar laserscanners will continue to be developed and evaluated for other forest applications in Mistra and Vinnova-funded projects forward.



Uppsala Science Park, 751 83 Uppsala
skogforsk@skogforsk.se
skogforsk.se

Redaktör: Anna Franck, anna@annafranck.se
©Skogforsk 2019 ISSN 1404-305X

Förord

Denna arbetsrapport sammanfattar utvecklingen av ett bärbart mätsystem för insamling av skogliga data. Grundutvecklingen av mätsystemet har finansierats av Brattåsstiftelsen för skogsvetenskaplig forskning. Projektet har skalats upp genom kompletterade finansiering från Södras och Norrskogs forskningsstiftelser. Dessa pengar används för att demonstrera mätsystemet i olika delar av Sverige och redovisas i separat demonstrationsrapport. Flera demonstrationer har under projektets gång hållits tillsammans med företrädare från skogsföretag och projektresultaten har fått en bred spridning inom skogsbranschen. Nyttjandet av den utvecklade tekniken fortsätter i flera olika projekt, bland annat inom det stora forskningsprogrammet Mistra Digital Forest, som startade i februari 2019, och ett nytt projekt som kombinerar mobila mätsystem med flygburna sensorer, även detta finansierat av Brattåsstiftelsen.

Uppsala i december 2019

Erik Willén, Jon Söderberg,
Johan Holmgren, Mikael Tulldahl,
Joakim Rydell, Jonas Nordlöf & Johan Öhgren

Innehåll

Summary.....	2
Förord	3
Sammanfattning.....	5
Inledning.....	6
Bakgrund.....	6
Syfte och mål.....	12
Material och metoder	13
Studieområden.....	13
Fältdata	13
Mätsystem.....	13
Databearbetning	15
Utvärdering.....	17
Resultat	18
Remningstorp	18
Krycklan	21
Diskussion	23
Referenser.....	25

Sammanfattning

De senaste åren har användandet av fjärranalys ökat kraftigt med bland annat introduktionen av flygburen laserskanning. Skogliga laserskattningar finns nationellt tillgängliga, men måste kombineras med fältmätningar för att på bästa sätt beskriva skogens egenskaper (till exempel trädslagsblandning och drivningsförhållanden). En ny nationell flygburen laserskanning inleddes 2018 som kommer att täcka landet inom 6–8 år, men det finns behov av verktyg och metoder som kan användas för aktuell och mer detaljerad beskrivning av den skogliga informationen i bestånd som planeras för avverkning. Här kan personburna mobila laserskannrar komma väl till användning. Insamlingen av mätdata kan göras av en person som går igenom avverkningsskogar i samband med drivningsplaneringen. Nya sensorer utvecklas till att bli mindre och lättare, dra mindre effekt och bli billigare. Dessutom samlar de in betydligt större datamängder än tidigare.

Syftet med detta projekt var att vidareutveckla och utvärdera ett mobilt personburet mätsystem med målet att demonstrera användningen för skogsbruket.

Mätsystemet bestod av en laserskanner (Velodyne VLP 16) som sänder ut cirka 300 000 laserpulser per sekund i 16 plan och roterar 360 grader. Den kombinerades med olika tröghetsnavigeringssystem för att inte vara beroende av satellitnavigations-system inne i skogen. Mätsystemet monterades på en ryggsäck.

Utvärdering av mätnoggrannheten gjordes i skogar i Västergötland och Västerbotten mot klavade och positionsbestämda trädstammar i provytor.

Bearbetning av data från mätsystemet inkluderar olika moment:

1. Beräkna ett 3D punktmoln
2. Hitta och avgränsa trädstammar
3. Bestämma trädposition och brösthöjdsdiameter

Det första mätsystemet med en enklare tröghetsnavigering utvärderades i Västergötland och hade ett medelfel på 19 mm eller 6 procent för brösthöjdsdiameter. Bias var 8 mm (3 procent).

Med en bättre tröghetsnavigering, utvärderad i Västerbotten, erhöles ett medelfel på 10 mm och 0 i bias. När detta sammanställdes till grundytavägda medelvärden motsvarade det ett medelfel på 3,4 procent för medeldiameter och 8,5 procent för grundyta på provytenivå. Fler detaljer om metoder och resultat från utvärderingar finns även publicerade i andra undersökningar.

Projekresultaten var mycket lovande även om det var svårare att mäta klenare stammar (< 10 cm i diameter). Samma laserskanner fortsätter att utvecklas och utvärderas för andra skogsstillämpningar i Mistra- och Vinnovafinansierade utvecklingsprojekt framöver.

Inledning

BAKGRUND

Ökad användning av fjärranalys

Insamling av skogliga data sker traditionellt med fältbaserade metoder tillsammans med tolkning av flygbilder. Tillvägagångssätten är arbetskrävande och resultaten varierar kraftigt beroende av inventerare. De senaste åren har användandet av fjärranalys ökat kraftigt med bland annat introduktionen av flygburen laserskanning. Skogliga laser-skattningar finns nationellt tillgängliga, men måste kombineras med fältmätningar för att på bästa sätt beskriva skogens egenskaper (till exempel trädslagsblandning och drivningsförhållanden). En ny nationell flygburen laserskanning inleddes 2018 som kommer att täcka landet inom 6–8 år, men det finns behov av verktyg och metoder som kan användas för aktuell och mer detaljerad beskrivning av den skogliga informationen i bestånd som planeras för avverkning. Här kan personburna mobila laserskannrar komma väl till användning. Insamlingen av mätdata kan ske av en person som går igenom avverkningsskogar i samband med drivningsplaneringen.

Mätdata kan användas för att:

- Positionera och skanna av trädstammar och ge möjlighet till bättre aptering genom att stammen mäts och avvikelser som krökar kan identifieras.
- Kartera trädslagsblandning, medeldiameter, volym och grundyta.
- Kalibrera andra fjärranalysskattningar såsom flygburen laserskanning, vilket leder till bättre estimat av exempelvis virkesvolym över stora arealer.
- På sikt öppna möjligheter till ökad automation i drivningen genom den förbättrade positioneringen på träden.

Under 2018–2019 startade flera stora initiativ (exempelvis projekten Auto 2 och Mistra Digital Forest) som ska använda detaljerad skanning för såväl skoglig planering och ökad automation i avverkningsarbetet. Där bekräftas ovanstående användningsområden och liknande mätsystem planeras att användas.

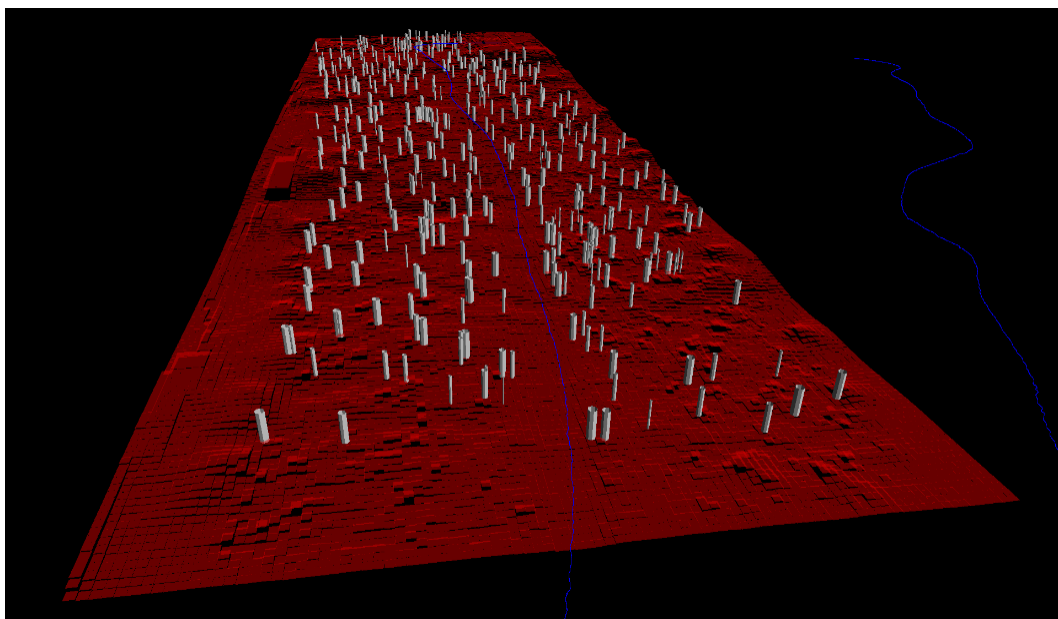
Erfarenheter från genomförd forskning

Två tidigare projekt med finansiering från Brattåsstiftelsen har utförts med projektgruppen (Barth m.fl. 2012, Willén m.fl. 2014). I det första projektet (2009–2011) gjordes en bred undersökning för att utreda vilken teknik eller vilken kombination av tekniker som hade störst potential för automatisk insamling av 3D-data från skogsmaskiner. Resultaten visade att den mest lovande tekniken var en pulserande 2D-linjelaser (en roterande laseravståndsmätare i ett plan) i kombination med stereokameror (två kameror med känt avstånd mellan och stort bildöverlapp, som beräknar plattformens förflyttning). Denna kombination ansågs lämplig, eftersom lasern kunde användas för att mäta avstånd med tillräckligt hög precision medan stereokameran kunde användas för att beräkna systemets position. I det andra projektet (2012–2014) testades en 2D-laser i kombination med stereokameror och tröghetsnavigering.



Figur 1. En 2D-laserskanner som användes i tidigare projekt. ©: FOI

Den position som kan beräknas från vanlig GPS har inte tillräckligt hög precision inne i skogen, eftersom signalerna från satellitsignalerna störs av trädskronorna. Stereokamerorna användes för att beräkna en position och med hjälp av denna positionering kunde ett 3D-punktmoln beräknas från 2D-lasern genom att använda sensorns rörelse. För att beräkna sensorns position kontinuerligt och kunna följa sensorns rörelse användes så kallad SLAM (*simultaneous localization and mapping*) (Rydell, 2012, Emilsson, 2014). Figur 2 visar ett exempel på automatiskt detekterade träd. Stamdiametrar beräknades baserat på 3D-punktmoln från det system som har utvecklats inom projektet.



Figur 2. Trädskarta från mobil laserskanner monterat på bil. ©: SLU

Nya sensorer öppnar för mer robust positionering

De tidigare projekten har visat på goda möjligheter att samla in träddata. Parallellt har utvecklingen av förbättrade mätsystem varit omfattande. Nya sensorer blir mindre och lättare, drar mindre effekt och blir billigare. Dessutom samlar de in betydligt större datamängder än tidigare.



Figur 3 . Velodyne VLP-16 laserskanner. ©: Velodyne Lidar

Figur 3 visar den mindre sensor som fått stort genomslag de senaste åren. Datainsamling med nya 3D-laserskannrar sker allt oftare i flera plan samtidigt. Det ger en möjlighet att mäta trädstammars geometri direkt i tre dimensioner och därmed längs en stor del av stammen. De många lasrarna (Velodyne VLP-16 har 16 stycken) i laserskannern tillsammans med tröghetsnavigering (positionsberäkning baserad på accelerometrar och gyron) kan helt ersätta GPS-positionering i täta skogar. Det innebär att det finns behov av att vidareutveckla ett mer robust mätsystem för insamling av 3D-data. Till skillnad mot att använda stereokamera är en laserskanner helt oberoende av speciella ljusförhållanden. Beräkningarna störs heller inte i samma utsträckning av vindens rörelse av trädgrenar, eftersom stamytan används vid beräkningen. Den breda användningen av skannrar inom andra tillämpningsområden har också medfört en helt annan kostnadsbild, med lägre priser samtidigt som insamlingskapaciteten ökat.

Flera användningsområden

Ett robust, mobilt mätsystem som både skannar i tre dimensioner och även mäter in trädets position ger möjlighet att få detaljerade trädkartor med stamprofiler. Med stöd av den uppmätta avsmalningen kan trädets volym beräknas och stamdefekter som krökar identifieras. Det medför mer detaljerade uppgifter om det kvarvarande beståndet och ger också väsentligt stöd till apteringen vid kommande drivning. Vid mobila mätningar under drivningsplaneringen före gallring eller slutavverkning identifieras defekter och yttre kvaliteter på träden (inklusive trädslag), vilket förbättrar möjligheten till goda utbytesberäkningar innan avverkning. Genom mätning av stammarna innan avverkning kan mätningen i skördaraggregaten effektiviseras och öka drivningsnettot för skogsägaren.

Ett mätsystem som samlar in 3D-data med god positionering även utan GPS i gallrings-skogar innebär en stor förbättring. Tidigare studier har nämligen visat på svårigheter att ta emot tillräckligt god GPS-signal i tätare skogar, vilket hindrat möjligheterna till insamling av mer detaljerade trädkartor och operativ användning av mobila mätsystem i skogen.

Med mer detaljerade uppgifter om det kvarvarande beståndet, såsom virkesvolym och detaljerade digitala trädkartor, ges en ytterligare dimension till skogsbruksplaner och bättre beslutsstöd till framtida åtgärder. Förslag till natur- eller kulturhänsyn blir dokumenterad för såväl gallring som slutavverkning.

Den 3D-karta som framställs innehåller även geografiska koordinater på inmätta träd, vilket möjliggör framtida automation av avverkningsarbetet. Genom detaljerade trädkartor kan kranrörelser delautomatiseras både när det gäller att nå ut till träden, men även för att optimera val av träd som avverkas.

Skogforsk utvecklar system som nyttjar befintlig information från skördaren för ajourhållning av avdelningsregister och uppföljning efter gallring (Möller 2012, Hannrup m.fl. 2011, 2015). I samarbete med maskintillverkare blir det möjligt att stärka dessa system med både skördardata och mobila mätningar innan avverkning för en högre noggrannhet och bättre geografiska detaljer som position och stamp profiler.

Andra forskningsresultat

För att skapa ett punktmoln från en mobil laserskanner har SLAM-algoritmer utvecklats. Det gör att man kontinuerligt kan beräkna sensorns position med hjälp av avståndsmätningar från laserskannern. Utifrån punktmolnet kan sedan 3D-koordinater beräknas. Dessa metoder har ofta utvecklats för mätningar av byggnader där det finns väldefinierade ytor i flera riktningar runt skannern, till exempel i ett rum. Under den senaste tiden har även SLAM-algoritmer utvecklats som fungerar bra i naturliga miljöer (Bosse m.fl. 2012, Zhang m.fl. 2014). Det finns även exempel på algoritmer som har tagits fram i Finland speciellt för skogstillämpningar, där mycket avancerad och kostsam hårdvara har använts (Kukko m.fl. 2017, Liang m.fl. 2018).

Demonstration av mobila laserskannrar

I slutet av september 2016 arrangerade Skogforsk och SLU en demonstrationsdag på fastigheten Remningstorp i Västergötland. Detta gjordes i samband med egna mätningar med olika mobila laserskannrar, för att låta system- och tjänsteleverantörer visa på sin teknik. Vid sidan av det utvecklade mätsystemet demonstrerades Leica Pegasus (Figur 4) samt ZEB-1 (Figur 5).

Leica Pegasus består av två stycken Velodyne VLP-16 skannrar som kombineras med stereokameror i färg samt positioneringssystem med tröghetsnavigering. Mätsystemet bärs på en ryggsäck. Vid initieringen säkerställs en god GPS-kontakt som sedan med hjälp av tröghetsnavigeringen sköter positioneringen inne i skogen. Ett exempel på hur mätningarna ser ut inifrån en granskog finns i figur 6. Färgen i bilden kommer från kamerorna och läggs på laserpunkterna för att underlätta tolkning och vidare data-analyser. Leica Pegasus används främst för mätning av infrastruktur och även för inomhusmätningar. Det finns få skogliga exempel på användning av mätsystemet. Demonstrationen visar även att det var ganska svårt att få till en GPS-koppling längs öppna platser i skogen som skogsbilvägar eller vändplaner.



Figur 4. Leica Pegasus mobil laserskanner.
Foto: Skogforsk

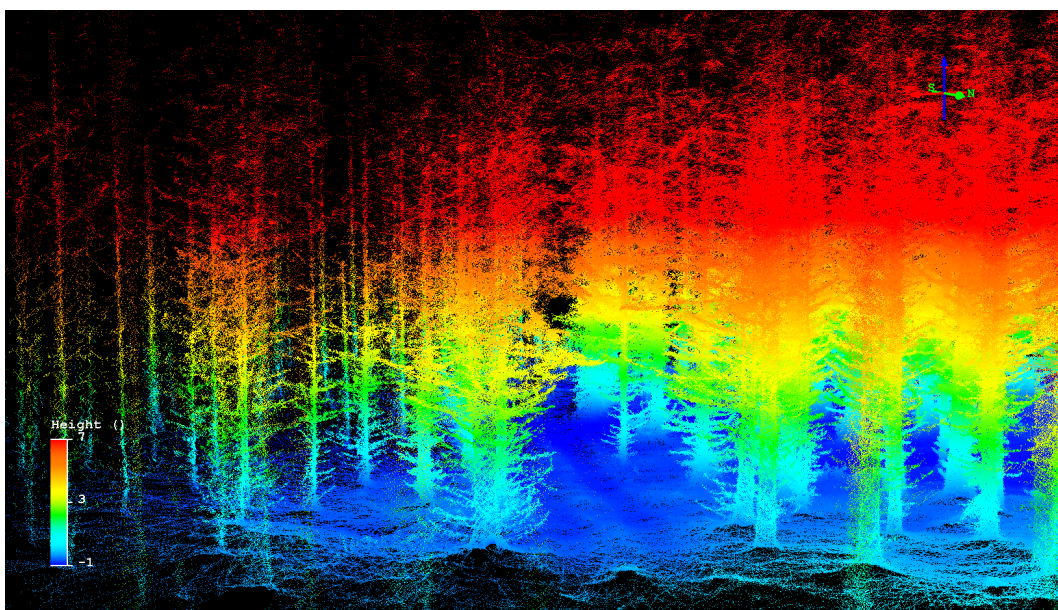
ZEB-1 är en enlinjeskanner som skapar en 3D-avbildning genom att den skakas och då svänger fram och tillbaka och bilden sätts samman av enstaka skannsvep. Skannern samlar in 43 000 punkter per sekund. I exemplet i figur 7 avbildas skogen i punktmolnet färgsatt efter höjd över marken. De mobila skannrarna fångar inte trädtoppen utan enbart cirka 5–7 meter upp på stammen. ZEB-1 har ingen GPS-koppling varför data enbart får en relativ inbördes position. Det kan räcka långt för att sammanfatta bestånd.



Figur 5. ZEB-1 mobil laserskanner. Foto: Skogforsk



Figur 6. Exempeldata från demonstrationer med Leica Pegasus laserskanner.
©: Leica Geosystems



Figur 7. Skanning med ZEB-1 laserskanner. ©: COWI

Under 2016–2018 erhöjls projektmedel från Södras och Norrskogs forskningsfonder som inkluderade demonstrationer av det mätsystem som utvecklats med finansiering av Bråttåsstiftelsen. Detta gav en bredare bild av hur mätsystemet fungerar i olika skogstyper (Willén m.fl. 2018). Avverkningsskogar i Östergötland och Västerbotten skannades. Skördardata användes som referens för utvärderingen.

SYFTE OCH MÅL

Syftet med detta projekt var att vidareutveckla och utvärdera ett mobilt personburet mätsystem för användning av fältpersonal inom skogsbruket för automatisk datainsamling i 3D.

Mål för projektet:

- Demonstrationer av mobilt mätsystem för fältpersonal.
- Vidareutveckling av algoritmer för att uppnå maximal noggrannhet vid mätningar av skog.
- Utvärdering av algoritmer för automatisk positionering av trädstammar och skattning av trädstammarnas egenskaper, till exempel diameter och volym.

Material och metoder

STUDIEOMRÅDEN

Som studieområde för inledande tester med mätsystemet valdes fyra provytor inom fastigheten Remningstorp strax väster om Lerdala i Västergötland (Figur 8).



Figur 8. Valda provytor inom fastigheten Remningstorp i Västergötland. ©: Lantmäteriet

Under vidareutveckling av mätsystemet användes ett andra studieområde i Krycklan utanför Vindeln i Västerbotten.

FÄLTDATA

Som referens för valideringen i Remningstorp användes fyra provytor med 20 meters radie. De var alla grandominerade och trädpositionerna har inmätts med en totalstation under 2011. Samtliga inmätta träd klavades på nytt i anslutning till datainsamlingen med mätsystemet.

För validering i Krycklan valdes sex ytor på 80 x 80 m. Samtliga träd klavades och alla ytor skannades även med en terrester laserskanner (på stativ). För att positionera klavade träd användes ultraljud (DP POSTEX). Det mobila mätsystemet utvärderades i en cirkel med 20 meters radie i mitten av ytan. Provytorna i Krycklan bestod av såväl trädslagsrena barrskogar som barrblandbestånd med lövinslag.

MÄTSYSTEM

Mätsystemet bestod av en laserskanner (Velodyne VLP 16) som sänder ut cirka 300 000 laserpulser per sekund i 16 plan och roterar 360 grader. För att säkerställa skanning av marken monterades skannern lutande (Figur 9).

För positionering valdes ett CHAMELEON-system utvecklat av FOI (Rydell & Emilsson, 2012). Det klarar att beskriva rörelsebanan i skogen utan tillgång till satellitpositionering, vilket är nödvändigt i tät skog. Systemet består av två stereokameror tillsammans med en enklare IMU (inertial measurement unit), som är ett mätredskap för tröghetsnavigering. Både

stereokamerorna och tröghetsnavigeringen ger pålitliga positionsmätningar även om de ger relativa positioner och inte absoluta. Tröghetsnavigering måste senare kompenseras för avdrift, vilken ofta tilltar över tid. Vid datainsamlingen över provytorna användes ett gångmönster där rörelsebanorna korsade varandra, vilket gav möjlighet att knyta ihop mätningarna.



Figur 9. Mätssystemet monterat på bärram med laserskanner i toppen. Foto: Skogforsk

Mätssystemet som sedan utvärderades i Västerbotten utrustades med en bättre tröghetsnavigering (NovAtel SPAN-IGM-S1 med en GPS-702-GG antenn) (Figur 10). Under korrektionen sker då en filtrering av rörelsebanan och SWEPOS korrektion av positioneringen. Denna förbättrade tröghetsnavigering ersätter CHAMELEON-systemet och ger en mindre avdrift när GPS-kontakt saknas.



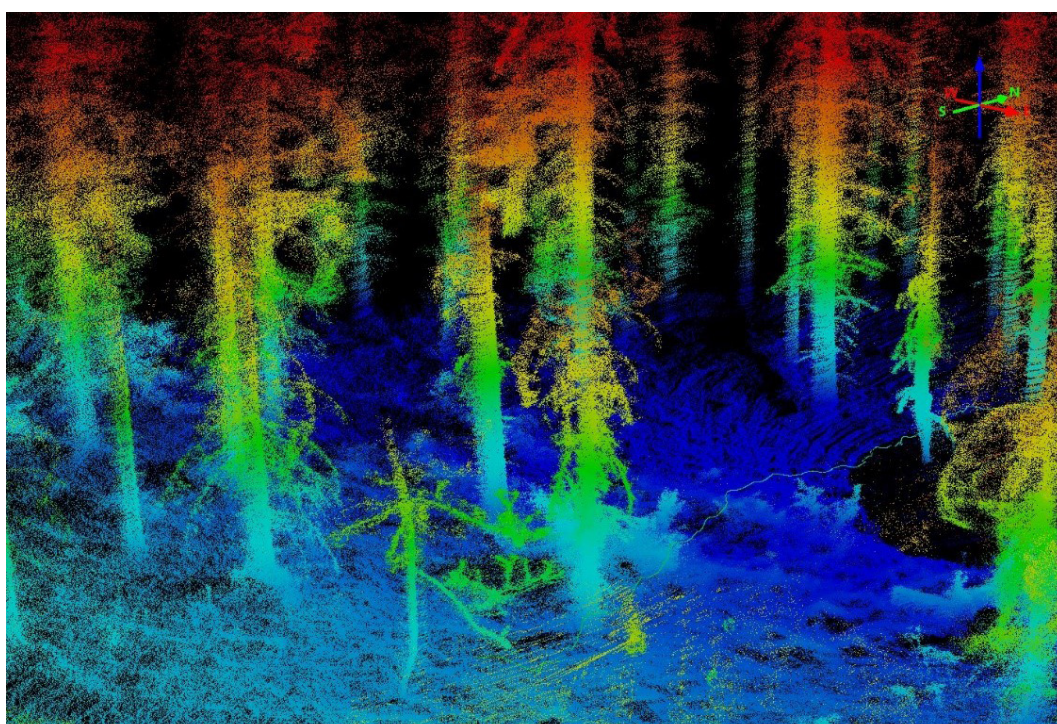
Figur 10. Detaljbild över mätssystemet som användes i Västerbotten. Foto: SLU

DATABEARBETNING

Bearbetning av data från mätsystemet inkluderar olika moment (Beskrivs även mer detaljerat i Holmgren m.fl. 2019):

1. Beräkna ett 3D-punktmoln
2. Hitta och avgränsa trädstammar
3. Bestämma trädposition och brösthöjdsdiameter

Obearbetade laserpunkter från mätsystemet ger en relativt detaljerad bild av markyta och trädstammar (Figur 11). Däremot syns att flera trädstammar är onaturligt krokiga och kräver ytterligare databearbetning för att användas till mätningar av träden. Grenverket syns delvis och bidrar även till svårigheter att bestämma stammen en bit upp på trädet. Fördelen med ett mobilt mätsystem blir dock tydligt då det på denna plats blir många skymda träd, vilket en stationär laserskanner måste kompensera för.



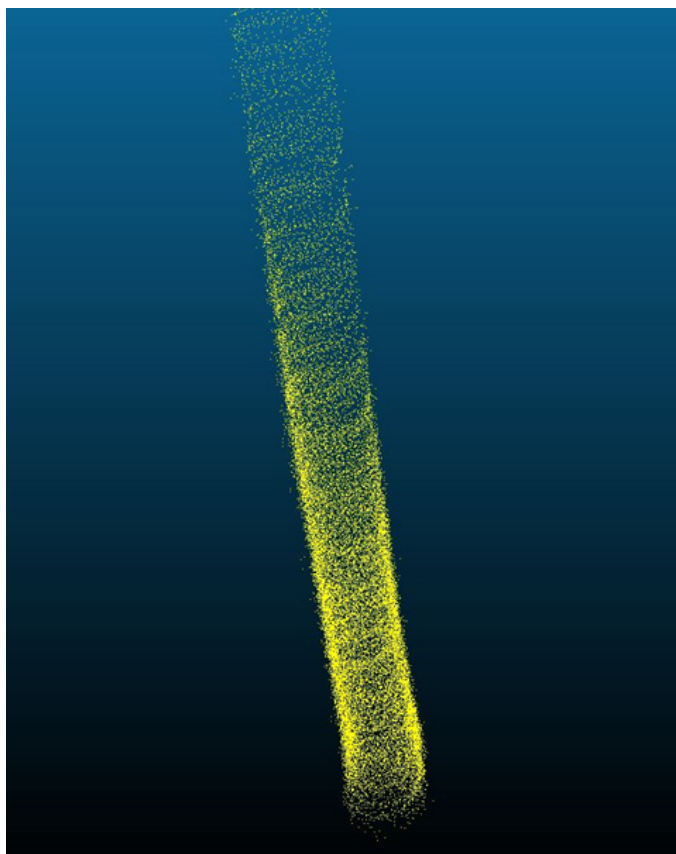
Figur 11. Obearbetade laserdata från det mobila mätsystemet. ©: SLU

En utmaning med ett mobilt mätsystem är den ständiga rörelsen. Den måste korrigeras för under de inledande stegen av databearbetningen, innan träddata kan beräknas. Mätsystemet mäter med 16 lasrar i lika många plan och sveper tio varv per sekund samtidigt som lasrarna sänder ut ca 300 000 pulser per sekund. För att beräkna ett 3D-punktmoln från alla avstånd som mäts med pulser från laserskannern behövs en beräkning av sensors position vid varje tidpunkt från tröghetsnavigeringen. En tidsstämpel som synkroniseras mellan dataseten används för att knyta ihop data från tröghetsnavigeringen med skannersvep.

För att beräkna mätsystemets position justeras den beräknade rörelsebanan från tröghetsnavigeringen mot laserdata genom en dynamisk kalibrering som korregerar för avdrift. Det sker i två steg, först justeras positionen baserat på ett skannersvep (varje tionedels sekund) och sedan över en sekunds insamling. Det första steget korregerar för avdrift i det korta tidsperspektivet medan steg två hanterar avdrift över längre tid.

För den dynamiska kalibreringen identifieras objekt i laserdata i form av trädstammar eller platta ytor (oftast marken). För att finna dessa objekt användes den lokala variationen i tre dimensioner (3D). Stora lokala variationer filtrerades bort, då dessa oftast handlar om grenar eller buskar. Punkter med låg lokal variation i laserdata kunde användas för att knyta ihop skanningssvep och sätta samman rörelsebanan för mät-systemet med hög precision. Platta ytor från marken är då större kvadratiska områden med låg variation i 3D medan trädstammar är mer rektangulära områden utmed stammens längdriktning. I och med att grenverk, undervegetation och platta områden automatiskt separerades från trädstammar eller stamsektioner kunde även en första grov kartering av trädstammar göras från detta första bearbetningssteg.

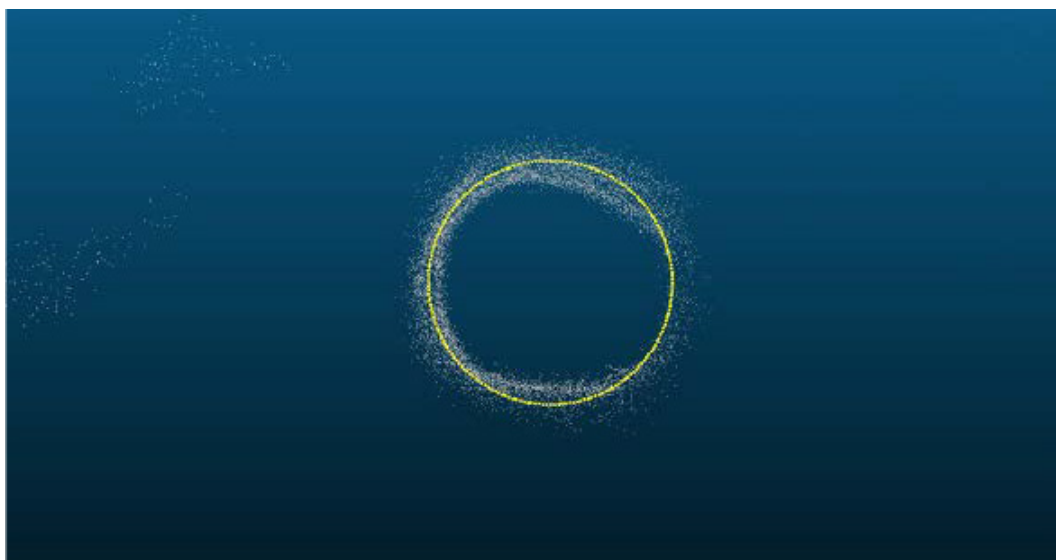
I nästa bearbetningssteg sattes stamsektioner ihop till hela stammar. Detta genomfördes genom att beräkna en riktningsvektor för varje stamsektion och stamsektioner med liknande position och riktningsvektor sattes samman. Ett exempel på hur stammar ser ut i bearbetade laserdata återfinns i figur 12.



Figur 12. Trädstam från bearbetade punktmoln från mätsystemet.
©: SLU

Slutligen beräknades trädposition och stamdiameter i brösthöjd. Det inleddes med en finjustering av stamsektionernas positionering genom att beräkna en 3D-linje för varje stamsektion. Sedan nyttjades positionen i x- och y-led för både stamsektionen och den estimerade 3D-linjen för varje sektion i horisontalplanet för att sätta samman stamsektioner. På så sätt skapades en karta med stampositioner och trädstammar, en trädkarta.

Från de platta ytor som identifierades under den dynamiska kalibreringen skapades en markhöjdmodell efter en filtrering av laserpunkter med en låg standardavvikelse (0,5 meter) jämfört med omkringliggande punkter varefter markhöjdmodellen interpolerades fram. Därefter kunde trädsegment i brösthöjd (1,3 meter) sorteras fram ut trädkartan. Ur laserpunktmolnet gjordes sedan en cirkelanpassning för att skapa en traddiameter (Figur 13). Diametrar från olika skanningssvep kring 1,3 meters höjd vägdes ihop för ett mer pålitligt värde på brösthöjdsdiametern.



Figur 13. Cirkelanpassning av trädstams tvärsnitt i laserdata. ©: SLU

UTVÄRDERING

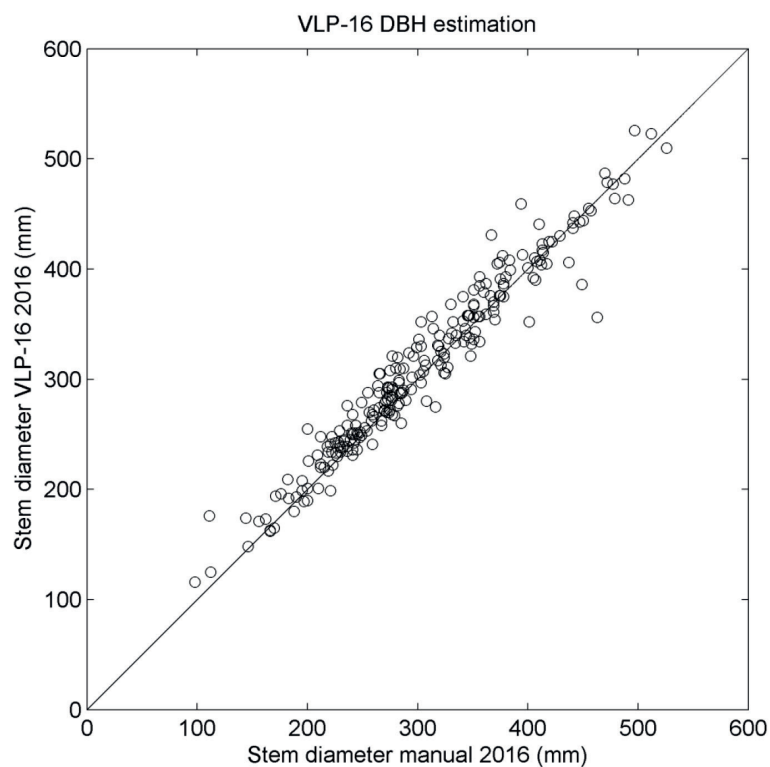
Det första mätsystemet utvärderades över de fyra provytorna i Remningstorp genom att matcha inmätta träd med de som skapades ur trädkartan från mätsystemet. Ett träd identifierat i mätsystemet kopplades samman med de manuellt inmätta träden om de återfanns inom 0,8 meter från varandra.

I Krycklan användes de sex provytorna på motsvarande sätt, men sammankoppling gjordes inom 0,5 meter från de manuellt inkopplade träden. Den förbättrade tröghetsnavigeringen gav en bättre positionering från mätsystemet.

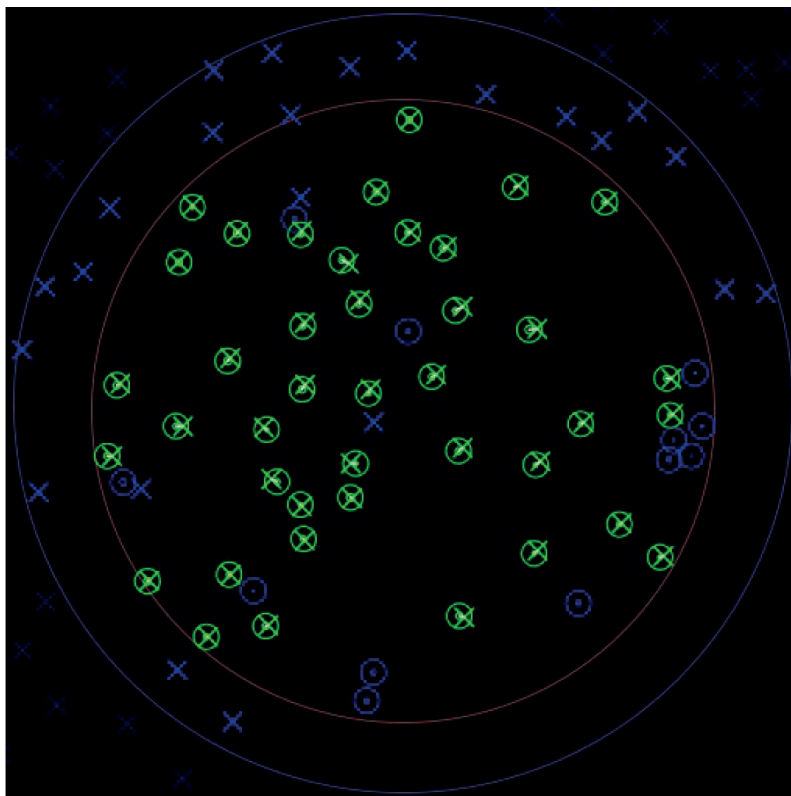
Resultat

REMNINGSTORP

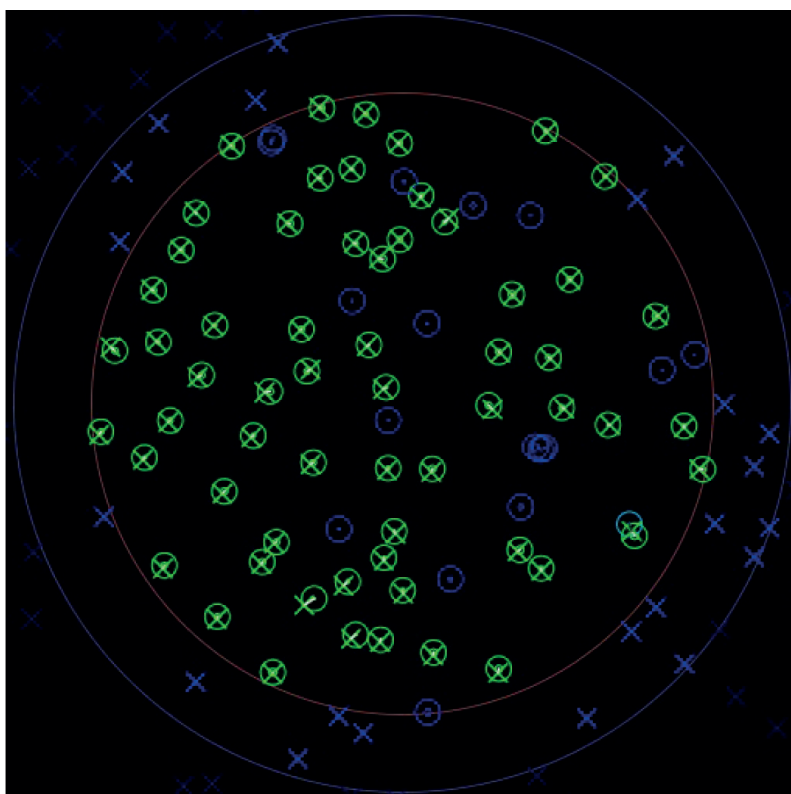
Det första mätsystemet hade ett medelfel på 19 mm eller 6 procent för brösthöjdsdiameter när de fyra provytorna lades ihop (Figur 14). Bias var 8 mm (3 procent). Figur 15–18 visar hur mätsystemet klarade att detektera träd per provyta (röd cirkel). Träd som inte mätsystemet hittat hade en lägre diameter än de som kopplats samman.



Figur 14 . Utvärdering av brösthöjdsdiameter från mätsystemet och manuellt klavade träd med alla fyra provytor samlade. Figur från Holmgren m.fl. 2017.

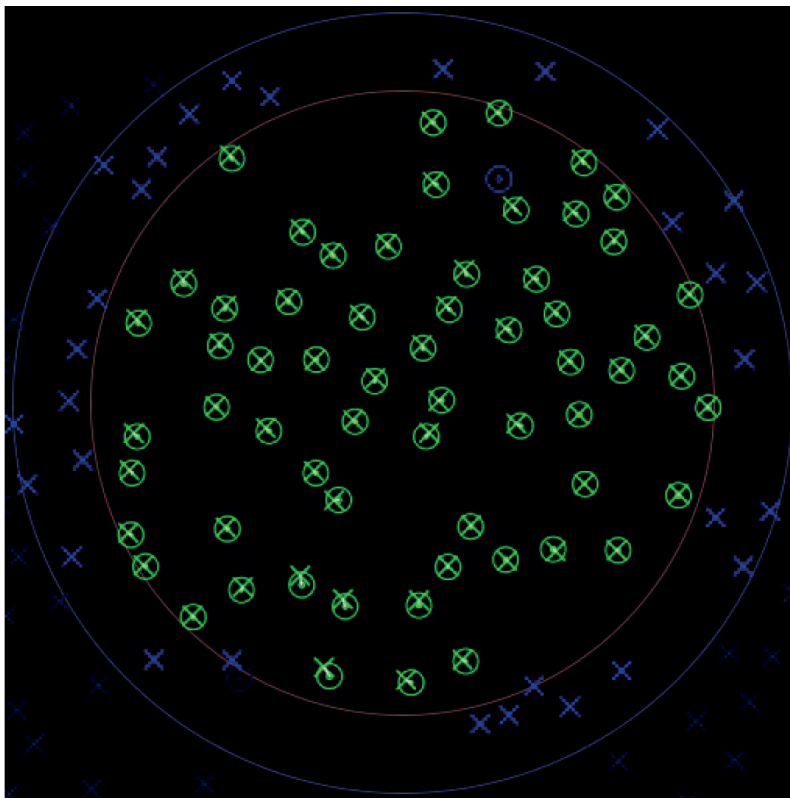


Figur 15. Inmätta träd över provyta 447.

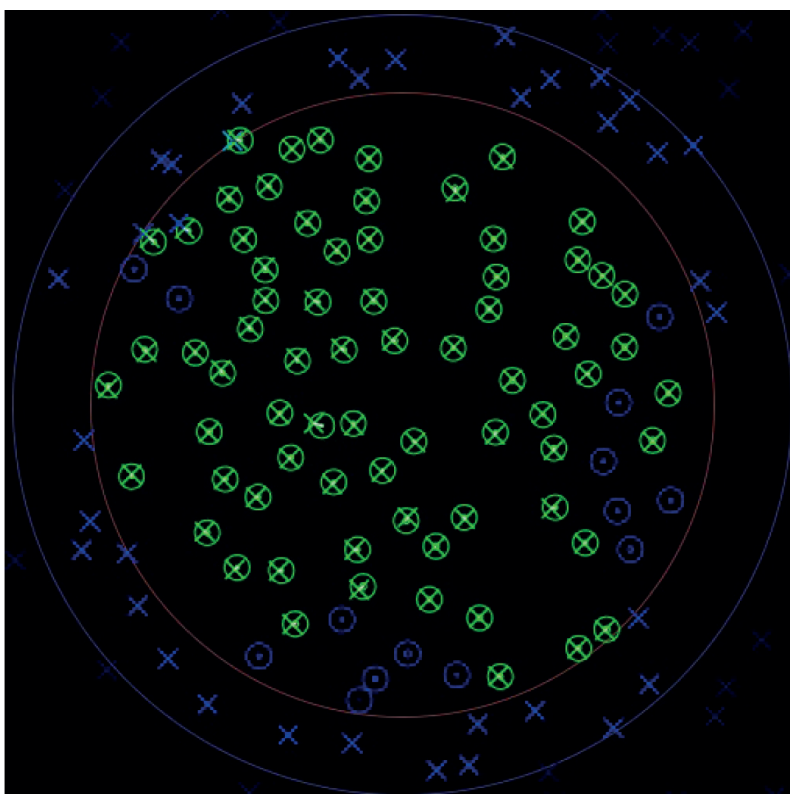


Figur 16. Inmätta träd över provyta 116.

Kryss i bild 15 och 16 representerar träd som mätsystemet detekterat och cirklar är manuellt inmätta. Grön färg visar på träd som är kopplade mellan mätsystemet och manuell inmätning.



Figur 17. Inmätta träd över provyta 151. Figur från Holmgren m.fl. 2017.

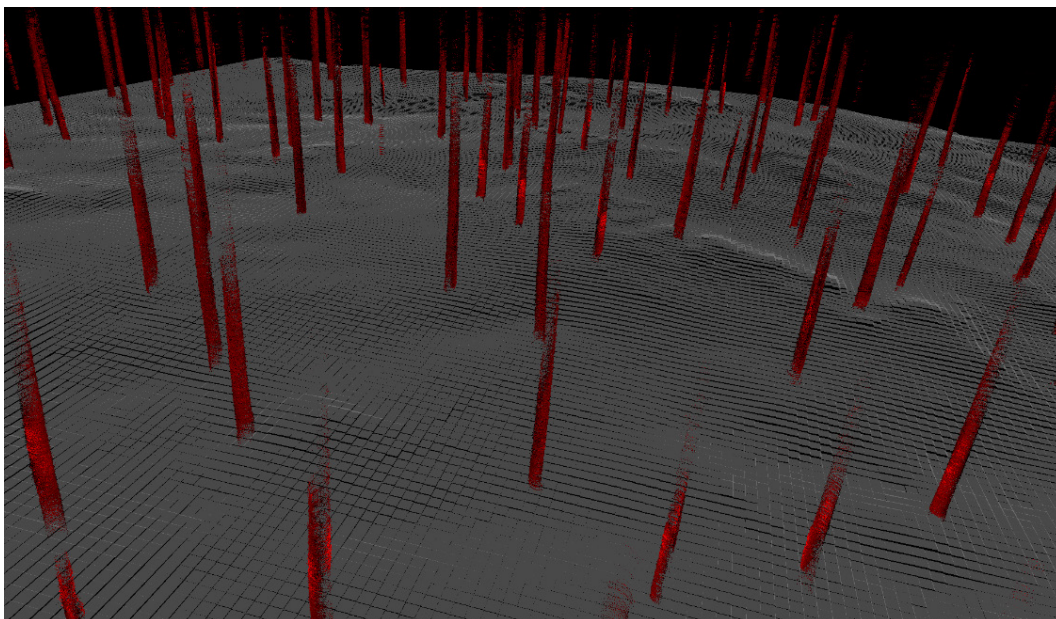


Figur 18. Inmätta träd över provyta 13.

Kryss i bild 17 och 18 representerar träd som mätsystemet detekterat och cirklar är manuellt inmätta. Grön färg visar på träd som är kopplade mellan mätsystemet och manuell inmätning.

KRYCKLAN

Resultatet från Krycklan gav en detaljerad markmodell och trädkarta (Figur 19).

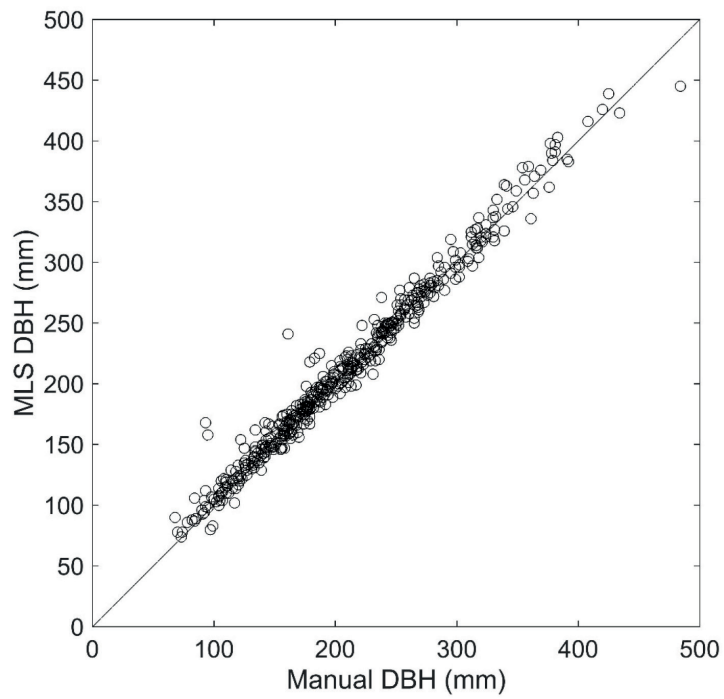


Figur 19. Trädkarta från mätsystemet över en provyta i Västerbotten. ©: SLU

Två olika mätresultat jämfördes, det ena baserat på mätresultat där stammen skannades från ett håll och det andra med skanningsresultat från bägge sidor av stammen.

Vid jämförelser med mätt brösthöjdsdiameter erhöles ett medelfel på 11 mm med en bias på 4 mm (Figur 20) när skanningsdata användes från ett håll. Vid skanning från olika sidor av trädet var medelfelet 10 mm och 0 i bias. När detta sammanställdes till grundytewägda medelvärden motsvarade det ett medelfel på 3,4 procent för medeldiameter och 8,5 procent för grundyta på provytenivå.

Generellt för mätningarna är en svårighet att mäta träd med en brösthöjdsdiameter mindre än 10 cm. Det blev tydligare i Krycklan där det fanns mer underväxt. På provytorna i Remningstorp var träden grövre och saknade i princip underväxt.



Figur 20. Utvärdering av brösthöjdsdiameter från mätsystemet och manuellt klavade träd med alla sex provtytor samlade.

Diskussion

Under projektet har ett mobilt mätsystem utvecklats som inkluderar både en laserskanner och tröghetsnavigeringssystem. Det mer avancerade tröghetsnavigeringssystemet för-
enklade positioneringen när GPS-stöd saknades.

Bästa mätresultaten erhöles när det saknades underväxt och var begränsat med grenar nära marken. Täta grenvarv nära brösthöjd gav en överskattning av medeldiametern. Genom att nyttja cirkelanpassningar från enskilda laserskanningssvep i brösthöjd som interpolerades ihop kunde felen i medeldiameterskattningar minskas. Man kan beskriva det som att man gör lokala avsmalningsfunktioner för varje stam. När data nyttjades från olika sidor av stammen gavs ett något bättre resultat, men samtidigt ställer det krav på fler laserpunkter per stam.

Provytorna hade en radie på 20 meter och under insamlingen lades gångstråk ut som gjorde att det var mindre än 10 meter mellan olika stråk. För en totalkartering krävs alltså ett tätt gångmönster, men för ett urval i ett bestånd kan många stammar karteras på kort tid med gott resultat.

Stammar under 10 cm var svåra att kartera ordentligt med mätsystemet. Det skulle gå bättre med en skanner som skickar ut fler pulser per skanningssvep så att fler mätningar finns på varje stam från samma skanningssvep eller tätare gångmönster. Skannern skickade ut ca 300 000 pulser per sekund och var inställd på att svepa tio varv per sekund. Om den istället sveper fem varv per sekund blir det tätare mellan laserstrålarna och då kan kanske även mindre träd upptäckas på ett visst avstånd (fler laserstrålar på trädstammen). Samtidigt är rekommendationen att använda mätsystemet i slutavverkningsskogar där det finns ett större behov av att mer detaljerat beskriva kommande utbyte i form av diameterfördelning.

Jämför vi med forskningsresultat från andra länder är våra resultat i paritet eller något bättre. Samtidigt beror det mycket på vilken typ av skog som skannas. Skogarna i Remningstorp saknar underväxt och ger bättre mätresultat, medan en mer variationsrik skog i Västerbotten var något svårare. En ännu tätare underväxt försvårar mätningarna och det är svårt att tolka resultat mellan olika länder och skogstyper.

Genom de olika processtegen blir resultatet i figur 19 en detaljerad bild av såväl stammar som marken. Den här utvärderingen fokuserar på stamdiameter, men det är uppenbart många andra tillämpningar som kan dra nytta av resultaten. I ett nyligen uppstartat Vinnova-projekt (Auto 2) undersöks om ett liknande mätsystem skulle kunna monteras på skogsmaskiner, främst för att kunna navigera utan förare och ge information om framkomlighet. Det kan bygga vidare på erfarenheter från detta projekt.

Inom ramen för ett FORMAS-projekt utvärderar SLU och Skogforsk mervärdet av denna mer detaljerade beståndsbeskrivning som mätsystemet ger för utbytesberäkningar för skogsindustrin. Det bygger på insamlade data inom ramen för demonstrationsprojektet för mätsystemet (Willén m.fl. 2018). Dessa resultat redovisas under 2019–2020.

Slutsatserna kring det mobila mätsystemet för operativ användning redovisades i Willén m.fl. 2018:

1. Mätsystemet ger lovande resultat för diametermätning av gagnvirke, vilket även märks vid jämförelser av diameterfördelning. Jämfört med skördardata överskattas den grundtyevägda medeldiametern (dgv) i mätsystemet med ett RMSE på cirka 0,7–1,0 cm.
2. Demonstrationen har visat ett användbart personburet mätsystem som även finns produktifierat och används i andra branscher.
3. Bearbetningen av det punktmoln som genereras för att skapa träddata är omfattande, vilket gör att det i nuläget inte är ett realtidssystem att montera exempelvis på en skördare.
4. Resultaten öppnar upp för nya tillämpningsområden, bland annat som beslutsstöd vid drivning.
5. Fortsatt forskningsbehov finns i hur data ska insamlas (gångmönster), skapande av träddata från punktmolnen, effektiv databearbetning och utveckling av beslutsstöd.
6. Mätsystemen utvecklas snabbt och kommer att ge än fler möjligheter till effektiv datainsamling på sikt. Detta är därför ett fortsatt viktigt område att följa utvecklingen inom.

Prioriterad vidare forskning med mobila mätsystem för skogsbruket inkluderar möjligheten att kartera trädslag och olika stamskador som är betydelsefullt för att fånga virkesvärdet. En annan fråga är hur man kombinerar mobil laserskanning med andra data som kommer att finnas från flygburna sensorer. En ytterligare väsentlig forskningsinsats är att utvärdera tillförlitligheten av den, av mätsystemet, karterade markmodellen för användning i automatiserad terrängkörning.

Referenser

- Barth, A., Sonesson, J., Larsson, H., Engström, P., Rydell, J., Holmgren, J., Olofsson, K., Forsman, M. & Thor, M. 2012. Beståndsmätning med mobila sensorer i skogsbruket. Arbetsrapport 773, Skogforsk.
- Bosse, M., Zlot, R. & P. Flick. 2012. "Zebedee: Design of a Spring-Mounted 3-D Range Sensor with Application to Mobile Mapping." *Robotics, IEEE Transactions on* 28 (5):1104-19. doi: 10.1109/TRO.2012.2200990.
- Emilsson, E. & Rydell, J. CHAMELEON on fire – thermal infrared indoor positioning. IEEE/ION Position Location and Navigation Symposium (PLANS), USA, 2014.
- Engström, P. & Larsson, H. New Sensor Technology on Forest Harvester. SSBA Symposium, KTH, Stockholm, 2012
- Hannrup, B. Bhuiyan, N. & Möller, J. J. 2015. Rikstäckande utvärdering av ett system för automatiserad gallringsuppföljning. Arbetsrapport 857. Skogforsk.
- Hannrup, B. Bhuiyan, N. & Möller, J. J. 2011. Utvärdering av ett system för beräkning och återföring av skördarbaserad information till skogliga register och planerings-system. Arbetsrapport 757. Skogforsk, Uppsala, 71 s.
- Holmgren, J., Tulldahl, M., Nordlöf, J., Nyström, M., Olofsson, K., Rydell, J. & Willén, E. 2017. Estimation of tree position and stem diameter using simultaneous localization and mapping with data from a backpack-mounted laser scanner. Abstract to ISPRS conference Frontiers in Spectral imaging and 3D Technologies for Geospatial Solutions in Jyväskylä in October 2017.
- Holmgren, J., Tulldahl, M., Nordlöf, J., Willén, E., Olsson, H. 2019. Mobile Laser Scanning for Estimating Tree StemDiameter Using Segmentation and Tree Spine Calibration. *Remote Sensing* 11 2781. doi 10.3390.
- Kukko, A., Kaijaluoto, R., Kaartinen, H., Lehtola, V.V., Jaakkola, A. & Hyyppä, J. 2017. "Graph SLAM correction for single scanner MLS forest data under boreal forest canopy." *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 132:199-209.
- Liang, X., Kukko, A., Hyyppä, J., Lehtomäki, M., Pyörälä, J., Yu, X., Kaartinen, H., Jaakkola, A. & Wang, Y. 2018. "In-situ measurements from mobile platforms: An emerging approach to address the old challenges associated with forest inventories." *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*.
- Lindberg, E., Holmgren, J., Olofsson, K. & Olsson, H. 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.
- Möller, J. J. 2012. Gallringsuppföljning med skördardata. Resultat nr 1, 4 s.
- Olofsson, K., Holmgren, J. & Olsson, H. 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., van Den Heuvel, F. & Vosselmann, G. 2006. Segmentation of point clouds using smoothness constraint. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 (5):248-253.

- Willén, E., Fridh, L., Barth, A., Holmgren, J., Olofsson, K., Bilock, E., Engström, P. & Larsson, H. 2014. Mobilt mätsystem för insamling av träd- och beståndsdata. Skogforsk arbetsrapport 855.
- Willén, E., Söderberg, J., Holmgren, J., Tulldahl, M., Nordlöf, J., Rydell, J. & Öhgren, J. 2018. Demonstration av mobilt mätsystem för insamling av träddata. Arbetsrapport 992-2018. Skogforsk.
- Zhang, Ji & Sanjiv Singh. 2014 "LOAM: Lidar Odometry and Mapping in Real-time." Robotics: Science and Systems, July 12 - July 16, 2014, University of California, Berkeley, USA, Edited by Dieter Fox, Lydia E. Kavraki and Hanna Kurniawati, ISBN 978-0-9923747-0-9, www.roboticsproceedings.org/