

# Slutrapport

**Projektrubrik:** Inventering av skogsbestånd med en kombination av mobila och flygburna sensorer

**Huvudsökande:** Johan Holmgren

**Projektets löptid:** 2019-07-01 – 2023-01-31

## Populärvetenskaplig sammanfattning

Inom projektet har vi utvecklat ett nytt koncept för skogsinventering som använder mobila sensorer tillsammans med 3D-mätningar från flygburen laserskanning för att rationellt kunna skatta variabler som beskriver stamgenskaper inom ett skogsområde, t.ex. ett skogsbestånd eller en skogsfastighet. Detta är viktigt eftersom det i framtiden kommer finnas 3D-mätningar från flygburna sensorer som mäter trädkronorna men som behöver kombineras med direkta mätningar av trädstammar för att kunna skapa modeller som kan användas för att skatta skogliga variabler som t.ex. diameterfördelningar och virkesvolym. Det kommer också finnas mobila sensorer som kan avbilda trädstammarna i 3D samtidigt som en person vandrar genom skogen. Inom projektet har vi utvecklat alla metoder som behövs för att testa det nya inventeringskonceptet.

En av de metoder som utvecklades för inventeringskonceptet detekterar och avgränsar trädkronor i data från flygburen laserskanning. Denna algoritm använder modeller som beskriver trädkronornas densitet och anpassar dessa modeller till data för att beräkna var det finns trädkronor och automatiskt avgränsa trädkronorna. Inom projektet utvecklade vi också en algoritm som kan användas för att detektera träd som växer under större träd, vilket är användbart för flerskiktade skogar. Detta kunde åstadkommas genom att algoritmen söker efter trädkronor i tre dimensioner. Vi har också undersökt hur förmågan att automatiskt detektera träd påverkades av användningen av olika indata, dels flygburen laserskanning som utförs för stora skogsområden från en hög flyghöjd, men också med sensorer som monteras på drönare eller helikopter och skannar mindre områden.

Inom projektet byggdes ett mobilt laserskannersystem som var speciellt designad för skogsinventering. Detta system består av en laserskanner, en rörelsesensor och en minidator. Det är komponenter som kan införskaffas till en relativt låg kostnad. En del av beräkningarna av skoglig information utfördes i realtid på minidatorn under fältinventeringen och datainsamlingen övervakades från en mobiltelefon som var uppkopplad mot minidatorn. Det utvecklade systemet fungerar även vid svåra förhållanden med dåliga satellitsignaler på grund av täta trädkronor. För att uppnå detta användes en rörelsesensor i kombination med data från laserskannern för att först beräkna sensorbanans relativa position, och i nästa steg räknades positionen om ungefärligt i ett globalt system med data från satellitnavigationssystemet. För att sedan korrigera trädpositionerna från den mobila laserskanningen används en algoritm som har utvecklats inom projektet. Denna algoritm matchar ihop trädmonster från den mobila laserskanningen med trädmonster från algoritmen som detekterar träd i data från den flygburna laserskanningen. Som ett sista steg för inventeringskonceptet används de kopplade träden för att träna ett algoritmsystem som skattar stamgenskaper för alla träd som har mätningar från den flygburna laserskanningen.

## Resultat

Mobila laserskannersystem skulle kunna effektivisera skogsinventeringar eftersom de inte är begränsade till provytor.

För att dessa system ska kunna användas i praktiskt skogsbruk behövs det metoder för att räkna om trädmätningar på enskilda-trädnivå till skattningar per area, t.ex. volym per hektar. Inom detta projekt är det huvudsakliga resultatet ett nytt koncept för skogsinventering. För denna nya skogsinventering används inte några provytor och alla mätningar utförs automatiskt. En person bär med sig en mobil laserskanner och går genom skogen samtidigt som trädstammar i närheten detekteras och mäts automatiskt och dessa mätningar kopplas automatiskt till trädkronor som har skannats med flygburen laserskanning. En annan algoritm skattar sedan stam egenskaper för samtliga träd i beståndet, även för områden som inte mäts med den mobila laserskannern. Detta är möjligt genom att använda maskininlärning för att skatta trädstammarnas egenskaper med hjälp av den flygburna laserskanningen av trädkronorna, där de träd som har kopplingar mellan mobil och flygburen laserskanning används som referens. För utvärdering användes stora provytor med 40 m radie, inom vilka träden hade mätningar av positionen och stamdiametern. Dessa provytor var därför användbara för att utvärdera skattningar av diameterfördelningar och grundytan [ $m^2/ha$ ]. För en utvärdering vid testområdet Remningstorp skattades grundytan med ett relativt medelfel ("root-mean-square-error", RMSE) på 6 % med kombinationen av mobil och flygburen laserskanningen, medan motsvarande fel var 9 % om enbart mobil laserskanning användes. Dessa fel skulle troligen vara lägre om laserskanningen och den manuella fältinventeringen som användes för utvärdering hade utförts vid samma tidpunkt, istället för med en tidsskillnad på en vegetationssäsong. Det ska även tilläggas att för utvärderingen användes homogena mindre skogsområden (0,5 ha) och att en större skillnad mellan metoderna kan förväntas inom större och mer heterogena bestånd. Samma metod som kombinerar mobil och flygburen laserskanning kan även användas för skattningar på t.ex. fastighetsnivå med enbart ett mindre antal inventeringslinjer som genomkorsar området. En annan fördel med att använda både mobil och flygburen laserskanning är att trädhöjderna kan beräknas med hög noggrannhet från den flygburna laserskanningen. Det innebär att virkesvolymen kan bestämmas bra för de träd som har kopplingar mellan markbaserad och flygburen laserskanningen, eftersom man där har direkta mätningar av både stamdiameter och trädhöjd.

Andra värdefulla resultat kommer från arbetet med att utveckla och utvärdera algoritmer för att detektera och avgränsa trädkronor i 3D-data från flygburen laserskanning. Två olika segmenteringsalgoritmer testades. Den första är mer beräkningseffektiv men segmenterar träden enbart i två dimensioner, vilket resulterar i tvådimensionella polygoner som enkelt kan användas i geografiska informationssystem. Den andra är mindre beräkningseffektiv men segmenterar träden i tre dimensioner, vilket innebär att den även upptäcker mindre träd som växer under större träd. De olika segmenteringsalgoritmerna utvärderades med laserdata insamlat från två olika flyghöjder: 1450 m med flygplan och 150 m med helikopter. När den tvådimensionella metoden användes kunde 87 % av träden upptäckas från den högre flyghöjden och denna siffra ökade till 91 % om data från den lägre flyghöjden användes. När den tredimensionella metoden användes kunde 92 % av träden upptäckas från den högre flyghöjden och denna siffra ökade till 99 % om data från den lägre flyghöjden användes. För alla testade fall motsvarade träden som inte kunde detekteras upp till 5 % av den totala stamvolymen på provytorna. Det ska dock nämnas att den maskininlärningsmetod som används för att skatta skogliga variabler med en kombination av mobil och flygburen laserskanning kompenserar för en underskattning som annars uppkommer om inte samtliga träd kan detekteras med flygburen laserskanning.

För att inventeringskonceptet ska fungera behövs en algoritm för att automatiskt koppla ihop trädmätningar från mobil och flygburen laserskanning. En sådan algoritm utvecklades i projektet och testades först med hjälp av simuleringar innan den sedan användes för inventeringsmetoden.

Denna algoritm använder tidsintervall som är tillräckligt stora för att det ska finnas unika trädpositionsmonster men tillräckligt små för att undvika drift i positioneringen. För att koppla ihop träden används trädpositionsmonster i kombination med jämförelse av trädstorlek, vilket minskar risken för felkopplade träd.

För att demonstrera inventeringskonceptet byggdes en mobil laserskanner med billiga komponenter. Detta system byggdes för att passa skogsinventering. Det är enkelt att använda. Inventeraren kopplar upp systemet mot sin mobiltelefon och starta och stoppar systemet. Det fungerar även i tät skog där det inte finns bra mottagning av signaler från navigations satelliter.

## Målbeskrivning

Projektet hade som mål att (1) demonstrera ett system för mobil laserskanning, (2) utveckla metoder för att beräkna trädvariabler, (3) utveckla metod för länkning till flygburna mätningar, (4) skatta diameterfördelningar. Projektet slut flyttades från 2021-06-30 till 2023-01-31. Vi anger därför tider i originalplan respektive reviderad plan för aktiviteter som beskrivs i den följande texten. Budgeten avviker inte från den ursprungliga eftersom samma arbetstid fördelades ut över en längre projektperiod.

A1: Sätta samman mobilt system (originalplan: Q3-Q4, 2019)

Detta arbete är slutfört. Vi använde en personmånad för design och projektledning och vi har köpt tjänsten att sätta samman hårdvaran i systemet. Systemet består av en laserskanner, rörelsesensor och en minidator.

A2: Utveckling av program för relativ positionering (originalplan Q1, 2020; reviderad plan: Q3 2020-Q2 2021)

Detta arbete är slutfört. Denna del består av arbete att beräkna en initial sensorbana med enbart stöd av en enkel rörelsesensor och laserskannerdata (SLAM-metod). De första testerna av systemet i fält utfördes under hösten 2020 i en skog utanför Linköping. Utvecklingen var klar Q2 2021 men validering av systemet utfördes vid testområdet Remningstorp först under hösten 2021 på grund av pandemin.

A3: Utveckling av program för global positionering (originalplan Q2, 2020; reviderad plan Q1-Q3 2021)

Arbetet är slutfört. Det har resulterat i en dynamisk matchningsmetod som binder samman trädmonster från den relativa positioneringen av mobila laserskannerdata och trädpositionsmonster som har uppmätts med data från flygburen laserskanning. På detta sätt är det möjligt att upprätta en länk på trädnivå mellan mätningar från marken med det mobila systemet och flygburen laserskanning.

A4: Beräkning av trädvariabler (originalplan Q3, 2020; reviderad plan: Q2-Q4 2021)

Vi publicerade redan 2019 en artikel som beskriver en algoritm för att beräkna stamdiametrar från mobil laserskanning. Denna metod har utvärderats ytterligare under 2021 och har sedan använts i det fortsatta arbetet.

A5: Utveckling av program för skattning av trädlistor inom bestånd (originalplan: Q4, 2020; reviderad plan: Q3 2021-Q2 2022)

Arbetet är slutfört. Vi har utvärderat inventeringsmetoden som använder en kombination av mobil och flygburen laserskanning. De skattade trädlistorna utvärderades genom att jämföra resultaten med fältmätningar inom 0,5 ha totalklavade provytor/bestånd. Vi har verifierat att mätningarna av stamdiameter har liknande noggrannhet jämfört med den tidigare version av mobil laserskanner som fanns vid projektstart.

Skillnaden är att kostnaden för komponenterna är betydligt lägre i det nya systemet och att systemet är enkelt att använda för en vanlig skogsinventerare.

A6: Rapportering (originalplan: Q1-Q2, 2021; reviderad plan: Q3-Q4, 2022)

Vi har under 2022 presenterat resultaten för skogsbruket vid konferenser/seminarier och skrivit vetenskapliga artiklar.

## Kommunikation och nyttiggörande av resultat

Vi har publicerat algoritmen som används för att detektera enskilda träd i data från flygburen laserskanning. Artikeln finns att läsa på Internet:

”Holmgren J., Lindberg E., Olofsson K. & Persson H.J. (2022) Tree crown segmentation in three dimensions using density models derived from airborne laser scanning, *International Journal of Remote Sensing*, 43:1, 299-329. <https://doi.org/10.1080/01431161.2021.2018149>”

Vi har publicerat en algoritm för att dynamiskt länka samman träd som detekteras i data från det mobila systemet med träd som detekteras i data från flygburen laserskanning. Artikeln med tillhörande programkod finns att läsa på Internet:

”Olofsson K. & Holmgren J. (2022). Co-registration of single tree maps and data captured by a moving sensor using stem diameter weighted linking. *Silva Fennica* vol. 56 no. 3, article ID 10712. <https://doi.org/10.14214/sf.10712>”

Vi har skrivit ett manuskript som beskriver det nya inventeringskonceptet som har utvecklats i projektet och planerar att publicera detta manuskript i en tidskrift med ”open access” så att alla kan läsa det på Internet.

Under 2022 presenterades resultaten från projektet vid fyra konferenser/seminarier med deltagande skogsägare, skogsföretag, konsultföretag och forskare:

- Möte i den digitala skogen, 19 april, plats: Vreta kluster, Linköping
- Mistra Digital Forest programkonferens, 18 maj, plats: SLU, Umeå
- Örnkoll: Ny skogsforskning för södra Sverige, 4 oktober, plats: LNU, Växjö
- Mistra Digital Forest programkonferens, 23 november, plats: Fotografiska, Stockholm

Det utvecklade systemet användes av en professionell skogsinventerare som enbart behövde en kort utbildning/introduktion innan han kunde använda det på egen hand. Vi planerar nu att tillsammans med skogsmaskintillverkare fortsätta utvecklingen av metoder och undersöka hur mobil laserskanning kan användas för en bättre apteringsoptimering. Det finns även möjlighet att fortsätta utvecklingen av personburna system som kan ersätta klaven vid skogsinventeringar så att också mindre skogsägare kan få bra information om den egna skogen. Vi förväntar oss att hårdvaran kommer att bli bättre och billigare under de närmaste åren. Små system som avbildar omgivningen i tre dimensioner kommer troligen bli tillgängliga i framtiden för många personer i skogsbruket. Dessutom förväntar vi oss att dessa system skapar avståndsbilder med hög upplösning. Det innebär att de metoder som har utvecklats i detta projekt kan använda bättre data, vilket skapar högre precision och säkrare positionering.

## Bilagor

Bilbilaga -MLS -ALS