



Höjdmätning av träd med olika drönarsystem

Height measurement of trees with different drone systems



Foto: August Nilsson

August Nilsson

Sveriges Lantbruksuniversitet
Institutionen för skogens ekologi och skötsel
Kandidatarbete i skogsvetenskap, 15 hp,
Handledare: Jonas Bohlin, SLU,
Institutionen för skoglig resurshushållning

Program: Jägmästarprogrammet

Kurs:EX0813 Nivå:G2E

Umeå 2018



Kandidatarbeten i Skogsvetenskap

Fakulteten för skogsvetenskap,
Sveriges lantbruksuniversitet

Enhet/Unit	Institutionen för skogens ekologi och skötsel Department of Forest Ecology and Management
Författare/Author	August Nilsson
Titel, Sv	Höjdmätning av träd med olika drönarsystem
Titel, Eng	<i>Height measurement of trees with different drone systems</i>
Nyckelord/ Keywords	<i>SfM, UAV, fjärranalys, punktmoln, skog</i> <i>SfM, UAV, remote sensing, point cloud, forest</i>
Handledare/Supervisor	<i>Jonas Bohlin, Institutionen för skoglig resurshushållning</i> <i>Department of Forest Resource Management</i>
Examinator/Examiner	Tommy Mörling Institutionen för skogens ekologi och skötsel/ Department of Forest Ecology and Management
Kurstitel/Course	Kandidatarbete i skogsvetenskap Bachelor Degree in Forest Science
Kurskod	EX0813
Program	Jägmästarprogrammet
Omfattning på arbetet/	15 hp
Nivå och fördjupning på arbetet	G2E
Utgivningsort	Umeå
Seire	Kandidatarbeten i skogsvetenskap
Utgivningsår	2018

FÖRORD

Detta är ett kandidatarbete på Jägmästarprogrammet vid Sveriges lantbruksuniversitet Umeå. Arbetet skrevs under våren 2018 och omfattar 15 högskolepoäng.

Tack till min handledare Jonas Bohlin som har varit till stor hjälp. Vill också tacka Erik Willén på Skogforsk för tillåtelsen att använda fältinventerade data för området.

SAMMANFATTNING

Syftet med den här studien var att undersöka höjdmätning av träd med olika drönarsystem genom att använda metoden structure from motion (SfM). Detta gjordes för att se om det fanns skillnader mellan drönarsystemen i höjdmätningens noggrannhet och andel markyta som registrerats, samt om höjdmätningens resultat blev tillräckligt noggrant för att det skulle kunna användas praktiskt inom skogsbruket.

Försökslokalen var uppdelad på två områden som båda bestod av en blandskog med gran och tall. I studien jämfördes fyra olika drönarsystem. Utifrån bilder tagna av drönarna skapades punktmoln med metoden SfM. Från punktmolnen skapades en markmodell som sedan användes för att mäta trädens höjd. De uppmätta trädhöjderna jämfördes sedan genom att bias och root mean square error (RMSE) beräknades mot de fältinventerade trädhöjderna.

Resultatet blev att det bästa drönarsystemet hade en medelhöjd som skiljde 0,6 dm från den fältinventerade medelhöjden och ett relativt RMSE på 4,6 procent. Det fanns dock variationer mellan drönarsystemen. Relativ bias varierade från -9,8 till 13,1 procent, vilket tyder på att höjderna blev både under- och överskattade. Relativt RMSE av medelhöjden varierade från 4,6 till 13,6 procent. Ett av systemen hade en lägre andel markyta registrerad än de övriga systemen, det påverkade dock inte höjdmätningen negativt.

De två bästa drönarsystemen hade ett lägre medelfel för höjdmätningen än skogliga grunddata. Det tyder på att drönarna lämpar sig väl för att mäta trädhöjder inom skogsbruket. Det fanns variationer mellan systemen men det kan inte uteslutas att de beror på slumpmässiga fel eftersom ett litet urval gjordes av antalet träd i mätningen.

Nyckelord: SfM, UAV, fjärranalys, punktmoln, skog

SUMMARY

The purpose of this study was to compare measurements of tree heights using different drone systems with the method structure from motion (SfM). The goal was to see if there were differences between the different drone systems in height measurement accuracy and the proportion of terrain surface recorded, and whether the tree height measurement results were sufficiently accurate to be useful in forestry.

The test area consisted of a mixed forest with spruce and pine. The study compared four different drone systems. Based on images taken by the drones, point clouds were created with the method SfM. A digital terrain model was created from the point cloud. Tree heights were measured from the drone systems and then compared to manually measured tree heights. Bias and root mean square error (RMSE) were calculated.

The best drone system had an average height of 0.6 dm from the average manually measured tree heights and a relative RMSE of 4.6 percent. However, there were variations between drone systems. Relative bias ranged from -9.8 to 13.1 percent, indicating that heights were both underestimated and overestimated. Relative RMSE of mean height ranged from 4.6 to 13.6 percent. One system had a lower proportion of terrain surface registered than the other systems, but it did not affect the altitude measurement.

The two best drone systems had a lower average error for the altitude measurement than Swedish skogliga grunddata. This indicates that the drones are suitable for measuring tree heights in forestry. There were variations between the systems, but it cannot be excluded that they are due to random errors because a small selection was made of the number of trees in the measurement.

Keywords: SfM, UAV, remote sensing, point cloud, forest

INLEDNING

Fjärranalys är ett begrepp som beskriver arbetsmetoder för att samla in data på avstånd med hjälp av olika tekniker, de kan vara exempelvis användningen av satelliter och flygplan (Nämnden för skoglig fjärranalys, 1993). Skogsbruket har under en lång tid använt sig av flygbilder för att skaffa sig information om skogen vid exempelvis skogsbruksplanering (Nordqvist m.fl., 2013). Lantmäteriet har fotograferat stora delar av landet ända sedan 1930-talet och det finns därigenom stora arkiv med gamla flygbilder över skogsmark (Lantmäteriet, 2018). Att använda sig av fjärranalys inom skogsbruket är alltså inget nytt. Idag används skogliga grunddata i stor utsträckning, det innehåller data om skogens skattade höjd och volym med mera som är utvecklat från den nationella skanningen och riksskogstaxeringens provytor. En fördel med skogliga grunddata är att det är gratis och lätt att komma åt som privatperson (Nilsson et al., 2017).

Drönare är vanligt samlingsnamn för olika typer av obemannade flygande farkoster som går under benämningen Unmanned Aerial Vehicles (UAV). Drönare härstammar från användningsområden inom det militära men har på den senare tiden blivit mer anpassad för civilt bruk och en mängd av olika modeller har utvecklats med olika storlekar och egenskaper (Colomina & Molina, 2014). Användningen av drönare inom fjärranalys känns mer och mer aktuellt eftersom utvecklingstrenden av drönarsystem för användning inom fjärranalys sker snabbare nu än utvecklingstrenden inom samma område av satellitbaserade system och bemannade flygplan (Tang & Shao, 2015).

Användandet av drönare inom skogsbruket kan innebära flera fördelar. Drönare är billigare gentemot laserskanningstekniker för att bestämma höjd på träden så länge det inte är stora områden som ska undersökas. De är också flexibla att använda och genererar data med en hög noggrannhet (Banu et al., 2016). Genom att samla in bilder av skogen med hjälp av drönare kan punktmoln generas. Tekniken bygger på Structure from Motion (SfM) som är en metod som grundar sig på stereofotogrammetri som matchar överlappade bilder för att bygga en modell i 3-D. En egenskap som utmärker SfM-tekniken är att den kan skapa en geometrisk modell genom att matcha egenskaper mellan ett flertal bilder utan information om enskilda punkters geografiska position. Punkttätheten i ett punktmoln som skapats med hjälp av SfM-tekniken kan uppnå hela 1000 punkter/m² beroende av bildinställningar (Westoby et al., 2012). Det kan jämföras med punkttätheten i skogliga grunddata som har ca 0,5–1 punkter/m² (Nilsson et al., 2017). För skogsbruket kan det därför vara av intresse att använda sig av drönarsystem för att analysera skogen med en högre punkttäthet då det kan ge mer detaljerad information än skogliga grunddata.

För att mäta höjd på enskilda träd krävs att avståndet mellan marken och trädkronans topp är känd. För att mätningen ska bli noggrann behövs därför en bra markmodell. Det kan vara problematiskt att använda enbart flygbilder för att skapa en markmodell eftersom att marken ofta

täcks av träden. Om området har laserskannats kan markmodellerna genererade från laserskanningen ofta användas eftersom laserstrålarna når ner till marken betydligt bättre än i flygbilderna (Nordqvist m.fl., 2013). Om det inte finns en tillgång till en markmodell kan det innebära problem för höjdmätning av träd med metoder som SfM. En studie (Wallace et al, 2016) kom fram till att metoden SfM genererade sämre markmodeller än metoden ALS när skogen var tät. Det resulterade också i att trädhöjderna blev mindre exakta på grund av bristerna i markmodellen.

En tidigare studie undersökte skogliga variabler på provytenivå med metoden SfM med bilder tagna från drönare. De skapade en markmodell över området utifrån laserdata som skannats med flygplan. Markmodellen från laserskanningen användes som markmodell för punktmolnen skapade från drönarna. Studiens resultat visade att den grundtyvägd medelhöjden och den dominerade trädhöjden på provytenivå hade ett relativt RMSE på 13,3 procent respektive 3,5 procent (Puliti et al., 2015). En liknande studie använde också en markmodell från laserskanning, men de använde flygbilder istället för bilder från drönare för att skapa punktmoln. De beräknade medelhöjden för träd på provytenivå och fick ett relativt RMSE på 14 procent (White et al., 2015). Inom skogsbruket används skogliga grunddata och det har ett relativt RMSE på ca 5–10 procent för grundtyvägd medelhöjd i Sverige (Nilsson et al., 2017). Om drönare ska användas av skogsägare för att mäta trädhöjder förväntas troligtvis en noggrannhet liknande skogliga grunddata. För skogsbruket och enskilda markägare kan det därför vara intressant att undersöka hur bra höjdmätning blir av skog från olika drönarsystem, samt om kvaliteten av höjdmätningen skiljer sig mellan olika drönare.

Syfte

Målet med denna studie är att jämföra höjdmätning av träd med tekniken SfM för olika drönarsystem. Detta görs genom att jämföra fyra olika drönarsystem för att se vilken av dem som genererar den mest kvalitativa höjdmätningen av enskilda träd. Det är även intressant att undersöka hur väl markytan registreras av de olika drönarsystemen, för möjligheten att skapa en bra markmodell. Syftet kan därför delas upp i två frågeställningar:

- Hur exakt blir höjdmätningen av träden gentemot de fältinventerade trädhöjderna för de olika drönarsystemen?
- Hur skiljer sig punktmolnen mellan drönarsystem i egenskap att registrera markytan?

En hypotes utifrån tidigare studier (Puliti et al, 2015) och (White et al, 2015) är att höjdmätningen bör ha ett relativt RMSE på runt 5–15 procent. Höjdmätningens kvalitet bör också bero på hur väl markytan har registrerats.

MATERIAL OCH METODER

Studielokal och datainsamling

Data till studien bestod av bilder tagna från fyra olika drönarsystem i ett område strax utanför Mickelsträsk i Västerbotten. Två områden undersöktes, norra respektive södra området (tabell 1). Båda områdena består av en blandskog av gran och tall. Skogen innehåller både tätare partier och områden med luckor. I områdena fanns det också tillgång till fältdata, de bestod av uppmätta trädhöjder i fält för 13 olika träd på respektive område.

Tabell 1. Sammanställning av drönarsystemens specifikationer och vilka områden de flög över
Table 1. Compilation of the drone systems specifications and the areas they flew over

Drönarsystem	Kamera	Upplösning	Område
3DR solo, Parrot Sequoia	Parrot Sequoia	1280 x 960	Södra
3DR solo, Sony a5100	Sony a5100	6000 x 4000	Norra
DJI Phantom 4 Pro	Original	5472 x 3648	Norra & Södra
DJI Mavic Pro	Original	4000 x 3000	Norra & Södra

Fyra olika drönarsystem användes för att samla in data (Figur 1). Tre olika typer av drönare användes, DJI Phantom 4 Pro, DJI Mavic Pro och 3DR Solo. Två olika kameror användes för 3DR Solo, en vanlig systemkamera Sony a5100 och en multispektral kamera Parrot Sequoia. Två av drönarsystemen flög enbart över ett av områdena. Drönarna flög i parallella stråk med en överlappningsgrad på 90 procent mellan bilderna och stråken. Drönarna flög med en låg hastighet på ca 5 m/s.



Figur 1. Fyra stycken olika drönarsystem användes för att samla in bilder. Längst fram: DJI Mavic Pro, i mitten DJI Phantom 4 Pro och två stycken 3DR Solo på sidorna. Foto: Ljungbergslaboratoriet, 2017.

Figure 1. Four different drone systems were used to collect images. At the front: DJI Mavic Pro, in the center DJI Phantom 4 Pro and two 3DR Solo on the sides. Photo: Ljungbergslaboratoriet 2017.

Databearbetning

De insamlade bilderna från drönarna användes i programmet Agisoft Photoscan pro för att generera punktmoln för de två områdena. Alla drönarsystem förutom den med kameran Sony a5100 hade inbyggd GPS så de bilderna fick en automatisk georeferering. För att georeferera punktmolnet med Sony a5100 användes funktionen alignment chunks i agisoft. Funktionen matchar punkter mellan flera punktmoln för att i det här fallet estimerar en geografisk position (Agisoft, 2016). En del punktmoln hade tillgång till markpunkter med noggranna koordinaterna som placerats med GPS, de användes för att öka noggrannheten på georeferering av punktmolnen.

Med hjälp av programmet Quick Terrain Modeler togs tvärsnittprofiler ut från punktmolnen för att kunna studera hur väl markytan hade registrerats. Agisoft har en funktion för att automatiskt klassificera punkter. Genom att använda sig av punkter som klassificerats som mark kan en modell byggas som beskriver marknivån. En Digital Terrain Model (DTM) skapades utifrån punktmolnen med markpunkter som sedan kunde exporteras. För att få heltäckande markmodeller även där skogen var tät användes en cellstorlek på 50 meter.

Följande arbetsgång och inställningarna användes i Agisoft Photoscan pro för att generera punktmoln och markmodell. Samma inställningar användes för alla punktmoln för att jämförelsen inte skulle påverkas av olika inställningar i programmet.

- 1) Importera bilderna från drönarsystemen i separata chunks.
- 2) Align photos:
 - a) pair selection & quality: high.
- 3) Importera GCP och kalibrera koordinaterna.
- 4) Skapa punktmoln (dense cloud):
 - a) quality: highest & depth filtering modes: aggressive.
- 5) Klassificera markpunkter:
 - a) cellsize: 50 m & max distance: 1 m.
- 6) Bygg markmodell – build DTM with ground points from dense cloud.
- 7) Exportera markmodellen som en DTM-fil.

För att mäta höjd på enskilda träd användes programmet FUSION som är ett gratisprogram som är speciellt utvecklat för att undersöka laserdata. Genom att använda DTM-filen kunde punktmolnens höjd normaliseras så att trädens höjd motsvarar höjden över marken istället för havet. Punktmolnen delades in i celler av storleken 0,25 x 0,25 m för att kunna urskilja enskilda träd och därefter beräknades höjdmetriker. Funktionen GridMetrics beräknar en serie av metriker som exempelvis Elev Maximum som motsvarar höjden på den högsta punkten inom cellen (McGaughey, 2018). På det sättet fås höjden av den högsta punkten uppe i trädkronan, alltså trädets höjd. Ett urval av träd undersöktes som också hade fältinventerats för att se skillnaderna i höjdmätningen.

För att analysera jämförelsen i höjdmätningen beräknades bias och RMSE. Bias är ett mått på det systematiska felet och beräknades med ekvation (1), där n är antalet träd, Dh_i är den uppmätta höjden med drönaren och Fh_i är den fältmätta höjden för trädet i inom mätningen. Relativ bias beräknades med ekvation (2) där \bar{Dh} är medelvärdet av höjden uppmätt för drönaren. RMSE beskriver spridningen på avvikelserna, RMSE och relativt RMSE beräknades med ekvationerna (3) och (4).

$$bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Dh_i - Fh_i) \quad (1)$$

$$bias\% = \frac{bias}{F\bar{h}} \times 100 \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Dh_i - Fh_i)^2} \quad (3)$$

$$RMSE\% = \frac{RMSE}{F\bar{h}} \times 100 \quad (4)$$

RESULTAT

Punktmolnen skapade från de olika drönarsystemen användes för att mäta höjden på enskilda träd och jämföra avvikelsen mot den fältinventerade höjden. Medelhöjden från fältinventeringen var för det södra området 204,3 dm och för det norra 179,4 dm. Resultatet av höjdmätningen varierade en del för de olika drönarsystemen. Medelhöjden för det södra området gick från 186,1 dm till 235,2 dm, det vill säga en relativt stor skillnad på ca 49,1 dm mellan högsta och lägsta höjderna. Medelhöjden för det norra området skilde sig däremot mindre, där var skillnaden 16,1 dm från den högsta till den lägsta uppmätta medelhöjden (tabell 2).

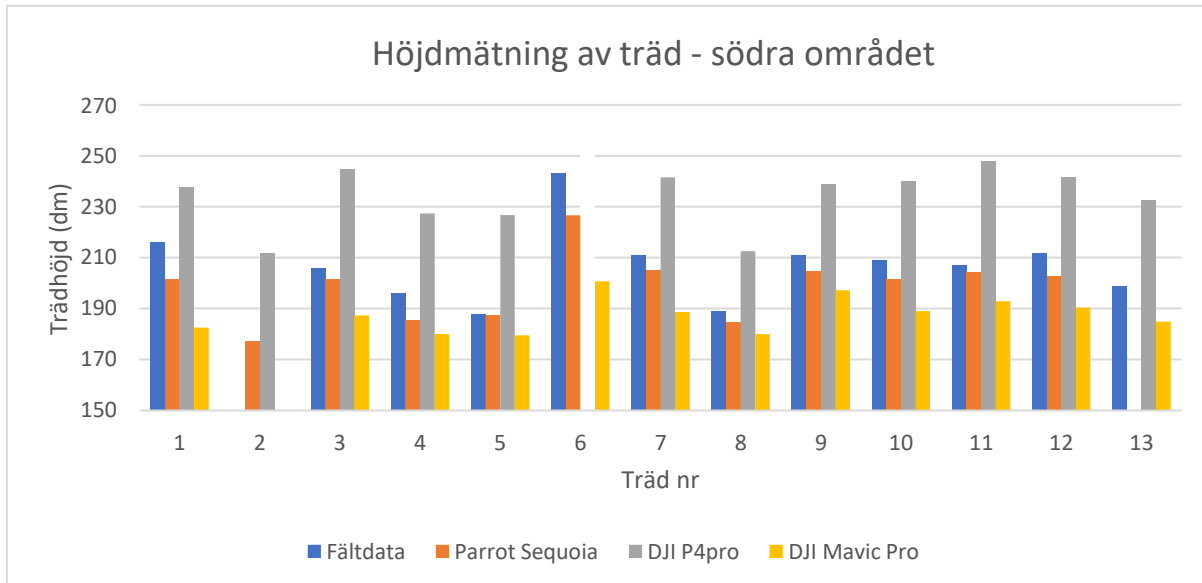
För det södra området var drönarsystemet Parrot Sequoia bäst med en medelhöjd som var -6,6 dm från fältinventeringen. Systemet hade också lägst bias och RMSE. För det norra området var drönarsystemet Sony 5100a bäst med en medelhöjd som bara skilde 0,6 dm från fältinventeringen och med lägst bias och RMSE (tabell 2). Drönarsystemens höjdmätning hade både negativa och positiva bias, vilket resulterade att trädhöjderna blev både överskattade och underskattade.

Tabell 2. Resultatet för höjdmätningen av träden för de olika drönarsystemen. För båda områdena beräknades medelhöjd, samt bias, RMSE, relativ bias och relativ RMSE mot den fältmätta medelhöjden

Table 2. The result of the altitude measurement of the trees for the different drone systems. For both areas, mean height, bias, RMSE, relative bias and relative RMSE were calculated against the manually measured mean height

Södra området	Medelhöjd (dm)	Bias (dm)	Bias%	RMSE (dm)	RMSE%
DJI Phantom 4 Pro	235,2	30,9	13,1	32,0	13,6
DJI Mavic Pro	186,1	-18,2	-9,8	20,8	11,2
3DR Solo, Parrot Sequoia	197,7	-6,6	-3,3	9,0	4,6
Norra området					
DJI Phantom 4 Pro	173,5	-5,9	-3,4	11,9	6,9
DJI Mavic Pro	163,9	-15,5	-9,4	18,0	11,0
3DR Solo, Sony 5100a	180,0	0,004	0,002	8,7	4,9

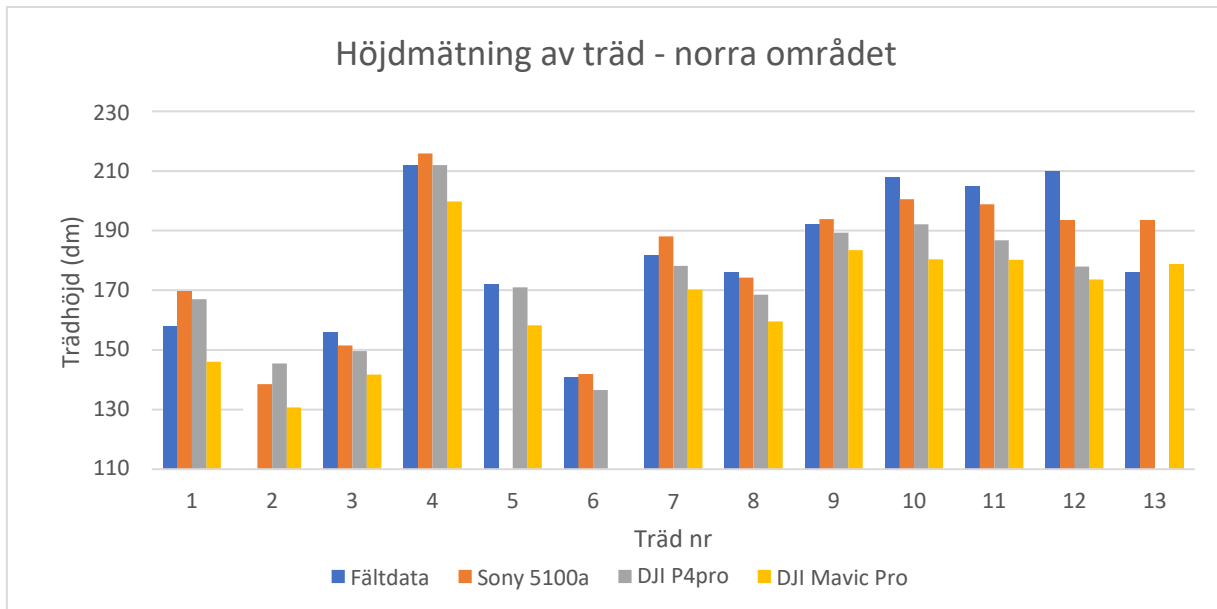
Variationen av de uppmätta höjderna för respektive träd skilde sig mellan drönarsystemen. DJI Phantom 4 Pro hade en stor bias på 30,9 (tabell 2) som ledde till en överskattning av trädhöjderna, vilket återspeglar sig i diagrammet för höjdmätningen för enskilda träd (figur 2).



Figur 2. En sammanställning av de uppmätta trädhöjderna för det södra området. Höjder för respektive träd för de olika drönarsystemen och fältdata.

Figure 2. A compilation of the measured tree heights for the southern area. Heights for respective trees for the different drone systems and field data.

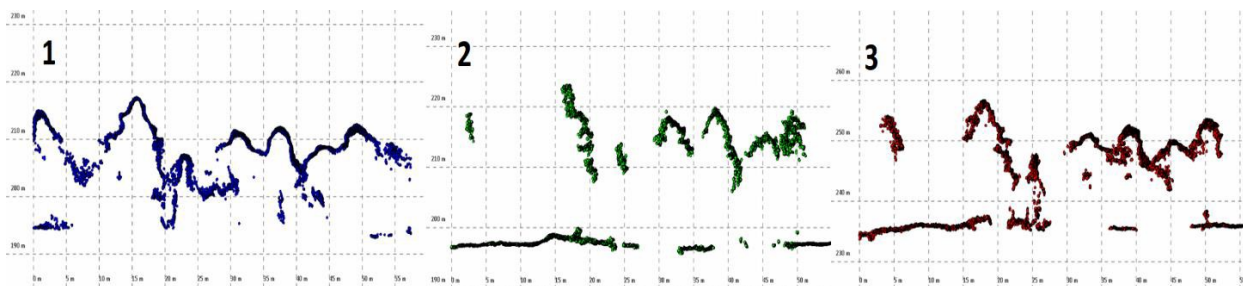
För det norra området hade drönarsystemen generellt en mindre variation och en lägre bias än det södra området (tabell 2). Höjden för träden nr 10–12 i det norra området blev underskattad jämfört mot de fältinventerade trädhöjderna för samtliga drönarsystem (figur 3). Träd nummer fem saknades för drönarsystemet med kameran Sony 5100a eftersom datapunkter saknades där trädet stod. Båda DJI-systemen hade en större avvikelse mot den fältinventerade höjden jämfört med 3DR Solo-system Parrot Sequoia och Sony 5100a.



Figur 3. En sammanställning av de uppmätta trädhöjderna för det norra området. Höjder för respektive träd för de olika drönarsystemen och fältdata.

Figure 3. A compilation of the measured tree heights for the northern area. Heights for respective trees for the different drone systems and field data.

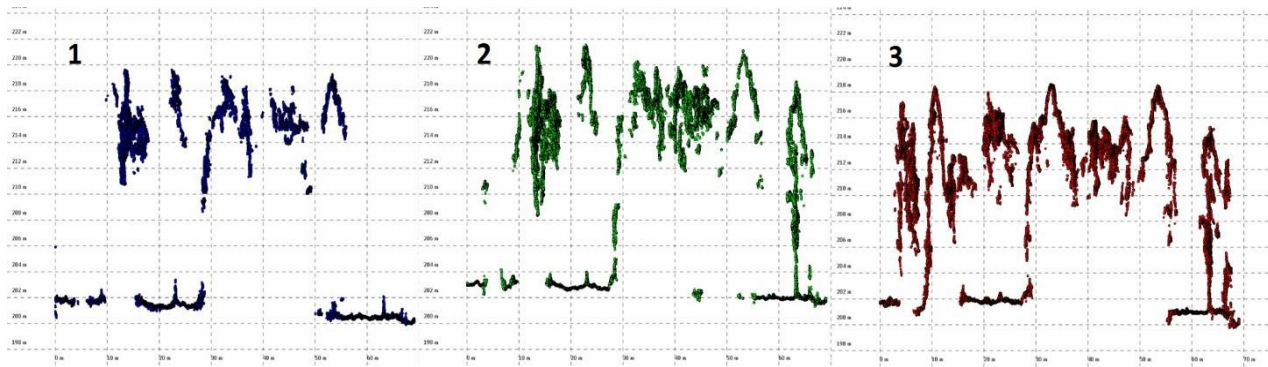
Tvärsnittsprofiler från punktmolnen över det södra området visade att det fanns skillnader mellan drönarsystemen i antalet punkter som registrerades som mark. Drönarsystemet Parrot Sequoia hade få markpunkter, de flesta punkterna registrerades uppe i trädkronorna. Båda DJI-systemen hade en högre andel punkter som träffade markytan (figur 4).



Figur 4. Profiler av punktmolnen från det södra området. Parrot Sequoia (1), DJI Mavic Pro (2) och DJI Phantom 4 Pro (3).

Figure 4. Profiles of the point clouds from the southern area. Parrot Sequoia (1), DJI Mavic Pro (2) och DJI Phantom 4 Pro (3).

Tvärsnittsprofilerna över det norra området visade att det inte var stora skillnader mellan drönarsystemen i andel markyta som hade registrerats. Drönarsystemet Sony 5100a hade något färre registrerade träd än DJI-systemen (figur 5), vilket kan förklara varför det saknades data för träd nr 5.



Figur 5. Profiler av punktmolnen från det norra området. Sony 5100a (1), DJI Mavic Pro (2) och DJI Phantom 4 Pro (3).

Figure 5. Profiles of the point clouds from the northern area. Parrot Sequoia (1), DJI Mavic Pro (2) and DJI Phantom 4 Pro (3).

DISKUSSION

Studien gick ut på att mäta trädhöjder med olika drönarsystem för att undersöka skillnaderna mot fältinventerade träd. Resultatet visade att systemet med kameran Sony 5100a uppskattade trädhöjderna bäst med en medelhöjd som skilde bara 0,6 dm från fältinventeringen. Systemet hade dessutom en låg bias och ett relativt RMSE på 4,9 procent. Detta är en bra uppskattning av trädhöjden och bättre än förväntat utifrån hypotesen att relativt RMSE skulle ligga på ca 5–15 procent. Drönarsystemet Parrot Sequoia hade också ett bra relativt RMSE på 4,6 procent. Båda systemen hade bra höjdmätningar om man jämför mot tidigare studier som (Puliti et al., 2015) och (White et al., 2015). De studierna har gjort undersökningen på provytanivå med den här studien jämför på enskilda träd. Provytanivå bör ge ett lägre relativt RMSE än enskilda träd eftersom det är ett medelvärde över flera träd. Höjdmätningen av drönarsystemen står sig också bra mot skogliga grunddata som har ett relativt RMSE på ca 5–10 procent för höjdmätning i Sverige. Det här resultatet tyder på att drönarna är användbara som hjälpmedel för exempelvis höjdmätning av träd inom skogsbruket. Dock fanns det stora variationer mellan drönarsystemen som kan tyda på att höjdmätningens noggrannhet kan variera.

För det södra området var variationen störst då det skilde nästan 5 m mellan den högsta och lägsta medelhöjden. Vad variationen berodde på är svårt att avgöra men den påverkades troligtvis av bias, eftersom relativ bias varierade mellan -9,8 till 13,1 procent. Totalt på båda områdena låg relativt RMSE mellan 4,6 till 13,6 procent vilket ändå är bra i jämförelse med min hypotes. De större avvikelserna kan ändå vara användbara i skogsbruket, ett fel på 13 procent av medelhöjden kan ge en god uppfattning om skogen är i behov av åtgärder som exempelvis gallring.

Markmodellens kvalitet bör ha en direkt inverkan på höjdmätningens noggrannhet eftersom den används som referensplan mot trädtopparna i höjdmätningen. Drönarsystemet Parrot Sequoia hade den mest exakta höjdmätningen av det södra området, men samtidigt få punkter som registrerats som markyta om man studerar tvärsnittsprofilerna, vilket kan tyckas motsägelsefullt mot min hypotes. Systemet hade en lägre upplösning på kameran än de övriga drönarsystemen (tabell 1), vilket kan vara en orsak till att mindre av markytan registrerades. För drönarsystemen i det norra området fanns det inga stora skillnader av hur mycket markyta som hade registrerats. Det går därför inte att dra någon direkt koppling till höjdmätningens noggrannhet utifrån andelen markyta som registrerades. För att göra en utförligare undersökning bör markmodellerna som skapades i programmet Agisoft jämföras mot varandra, exempelvis genom att beräkna höjdskillnader.

Felkällor

Det finns flera faktorer som kan ha påverkat studiens resultat. En orsak kan vara antalet träd som jämfördes i studien. Det undersöktes bara 13 träd på varje område, vilket är ett för litet antal för att undvika att slumpmässiga omständigheter påverkar resultatet. Orsaker som kan försämra resultatet är exempelvis träd som står tätt och att trädkronor som går ihop i varandra kan göra att topparna är svåra att urskilja. Med ett litet urval kan dessa träd till en stor del påverka resultatet. Ytterligare en orsak är antalet mätningar. Fler mätningar bör ha gjorts med varje drönarsystem för att helt kunna säkerställa att höjdmätningens noggrannhet skiljde mellan drönarsystemen.

Enligt studien (Dandois et al., 2015) kan väderförhållanden, flyghöjd och överlappningsgrad mellan bilderna ha en inverkan på punktmolnens kvalitet med metoden SfM. Studien antydde att en hög överlappningsgrad är optimalt, samt att överlappningsgraden mellan bilderna i drönarens färdriktning har en stor påverkan på skattningens noggrannhet av skogens höjd. I vår studie användes en överlappningsgrad på 90 procent, men det kan inte helt säkerställas eftersom överlappningsgraden beror av bildsekvensen och hastigheten på drönaren. Bildsekvensen kunde endast ställas in på hela sekunder vilket leder till att det inte blir helt exakt.

I studien undersöktes endast en barrblandskog. För att resultatet ska kunna generaliseras bör mätningarna ha utförts på fler områden innehållande olika typer av skog, exempelvis tät skog, gles skog och skog med varierade trädslag.

Variationerna mellan drönarsystemen berodde till stor del av bias. Bias ger ett mått på hur mycket trädhöjderna avviker mot det verkliga värdet, vilket i det här fallet tyder på att det bör finnas ett systematiskt fel i höjdmätningen som leder till generella över/underskattningar av höjden. Drönarsystemet DJI Phantom 4 Pro hade störst bias på 30,9 dm och det kan konstateras av figur 3 att trädhöjderna generellt ligger runt 3 m över de fältmätta höjderna för varje enskilt träd. Om höjdmätningen kalibrerades för bias skulle det troligtvis förbättra systemets höjdmätning och relativt RMSE.

Slutsats

Studiens resultat tyder på att användningen av drönare med tekniken SfM är användbart för att mäta trädhöjder i skogen. De två bästa drönarsystemen hade ett lägre medelfel än skogliga grunddata. Höjdmätningens noggrannhet varierade dock mellan de olika drönarsystemen. Variationerna kan bero av slumpmässiga fel eftersom ett litet urval gjordes av antalet träd i mätningen eller av systematiska fel då flera drönarsystem hade stora bias. Inget direkt samband kunde hittas mellan andelen mark som registrerats och höjdmätningens kvalitet

REFERENSER

Agisoft, L.C.C. (2016). *Agisoft PhotoScan User Manual Professional Edition, Version 1.2*
Tillgänglig: http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_2_en.pdf [2018-02-27]

Banu, T.P, Borlea, G.F & Banu, C. (2016). The Use of Drones in Forestry. *Journal of Environmental Science and Engineering B*, vol. 5, pp.557-562. DOI: 10.17265/2162-5263/2016.11.007

Colomina, L. & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, pp.79–97. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>

Dandois, J., Olano, M. & Ellis, E., (2015). Optimal Altitude, Overlap, and Weather Conditions for Computer Vision UAV Estimates of Forest Structure. *Remote Sensing*, 7(10), pp.13895–13920. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/rs71013895>

Lantmäteriet (2018). *Flygbilder*. Tillgänglig: <https://www.lantmateriet.se/sv/Kartor-och-geografisk-information/Flyg--och-satellitbilder/Flygbilder/> [2018-03-12]

McGaughey, Robert J. (2018). *FUSION/LDV: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization*. Seattle: United States Department of Agriculture, Forest Service Pacific Northwest Research Station. Tillgänglig: http://forsys.sefs.uw.edu/fusion/FUSION_manual.pdf [2018-02-27]

Nilsson, Mats et al., (2017). A nationwide forest attribute map of Sweden predicted using airborne laser scanning data and field data from the National Forest Inventory. *Remote Sensing of Environment*, 194, pp.447–454. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.10.022>

Nordkvist, K., Sandström, E., Reese, H. & Olsson, H. (2013). *Laserskanning och digital fotogrammetri i skogsbruket / 2. uppl.*, Umeå: Institutionen för skoglig resurshushållning, Sveriges lantbruksuniversitet, Umeå Tillgänglig: https://pub.epsilon.slu.se/10956/7/ad.slu.se_common_bibul_slub_epsilon_oppetarkiv_nordkvist_k_etal_140120.pdf [2018-02-27]

Nämnden för skoglig fjärranalys & Sverige. Skogsstyrelsen, 1993. *Flygbildsteknik och fjärranalys*. Jönköping: Skogsstyrelsen.

Puliti, Stefano, P. et al., (2015). Inventory of small forest areas using an unmanned aerial system. *Remote Sensing* 2015, 7(8), pp.9632–9654. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/rs70809632>

Tang, L. & Shao, G., (2015). Drone remote sensing for forestry research and practices. *Journal of Forestry Research*, 26(4), pp.791–797. Tillgänglig: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11676-015-0088-y> [2018-03-05]

Wallace, L., Lucieer, A., Malenovský, Z., Turner, D. & Vopěnka, P. (2016). Assessment of Forest Structure Using Two UAV Techniques: A Comparison of Airborne Laser Scanning and Structure from Motion (SfM) Point Clouds. *Forest*, vol. 7(6), pp.62. DOI: [10.3390/f7030062](https://doi.org/10.3390/f7030062)

Westoby et al., (2012). ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, pp.300–314. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>

White, J.C., Stepper, C., Tompalski, P., Coops, N.C & Wulder, M.A. (2015). Comparing ALS and Image-Based Point Cloud Metrics and Modelled Forest Inventory Attributes in a Complex Coastal Forest Environment. *Forests*, vol. 6(10), pp.3704–3732. DOI: [10.3390/f6103704](https://doi.org/10.3390/f6103704)