



Kandidatarbeten
i skogsvetenskap
Fakulteten för skogsvetenskap

2019:13

Metoder för höjdkorrigerering av punktmoln generade från drönarbilder

*Methods for height correction of point clouds created from
drone data*



Foto: Joakim Isaksson

Joakim Isaksson & Lars Johansson

Sveriges Lantbruksuniversitet
Självständigt arbete i skogsvetenskap, 15 hp
Jägmästarprogrammet
Umeå



Kandidatarbeten i Skogsvetenskap

Fakulteten för skogsvetenskap,
Sveriges lantbruksuniversitet

Enhet/Unit	Institutionen för skogens ekologi och skötsel Department of Forest Ecology and Management
Författare/Author	Joakim Isaksson & Lars Johansson
Titel, Sv	Metoder för höjdkorrigerering av punktmoln skapade från drönbilder
Titel, Eng	<i>Methods for height correction of point clouds created from drone data</i>
Nyckelord/ Keywords	<i>Fjärranalys, UAV, Skog, ICP</i> <i>Remote sensing, UAV, Forest, ICP</i>
Handledare/Supervisor	<i>Jonas Bohlin, Institutionen för skoglig resurshushållning</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	EX0911
Program	Jägmästarprogrammet
Omfattning på arbetet/	15 hp
Nivå och fördjupning på arbetet	G2E
Utgivningsort	Umeå
Utgivningsår	2019
Serie	Kandidatarbeten i Skogsvetenskap

FÖRORD

Detta kandidatarbete är skrivet på Jägmästarprogrammet vid Sveriges Lantbruksuniversitet i Umeå våren 2019 och omfattar 15 högskolepoäng. Vi vill tacka vår handledare Jonas Bohlin för genomgående hjälp med arbetet, Mattias Nyström för hjälpen med databearbetning samt Ljungberglaboratoriet som finansieras av Ljungbergsfonden för tillgången till deras utrustning och lokal. Vi vill även tacka alla andra studenter som arbetat där för alla stimulerande diskussioner, fika samt samtal runt kaffebyggaren.

SAMMANFATTNING

Syftet med studien är att jämföra tre olika metoder för höjdkorrigerings av punktmoln skapade från bilder tagna med drönaren DJI Phantom 4 Pro. Detta är intressant då drönare anses vara ett av framtidens instrument för småskalig och snabb fjärranalys. Problemet med drönare är den osäkra bedömningen av höjd som medförs av drönarens teknik för höjdmätning. För att kunna användas effektivt i framtiden behöver därför höjden korrigeras för att passa andra mer noggranna fjärranalysdata. I arbetet bearbetas och korrigeras sju flygblock med flygbilder inom ett relativt litet område.

För varje flygblock genererades ett punktmoln som sedan skulle korrigeras efter en höjdmodell. Tre metoder jämfördes i studien. Den första var manuell justering av Z-koordinaten. Den andra metoden var "Iterative closest point" (ICP-metoden) där punktmolnet matchas med en modell för marken, punkt för punkt. Den sista metoden var att korrigera höjden i drönarbildernas exif-filer utefter drönarens barometer. Efter korrigeringen jämfördes höjden på punktmolnen med RTK-GNSS-mätningar inom flygblocken.

Resultatet visar att den manuella metoden har bäst genomsnittligt Root mean square error (RMSE) över alla flygblock på 1.06 m. Maximum och minimum för metoden var 1.59 m och 0.40 m. ICP-metoden var näst bäst med genomsnittligt RMSE på 1.35 m. ICP-metodens RMSE varierade mellan 2.97 m och 0.32 m vilket tyder på att metoden kan träffa bättre än den manuella då 0.32 m var det lägsta RMSE som registrerades. Barometermetoden var sämst med ett genomsnittligt RMSE på 7.95 m. Spridningen inom metoden var större än för de andra. Maximum och minimum RMSE låg på 9.35 m respektive 5.47 m.

Nyckelord: Fjärranalys, UAV, Skog, ICP,

SUMMARY

The purpose of the study was to compare three different methods for height correction of point clouds created from pictures taken from the drone DJI Phantom 4 Pro. This is interesting as drones are a future instrument for small scale and quick remote sensing. The problem with drones is the inaccuracies in height measurement that exist because of the drone's small stature. For drones to be used effectively in the future there must be a correction in height to fit other more accurate remote sensing data sets. In this paper seven flight blocks of flight images from a relatively small area are corrected.

For each flight block a point cloud was generated which would be corrected to the Swedish Land surveys height model. Three methods were compared. The first method was a manual correction of the Z-coordinate. The second method was "Iterative closest point" where a software matched the point clouds ground points to the height models points. The last method was to correct the point clouds height by changing the drone photos height according to the barometric height information in the exif file.

The result shows that the manual method had the best average Root mean square error (RMSE) with a value of 1.06 m. Maximum and minimum RMSE for the method where 1.59-0.40 m. The ICP-method was the second-best method with an average RMSE of 1.35 m, the result varied between 2.97-0.32 m, which indicates that it could generate the best result. The barometric method was the worst method with an average RMSE of 7.95 m and a variance between 9.35-5.47 m.

Keywords: Remote sensing, UAV, Forest, ICP,

INLEDNING

Introduktion

Drönare är idag ett verktyg för fjärranalys där de används för snabb överblick av områden som ska genomgå uppföljning. Men de har även potentialen till att användas för framställning av tredimensionella modeller som kan användas för att skatta skogliga variabler. Då drönarna är små och relativt billiga har de problem som drabbar dessa 3D-modeller. Majoriteten av drönarna som används av det svenska skogsbruket är utrustade med kameror och inte en laserskanner som hade resulterat i högre inköpskostnader. Då kameran inte kan tränga igenom täta krontak byggs modeller som inte fångar upp marken vilket är en väsentlig del i höjdskartningen av bestånd. Detta är i sig självt inte ett problem då det går att använda en färdig höjdmodell för marken som komplement. Problemet uppstår istället när drönarens satellitnavigation (GNSS) felbedömer flyghöjden. De genererade modellerna positioneras då med fel höjd gentemot den befintliga markmodellen och behöver därför korrigeras i höjddled.

Bakgrund

Skogsbrukssektorn bygger idag på tidigare insamlade data och framskrivningar av dessa data. Insamling av data med hög kvalitet har sedan länge genomförts i skogen med manuella mätinstrument i fält men har på senare tid avancerat mot fjärranalyser med stöd av snabba kontrollmätningar i fält, den så kallade areametoden. Fjärranalys avser insamling av data från avstånd (Campbell & Wynne, 2011). Användningsområdet är mycket attraktivt för skogsnäringen då det går att användas för bland annat skattning av stamvolym, trädhöjd, stamdiameter, grundyta och trädartsfördelning, identifiering av vindfällen samt förändringar i landskap (Næsset *et al.*, 2004; Dandois & Ellis, 2010; Nyström, 2014; Jensen & Mathews, 2016; Bohlin, 2017). Metoderna bygger på aktiva sensorer som avger och registrerar ljus eller alternativt passiva sensorer som endast registrerar ljus (Eklundh, 2013). I modern fjärranalys finns tre storskaliga metoder som används; optiska bilder från satellit eller flyg, radar och laser. Dessa olika metoder bör inte ses som rivaliserande metoder utan som komplement till varandra (Baltasvias, 1999). Lantmäteriets nationella höjdmodell är baserad på flygburen laserskanning (Eng. Airborne Laserscanning = ALS).

Vid laserskanning används tekniken Light Detection And Ranging (LiDAR). Metoden bygger på laser vilket emitterar pulser som reflekteras på markobjekt och tas emot och registreras av en mottagare på flygplanet. ALS använder noggrann satellitnavigation (GNSS) för att bestämma flygplanets position. Samtliga returerna får en tredimensionell X-, Y-, Z-koordinat där Z-koordinaten representerar höjd. Detta resulterar i ett tredimensionellt punktmoln (Eklundh, 2013). LiDAR metoden ligger till grund för den nationella höjdmodellen då ljuspulser kan tränga igenom tät vegetation för att nå marken (Kraus & Pfeifer, 1998; Wehr & Lohr, 1999). LiDAR ger punkter med högre noggrannhet med avseende position än vid användandet av optiska bilder (Olsson, 2009; Vastaranta *et al.*, 2013; Ullah *et al.*, 2017).

Fotogrammetri är användning av bilder tagna av flyg eller drönare vilka kan användas för att skapa tredimensionella punktmoln från tvådimensionella bilder. Metoden bygger på koordinatsatta överlappande bilder som genom bildmatchningstekniker sätts ihop till en sammanhängande bild. Eftersom bilderna är tagna ur olika vinklar går det att skapa en tredimensionell bild. För att kunna koordinat sätta bilderna så har drönare en GNSS-mottagare (Eklundh, 2013). Metoder som bygger på optiska bilder har stor användning inom skogsbruk. Fotogrammetri kan användas för att småskaligt skatta skogliga variabler så som höjd, volym och grundyta (Bohlin *et al.*, 2012a; Bohlin, 2017). Skattningarna kan resultera i liknande precision som ALS metoden men till en betydligt mindre kostnad (Bohlin *et al.*, 2012b; Bohlin, 2017). Precisionen sjunker dock i äldre skogar, lövskogar och glesa skogar (Bohlin, 2017). Detta medför att metoden är användbar inom skogsbruket då fälldata ska insamlas, till exempel inför uppdatering av skogsbruksplaner. En nackdel med fotogrammetri är att denna metod inte får tillräckligt med markpunkter vid täta krontak vilket resulterar i behovet av komplettering med markmodeller från andra källor (Lisein *et al.*, 2013; Torresan *et al.*, 2017). Detta innebär att data insamlat via optiska metoder fördelaktigt kan kombineras med tillgängliga laserdata i form av en modell över marken som komplement eller för korrigerande. Detta är viktigt för att kunna skatta trädens höjd, vilket kräver ett krontak och en markmodell. Trädens höjd ligger sedan till grund för andra skattningar av skogliga variabler. Även om resultatet oftast inte är lika precist som ALS så bör fotogrammetrin användas som ett kostnadseffektivt alternativ vid skattning eller uppdatering av tidigare mät data (Bohlin *et al.*, 2012b; Vastaranta *et al.*, 2013).

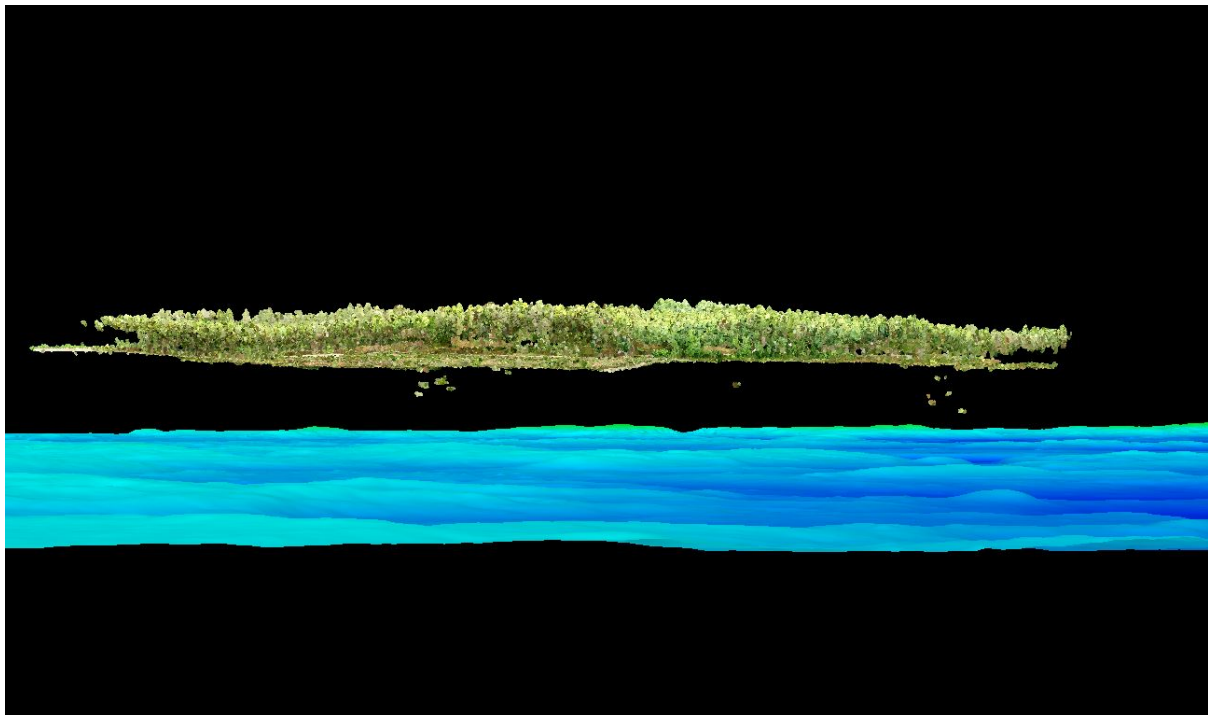
Den konventionella metoden för flygfotografering är att använda flygplan eller helikopter. Dessa metoder är dyra och är inte realistiskt genomförbara i ett småskaligt skogsbruk eller på kort varsel. Problem med storskalig fjärranalys skapar ännu en nisch som kan fyllas av drönare. En drönare kan hanteras av en enskild person utan längre utbildning och till en låg kostnad. Drönaren är utrustad med en kamera, GNSS samt ibland en barometer för höjdmätning och fyller därmed kraven för att vara användbar i fjärranalys syfte (Tang & Shao, 2015). Dessa har även en fördel mot flygplansburna bilder då drönaren flyger på lägre höjd och påverkas då inte av molnighet, vilket kan hindra planen från att vara effektiva (Baltsavias, 1999).

Problem och syfte

Alla dagens drönare är inte optimala för fjärranalys. Priset måste vara lågt för att vara ett

realistiskt alternativ för företag och skogsägare att köpa in en eller flera. Ett lågt pris minskar kvaliteten på hårdvaran. Ett exempel på att drönare inte är helt optimala för fjärranalys är dess förmåga att bestämma koordinaterna där bilderna tas. Eftersom drönaren är liten och billig är GNSS mottagaren enklare vilket resulterar i sämre mottagare för satellit informationen vilket ger en större osäkerhet i positioneringen. Enklare drönare använder sig inte heller av RTK-GNSS-mätning som innebär att positionen bestäms med hjälp av markstödpunkter. Detta utnyttjas vid laserskanning och fotografering från större flyg. Vissa drönarmodeller förlitar sig på satellitnavigering för höjdbestämmning istället för barometern som ofta visar mindre fel (Albéri *et al.*, 2017). Då bildens koordinater utgår ifrån GNSS får det skapade punktmolnet ofta fel geografisk placering, störst blir felet i höjdd. Punktmolnet som skapas positioneras antingen högre eller lägre jämfört med dess faktiska position. Detta kan kontrolleras genom att jämföra drönarens punktmoln med lantmäteriets nationella höjdmoln (Figur 1).

Arbetet har en frågeställning: Vilken metod är optimal för att minimera höjdskillnaden mellan punktmoln genererade från drönarbilder och Lantmäteriets höjdmoln? Frågeställningen är intressant då punktmoln genererade från drönarbilder kan ha stora felaktigheter i höjd. För att drönaren ska ha användning i fjärranalyssyfte behöver detta korrigeras och inga/få tidigare studier har jämfört olika metoder för höjd korrigerings av punktmoln.



Figur 1. 3D-visualisering av ett okorrigerat punktmoln positionerat betydligt högre gentemot lantmäteriets höjdmoln. Höjd skillnaden uppnår omkring 60 meter.

Figure 1. 3D visualization of an uncorrected point cloud positioned notably higher than the ground model. The height difference is about 60 meters.

Följande metoder ska jämföras i studien:

Manuella metoden: Manuell korrigerings av Z-koordinater i punktmoln utefter höjdskillnaden mellan bilderna och höjdmolnen.

ICP-metoden: Korrigera med metoden iterative closest point (ICP) där punktmoln anpassas efter en höjdmodell av marken.

Barometermetoden: Korrigering av höjd genom användning av drönarens inbyggda barometer som höjdmätare istället för drönarens GNSS. Denna metod används av ett större skogsbolag. I företagets metod tar drönaren en bild innan den lyfter, vilket registrerar höjden vid marknivå som sedan kan användas vid korrigering.

MATERIAL OCH METOD

Data insamling

Data är insamlat på fastigheten Remningstorp mellan Skara och Skövde i juni 2018. Skogen består till stor del av gran (*Picea abies* L.) men också av tall (*Pinus sylvestris* L.) och björk (*Betula spp.*) Området är relativt platt med små variationer i höjd inom de olika flygblocken. Ett flygblock är en samling med drönarbilder som är tagna över samma område under samma flygning. Flygningen gjordes med en drönare av märket DJI och modellen Phantom 4 Pro. Phantom 4 Pro drönaren använder en kamera med 1 tums bildsensor. Kameran kan ta bilder i upp till 20 megapixels upplösning. Drönarens kameraupphängning stabiliserar kameran och tillåter att drönaren kan tilta kameran i 130 grader. Drönaren har också en inbyggd barometer som hjälper till med höjdbestämning (Anon 2017). I detta arbete användes sju flygblock som fotades i olika flygningarna i juni 2018 (Tabell 1).

Tabell 1. Information angående de olika flygblocken.

Table 1. Information regarding the seven flight blocks.

Flygblock kontrollpunkter	Antal bilder	Antal
1	292	7
2	352	9
3	172	6
5	274	7
6	318	7
8	210	6
9	281	8

Utspritt i dessa flygblock lades kontrollpunkter ut. Kontrollpunkterna markerades som kryss på marken för visuell identifikation i bilder och drönarpunktmoln. För att bestämma positionen på punkterna användes RTK-GNSS-mätning för att få noggranna koordinater för flygblockens kontrollpunkter. Mätningar används senare i arbetet som referens till de tre metoderna för korrigerings av höjd.

Den nationella höjdmodellen baserad på Lantmäteriets laserdata användes som referens för matchning av punktmolnen. Alla punkter har klassificerats som antingen mark, vatten, bro eller oklassificerad (Lantmäteriet 2019). På öppna plana ytor är medelfelet för scanningen 0,05 m i höjd samt 0,25 m i planled. medelfelet mellan angränsande stråk är 0,1 m. Noggrannhet i grid är 0,1 m i höjd och 0,3 m i plan (Lantmäteriet 2018).

Databearbetning

Bearbetningen började med att skapa drönarpunktmoln utifrån flygblocken. Detta gjordes utifrån bilderna genererade utifrån drönarflygninarna (Tabell 1). För att skapa drönarpunktmolnen användes ett program för fotogrammetrisk bearbetning (Agisoft 2018). Flygbilderna från ett av flygblocken öppnades i programmet. Hela flygblocket lades i en grupp vilket innebar att dessa bilder bearbetas tillsammans. Varje bild har koordinater där den är tagen. Med hjälp av koordinaterna orienteras bilderna och överlapp skapas. Eftersom bilderna hade tillräckligt med överlapp kunde den fotogrammetriska tekniken Structure from Motion användas för att generera ett punktmoln från bilder. Då drönarpunktmolnet hade genererats kunde punkterna klassificeras. Detta gjordes med samma program som skapade drönarpunktmolnet (Agisoft 2018). I detta fall var klass 2 intressant då klass 2 representerar mark och kan användas för att få fram en markmodell som kan korrigeras efter en höjdmodell. Efter att dessa steg var genomförda kunde filerna exporteras till .las format och processen repeterades för de övriga flygblocken. Vid export valdes koordinatsystemet SWEREF99 TM (EPSG:3006) eftersom detta koordinatsystem används av lantmäteriet och deras höjdmodell vilken den markklassade drönarpunktmolnen ska korrigeras efter. Denna process används i den manuella korrigerings metoden samt ICP-metoden då den tredje metoden som involverar användandet av barometern innefattar fler steg i processen för framställandet av drönarpunktmoln.

Tabell 2. Drönarpunktmolnens höjd före korrigerings samt RTK-GNSS-höjderna och höjdskillnaden mellan dessa

Table 2. The drone generated point clouds height before correction and the RTK-GNSS height difference

Flygblock	Höjd innan korrigerings (Meter)	RTK-GNSS-höjd (Meter)	Höjdskillnad (Meter)
1	149,45	136,96	12,49
2	136,12	133,08	3,04
3	132,47	134,69	-2,22
5	121,83	128,46	-6,63
6	117,12	128,75	-11,63
8	192,20	132,70	59,50
9	101,58	128,75	-27,17

För den manuella metoden användes två program, ett för visualisering av 3D-punktmoln (Applied imagery 2018) och ett program för konvertering av drönarpunktmolnens höjd (Isenburg 2011). Processen inleddes med genereringen av drönarpunktmoln. I visualiseringsprogrammet öppnades en höjdmodell samt det drönarpunktmoln som skulle

korrigeras. Genom att använda drönarpunktmolnet som referens valdes en punkt i höjdmodellen där drönarflygningen tros startat ifrån. På denna punkt noterades höjden för att få en referenshöjd. Höjden på samma koordinat undersöktes även i höjdmodellen. Skillnaden mellan dessa två höjder var den höjd som korrigerades. Det korrigerade punktmolnet inspekterades genom att ta stickprov i form av transekter för att få en snabb överblick om hur väl höjdmodellen och det korrigerade punktmolnet passar. Efter korrigeringen kontrollerades det korrigerade punktmolnets höjd genom att identifiera koordinaterna vid markstödpunkternas position. Z-koordinaten noterades som höjden för det korrigerade punktmolnet som sedan jämfördes med RTK-GNSS-mätningarna.

Till ICP-metoden användes ett bearbetningsprogram för punktmoln (Cloud Compare 2018) samt ett program för visualisering av 3D-punktmoln (Applied imagery 2018). Denna metod byggde på att ett punktmoln anpassas efter ett annat punktmoln, i det här fallet drönarpunktmolnet efter höjdmodellen. Processen började med importen av laserdata för studieområdet vilket ligger till grund för höjdmodellen. Detta data inkluderade även annat än marken och behövdes därför redigeras för att separera markpunkter från resterande klasser. Även här är markpunkter klassade till klass 2 och dessa plockades ut till ett eget punktmoln som endast bestod av marken, en höjdmodell. Detta skapade höjdmodellen, i detta fall ett markpunktmoln som drönarpunktmolnet skulle korrigeras efter. Därefter importerades drönarpunktmolnet. Även drönarens punktmoln består av mer än klass 2 och behövde därför genomgå samma behandling. Med två markmodeller kunde drönarpunktmolnet korrigeras efter höjdmodellen. I detta skede användes ICP-metoden vilket innebar att markpunktmolnet itererades tills avståndet mellan de närmast punkterna i de två modellerna blev så litet som möjligt. Denna ändring gav en transformeringsmatris som visade ändringen som markpunkterna i drönarpunktmolnet genomgått i samtliga led. Transformeringsmatrisen användes sedan för att korrigera det kompletta drönarpunktmolnet. De korrigerade punktmolnen öppnades i visualiseringsprogrammet för att kontrollera höjden och notera koordinaterna vid kontrollpunkterna.

Barometermetoden inleddes med fotogrammetrisk bearbetning av bilderna (Agisoft 2018). Bildernas referenssystem konverterades till SWEREF99 TM (EPSG:3006) för att kunna passas efter en höjdmodell med samma referenssystem i senare skede. Efter en okulär inspektion av bilderna kunde en trolig start punkt för drönarflygningen identifieras. I visualiseringsprogrammet (Applied imagery 2018) öppnades höjdmodellen och med hjälp av tidigare gjorda drönarpunktmoln kunde startpunkten identifierades och därmed höjden på höjdmodellen. Tillbaka i bearbetningen användes ett skript som ändrar z-koordinaterna i bildernas exif-filer. Exif-filerna visar en barometermät flyghöjd, vilket redovisas i höjd över startpunkten. Detta kan jämföras med GNSS höjden vilket redovisas i höjd över havet och som ofta är felaktig. Då markens korrekta höjd är känd via höjdmodellen samt att flyghöjden är känd via barometern så går det att räkna ut drönarens faktiska flyghöjd över havet. Med ett skript ändrades Z-koordinaten i samtliga bilder för flygblocket genom att korrigera med hjälp av startpunktens höjd adderat med flyghöjden från barometern. Med en korrigerad höjd i bilderna kunde de orienteras, överlappas och sedan användas för generering av drönarpunktmoln. Dessa öppnades sedan i visualiseringsprogrammet för att notera höjden. Mätning av höjd gjordes på alla kontrollpunkter för alla metoder. Detta gjordes manuellt genom att identifiera de i fält utmarkerade kontrollpunkterna i drönarpunktmolnen. Höjderna i drönarpunktmolnet användes för att kunna jämföra med RTK-GNSS-höjderna (Tabell 2).

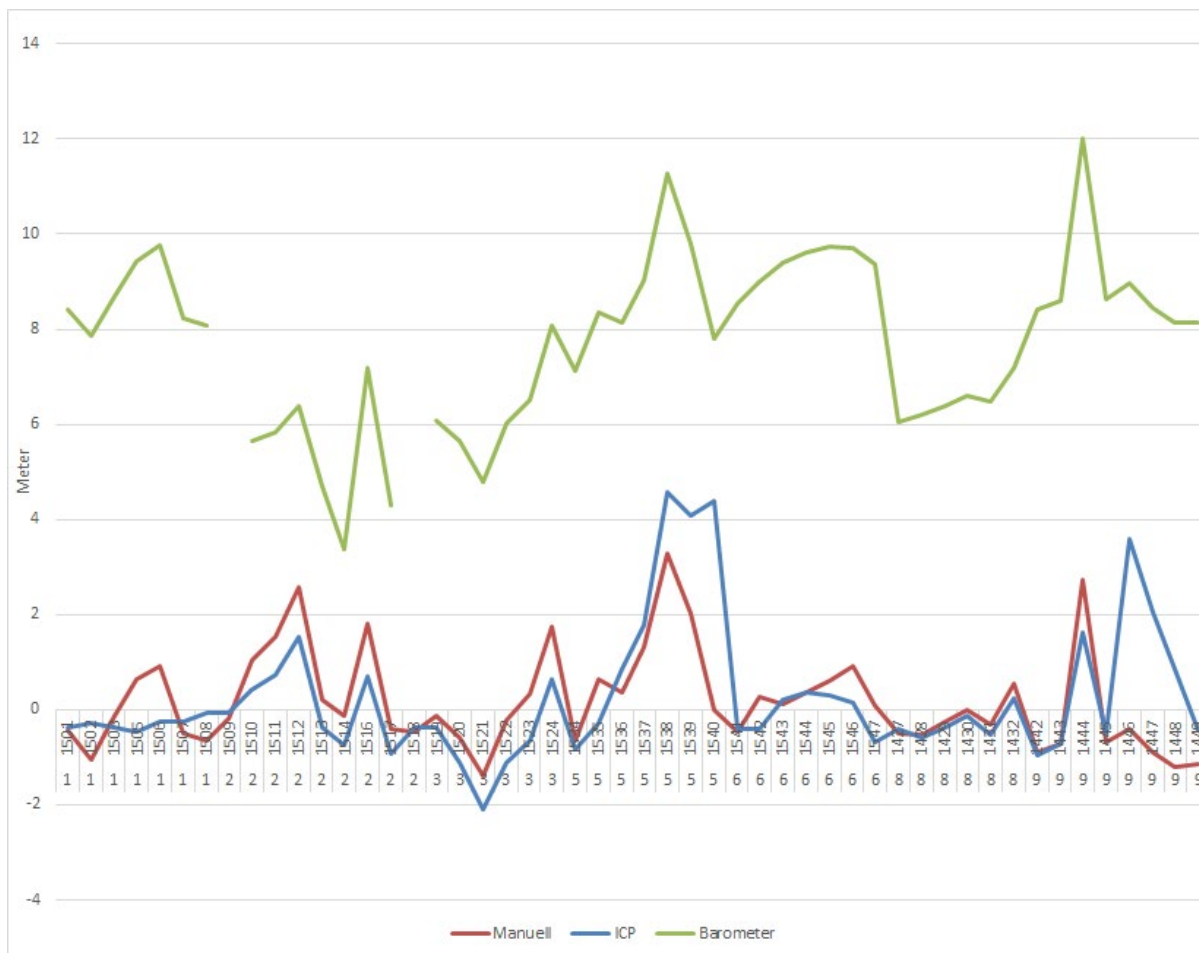
Statistisk analys

För att jämföra de korrigerade höjderna med kontrollmätningarna valdes Root Mean Square Error (RMSE) som den mest passande analysen. RMSE är ett spridningsmått på avvikelserna mellan de uppmätta höjderna och de faktiska höjderna. För att räkna ut RMSE så användes ekvation 1. Där p är den uppmätta höjden på varje kontrollpunkt, o är kontrollpunkternas faktiska höjd och n är antalet kontrollpunkter.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_i - o_i)^2}{n}} \quad (1)$$

RESULTAT

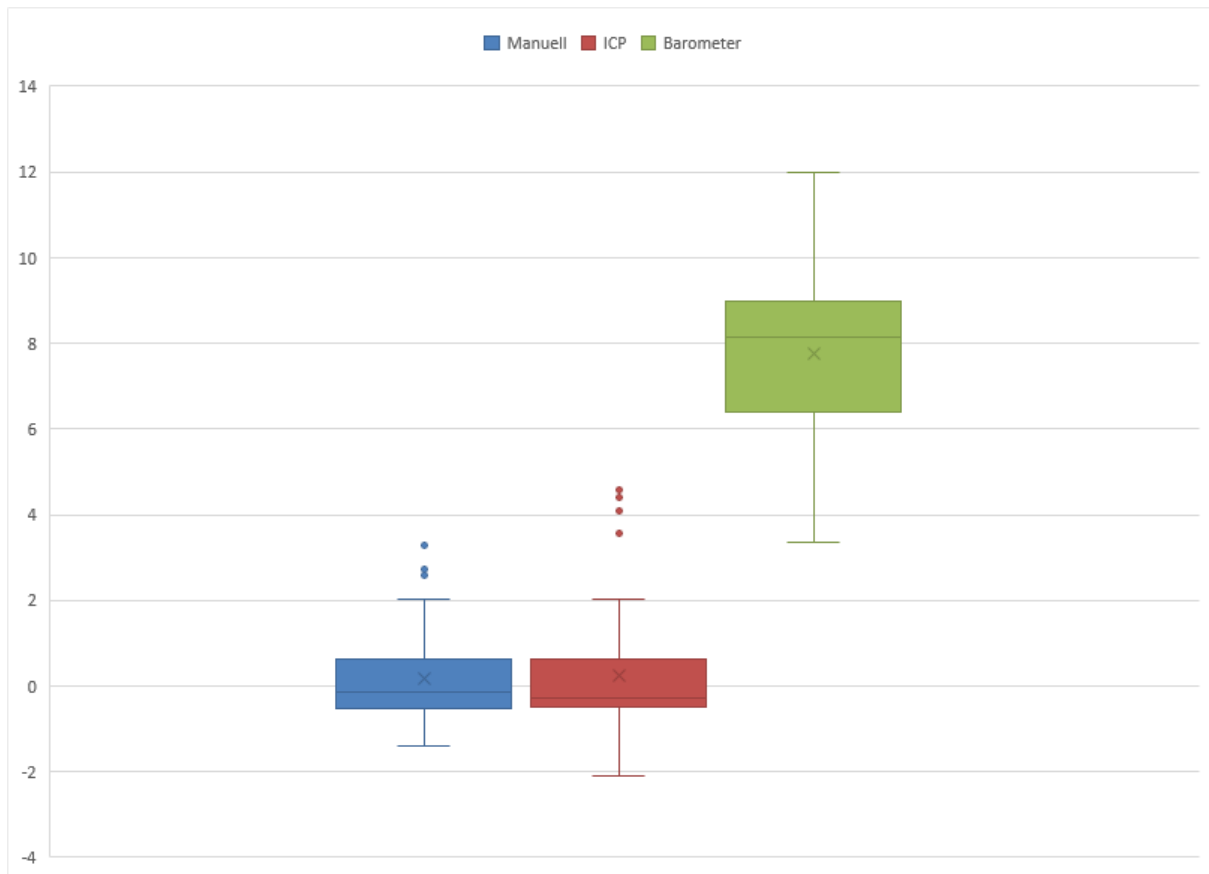
Den manuella metoden och ICP-metoden visade liknande resultat. Barometermetoden avvek från de övriga två metoderna. Barometermetoden hade störst skillnad i höjd mellan samtliga RTK-GNSS-mäta höjder och drönapunktmolnets höjdvärden. Trenden visade att samma kontrollpunkter resulterar i toppar respektive dalar i höjdskillnad (figur 2).



Figur 2. Sammanställning av höjdskillnaderna vid kontrollpunkterna mellan RTK-GNSS-mätningarna och kontrollpunkternas höjd i punktmolnet.

Figure 2. Height difference between the RTK-GNSS-measurements and the point cloud.

Den manuella metoden hade ett genomsnittligt fel som låg närmare noll än de andra metoderna. Metoden hade även minst spridning på höjdvärden. Störst spridning och högst medelvärde hade barometermetoden. ICP-metoden visade på sämre resultat då medelvärdet var längre ifrån noll än manuella metoden, dessutom hade metoden större spridning (Figur 3).



Figur 3. Låddiagram över RMSE för de tre olika metoderna.

Figure 3. Boxplots of the RMSE for the three methods.

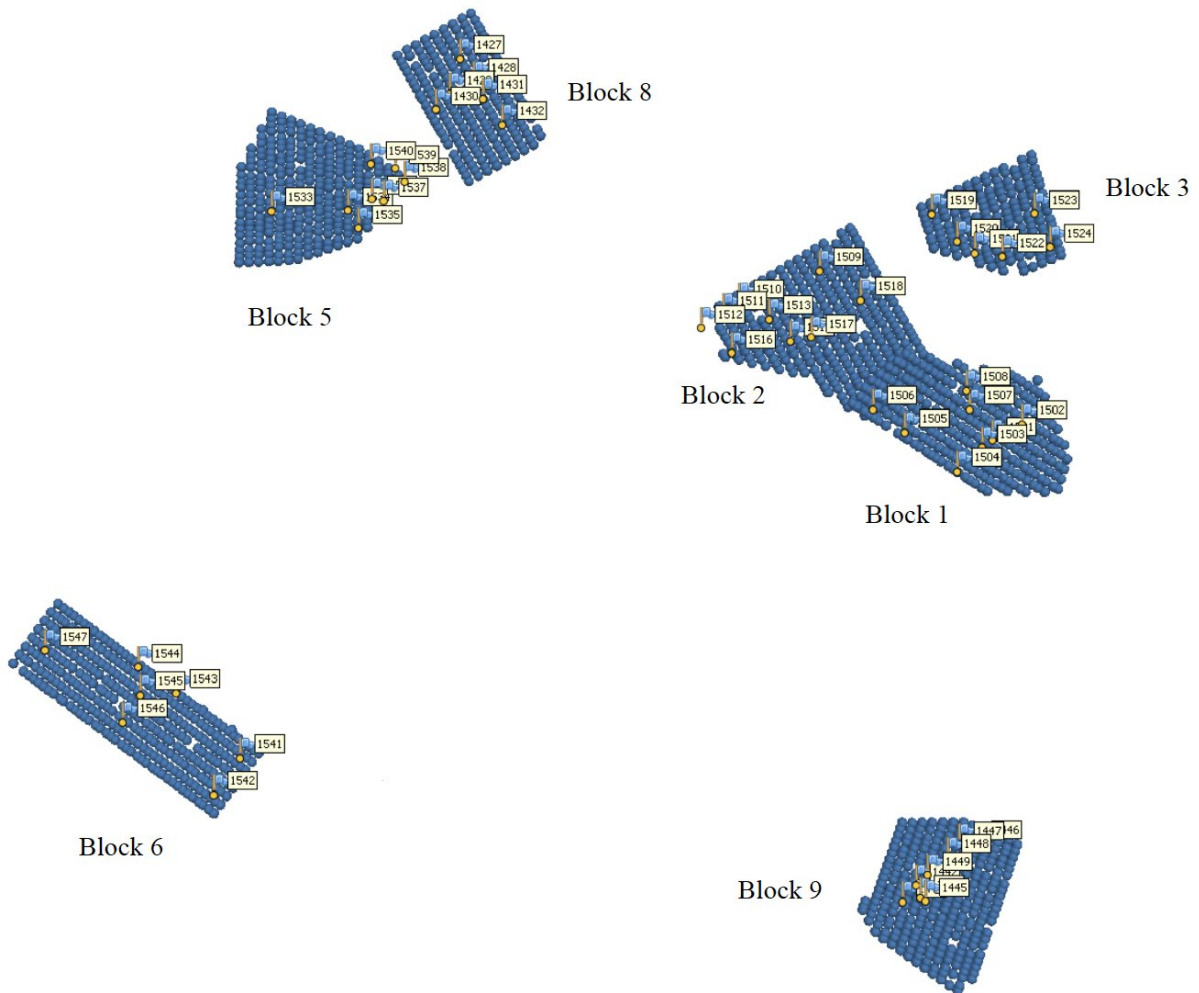
Metoden som gav bäst resultat för höjdkorrigerings av punktmolnet mot markmodellen var den manuella metoden med ett genomsnittligt RMSE på 1.06 m Skillnaden mellan den manuella metoden och IPC metoden som var näst bäst är 0.29 m. Barometermetoden gav det sämsta resultatet av de undersökta metoderna. De lägsta RMSE värdet hade IPC metoden på 0.32 m i flygblock 1 (tabell 3). Standardavvikelsen följer det som ses i figur 3, att den manuella metoden har lägst spridning på och därmed lägst standardavvikelse på 0.44 m. ICP-metoden hade mer än dubbla standardavvikelsen jämfört med den manuella metoden på 0.96 m. Barometermetoden hade även den högsta standardavvikelsen på 1.59 m.

Tabell 3. Root mean square error och standardavvikelse för alla flygblock och metoder. Uträknat från RTK-GNSS-mätningarna och de korrigerade höjderna i punktmolnen

Table 3. Root mean square error and standard deviation for all flight block and methods. Calculated from the RTK-GNSS-measurements and the corrected point cloud heights

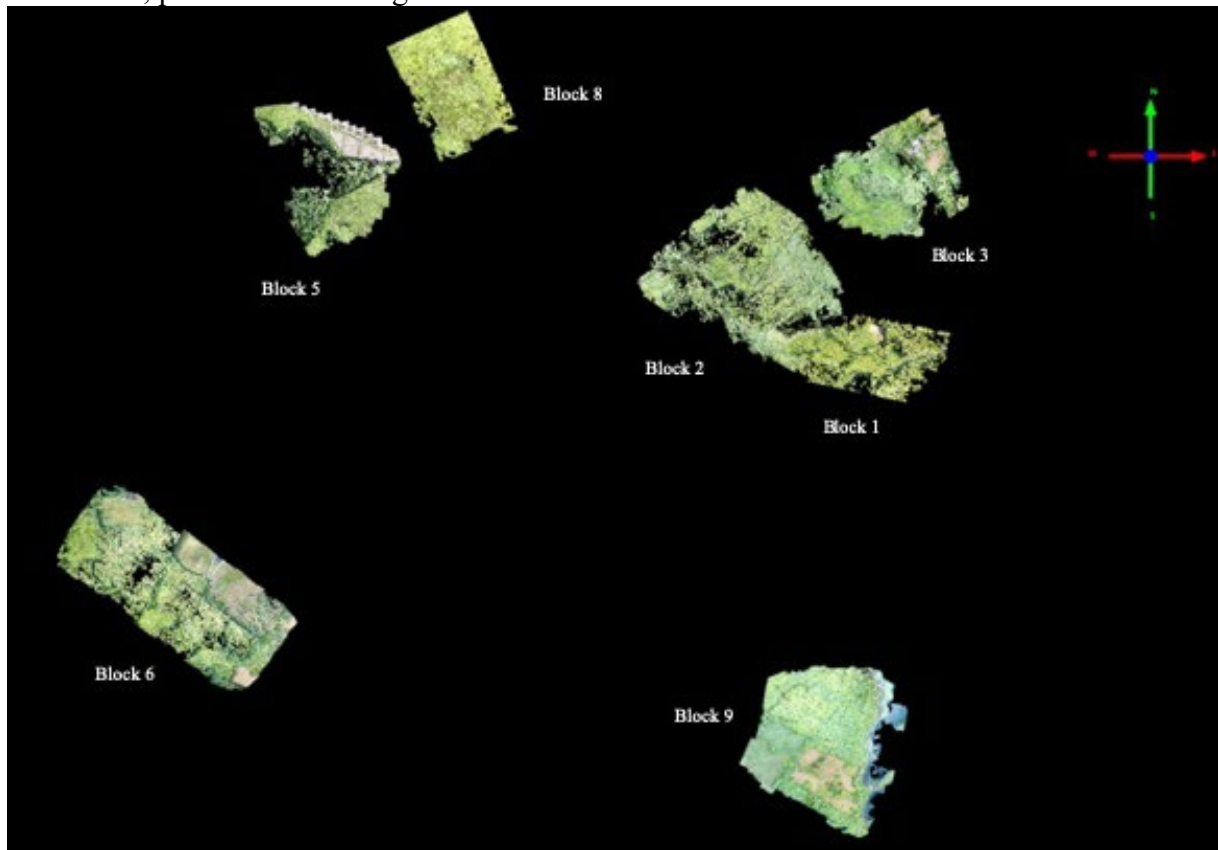
Flygblock	Manuellt (Meter)	ICP (Meter)	Barometer (Meter)
1	0.68	0.32	8.67
2	1.24	0.76	5.47
3	0.96	1.14	6.27
5	1.58	2.97	8.89
6	0.49	0.40	9.35
8	0.40	0.41	6.50
9	1.27	1.67	9.00
Genomsnitt	1.06	1.35	7.95
Standardavvikelse	1.05	1.41	1.79

Flygblock 2 genererade inte ett fullständigt punktmoln för barometermetoden. Det innebar att kontrollpunkt 1509 samt 1518 inte kunde mätas i det flygblocket för den metoden (figur 4).



Figur 4. Överblick över flygblocken samt referenspunkternas positioner.
Figure 4. Overview over the flight blocks and the measurement positions.

I Figur 5 syntes det hur bra drönarpunktmolnen genererats för de olika flygblocken. De flesta flygblocken hade en bra punkttäthet. Flygblock 5 hade däremot ett stort område på västra sidan där inte några punkter alls hade genererats. Även i flygblock 9 saknades det punkter i ett område, på östra sidan vid gränsen mot vattnet.



Figur 5. De genererade punktmolnen, samt en överblick över deras täthet.
Figure 5. The generated point clouds and an overview of their density.

Diskussion

Resultatet visade att den manuella metoden och ICP-metoden fungerade väl för att korrigera punktmolnet mot höjdmodellen. Root mean square error (RMSE) för manuella metoden var 1.06 m och för ICP 1.35 m. Barometermetoden hade ett RMSE på 7.95 m vilket är ett betydligt högre RMSE än de övriga två metoderna. En faktor som kan ha påverkat resultatet är hur jämna och täta punktmoln som genererades av programvaran. I de flygblock där punktmolnen hade luckor var det även en större skillnad mellan metoderna än i de flygblock där de var tätare. De flygblock som hade sämre kvalitet var flygblock 5 och flygblock 9. I de flygblocken fungerade ICP-metoden sämre än den manuella metoden. En förklaring till detta kan vara att täta punktmoln har mer markpunkter som kan matchas med höjdmodellen vilket resulterar i mindre skillnad mellan dessa. Då en del av punktmolnen inte genererade många punkter som kunde klassas som mark, blir resultatet färre markpunkter och därmed sämre matchning med höjdmodellen. X- och Y-koordinaterna flyttade sig även i dessa moln vilket innebar att punktmolnet blivit skevt och inte passade mot höjdmodellen.

Standardavvikelsen beräknades från skillnaden mellan RTK-GNSS-punkterna och motsvarande kontrollpunkter för alla flygblock och metoder. Standardavvikelsen påvisar att den manuella metoden resulterar i punktmoln som passar bäst till den verkliga höjden. Därefter kom ICP-metoden med högre standardavvikelse. Detta visar att den manuella metoden ger ett jämnare resultat än ICP-metoden vilket är eftertraktat då det korrigerade punktmolnet bör ha liknande tredimensionell orientering (3D-orientering) som höjdmodellen. Barometer metodens hade även den högsta standardavvikelsen på 1.79 vilket förstärker att det är den sämsta undersökta metoden.

Att kunna korrigera ett punktmoln genererat från drönarbilder med en höjdmodell kan vara till hjälp vid estimering av skogliga variabler från drönarbilder. Drönarbilder och drönardata har använts för att räkna ut skogliga variabler i andra studier (Lisein *et al.*, 2013; Torresan *et al.*, 2017). Vår studies resultat visar att dåligt positionerade punktmoln kan korrigeras ner till en acceptabel nivå. Det är dock svårt att få molnet att passa perfekt då drönaren har en annan 3D-orientering än Lantmäteriets höjdmodell. Tabell 3 visar att samma punktmoln följer liknande trend med avseende på RMSE än de övriga punktmolnen oavsett metod. Detta förstärker teorin om att punktmolnens 3D-orientering inte passar med höjdmodellens 3D-orientering.

Bohlin *et al.*, 2012b skriver att de fotogrammetriska modellerna kan uppnå liknande precision som ALS-modeller. Höjdskillnader runt 3 till 30 dm för den manuella metoden och ICP-metoden lär resultera i betydligt sämre skattningar av grunddata i jämförelse med ALS. Däremot tyder en del av RMSE på att skillnaden är liten nog för att användas som komplement eller vid uppdatering vilket tas upp av Vastaranta *et al.*, 2013; Bohlin *et al.*, 2012b. Figur 2 visar hur skillnaden i höjd mellan punktmolnen och höjdmodellen såg ut. Flygblock 1, 6 och 8 visar goda möjligheter till att användas effektivt för att skatta skogliga grunddata då dessa värden följer en relativt jämn trend då höjden korrigeras manuellt eller med ICP-metoden.

Den manuella metodens fördel är att det på ett enkelt och snabbt sätt går att ändra höjder genom att undersöka höjdskillnaden mellan två modeller och sedan korrigera drönarpunktmolnets höjd efter skillnaden. Då erhålls ett punktmoln med en bra korrigerad

höjd vid de punkter som undersökts. På övriga områden kan det finnas stora variationer eftersom dessa höjder inte undersökts. Svagheter med den manuella metoden är att den förlitar sig på den mänskliga faktorn för optimering av höjdkorrigeringen. Det är därför svårt att hitta vägar för att automatisera processen.

ICP-metoden får en jämnare höjdkorrigerings över hela dröarpunktmolnet eftersom det dröarpunktmolnet anpassats mot höjdmodellen. ICP kräver bra genererade markpunkter för att erhålla goda resultat. I de flygblock där det genererades bra punktmoln blev resultatet med ICP-modellen bättre än med den manuella metoden.

Att barometermetoden hade ett betydligt sämre resultat kan bero på att den inbyggda barometern kan vara felkalibrerad och därför registrerat fel altitud. Det innebär att när dröarpbilderna korrigeras efter barometerhöjden så får de en felaktig höjd över havet. När dessa bilder sedan används för att generera ett punktmoln så får även punktmolnet en felaktig höjd över havet. Detta kan tydligt ses i figur 2 där höjdskillnaden för denna metod är mycket högre än de resterande två metoderna.

För att den manuella metoden skulle fungera behövdes markens höjd över havet bestämmas. Detta gjordes i visualiseringsprogrammet (Applied imagery 2018) som redan används vid mätning av höjd på det korrigerade punktmolnet. En möjlig felkälla i detta var att en medelhöjd för området som punktmolnet täcker inte räknades ut. Istället mättes höjden på den antagna lyftpunkten för drönaren.

IPC metoden innefattar att punktmolnet kan förflytta sig i alla riktningar för att passa referensmodellen bättre. Då dröarpunktmolnen matchas direkt med höjdmodellen bör höjdskillnaden bli minimal mellan dem. Problemet är att det korrigerade dröarpunktmolnet kan förflyttas i sidled och kan roteras mot höjdmodellen. Detta innebär att punktmolnets mätpunkter inte korresponderar i X-Y och Z-koordinaterna gentemot kontrollpunkternas faktiska position. Utöver detta behövdes dröarpunktmolnet konverteras till ett markpunktmoln för att räkna ut en korrekt transformeringsmatris som sedan användes på dröarpunktmolnet. Problemet i detta är att flygningar över skogsmark med optiska bilder resulterar i dröarpunktmoln med ett krontak där markpunkter saknas. Vid brist på öppna ytor kommer metoden försämrats då det finns färre punkter att matcha, speciellt om de markpunkter som registreras finns klumpade i ett mindre område av punktmolnet. Många markpunkter med stor spridning är att föredra om metoden ska ge en rättvis bild över hur höjden ändras över området. Ett sätt att öka antalet markpunkter är att öka mängden bilder över det flygna området och därmed öka överlappet mellan dem.

Barometermetoden bygger på att höjden för drönarens startpunkt på marken är känd. I detta fall var starthöjden okänd när arbetet påbörjades. Likt den manuella metoden kan det tyckas idealt att drönaren noterar höjden över havet innan start. Men detta medför samma höjd fel som GNSS gör i luften. Detta medför extra steg i bearbetningen av data, vilket medför större risk för felaktigheter vid bestämning av markens höjd över havet. Även barometern kan visa fel höjd. Vid granskning av bildernas exif-filer kunde barometerns flyghöjd noteras och därmed skillnaden i flyghöjd mellan dem. Denna differens uppnådde endast en skillnad på \pm två dm på en flyghöjd omkring 120 m över marken. Då DJI Phantom 4 Pro är en relativt liten drönare så bör skillnaden vara större och då flygningarna genomfördes under tre dagar bör det ha förekommit vind som ändrar flyghöjden mer än detta.

En annan potentiell felkälla ligger i kontrollpunkternas positionering. Majoriteten av dessa var utsatta på vägar. Då dessa ofta ligger upphöjda från terrängen kan höjdmätningen av korrigerade moln bli aningen felaktiga om exempelvis punktmolnet skiftats i sidled vilket skedde i ICP-metoden. Detta blir även ett problem när kontrollpunkterna inte är utspridda i området så som i flygblock 5 där majoriteten låg i kanten av flygblocket. Även vid identifieringen av kontrollpunkterna kan det ha skett misstag. De punkter som var placerade på stenar ute på hyggen var svårare att identifiera då det användes vit färg vid markering. Detta i kombination med att solljuset reflekteras mycket mer på stenarna än på marken medförde att samtliga stenar fick ett vitt sken. Det är därför möjligt att fel sten mättes då flera stenar låg runt den angivna koordinaten.

Trots att den manuella metoden hade den bästa korrelationen mellan punktmolnet och höjddmodellen så kan ICP-metoden vara den bästa metoden att använda för höjddkorrektur. Detta eftersom det är lättare att automatisera hela processen, vilket påskyndar förloppet. ICP-metoden hade även de lägsta RMSE värdena för enskilda flygblock vilket tyder på att metoden kan bättre än den manuella metoden. Den manuella metoden är dock också en genomförbar metod då den har lägre standardavvikelse och lägre genomsnittligt RMSE än de andra metoderna.

REFERENSER

- AgiSoft PhotoScan Professional (Version 1.4.4) (Software). (2018). Available from <https://www.agisoft.com/downloads/installer/>
- Anon 2017. Phantom_4_Pro_Pro_Plus_User_Manual_EN.pdf. Available from: https://dl.djicdn.com/downloads/phantom_4_pro/20171017/Phantom_4_Pro_Pro_Plus_User_Manual_EN.pdf. [Accessed 2019-04-17].
- Albéri, M., Baldoncini, M., Bottardi, C., Chiarelli, E., Fiorentini, G., Raptis, K.G.C., Realini, E., Reguzzoni, M., Rossi, L., Sampietro, D., Strati, V. & Mantovani, F. (2017). Accuracy of Flight Altitude Measured with Low-Cost GNSS, Radar and Barometer Sensors: Implications for Airborne Radiometric Surveys. *Sensors (Basel, Switzerland)*, vol. 17 (8). DOI: <https://doi.org/10.3390/s17081889>.
- Baltsavias, E.P. (1999). A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 54 (2–3), pp. 83–94.
- Bohlin, J. (2017). Data Collection for Forest Management Planning Using Stereo Photogrammetry. Diss. Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences.
- Bohlin, J., Wallerman, J. & Fransson, J.E.S. (2012a). Forest variable estimation using photogrammetric matching of digital aerial images in combination with a high-resolution DEM. *Scandinavian Journal of Forest Research*, vol. 27 (7), pp. 692–699.
- Bohlin, J., Wallerman, J., Olsson, H. & Fransson, J.E.S. (2012b). SPECIES-SPECIFIC FOREST VARIABLE ESTIMATION USING NON-PARAMETRIC MODELING OF MULTI-SPECTRAL PHOTOGRAMMETRIC POINT CLOUD DATA. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vols. XXXIX-B8, pp. 387–391.
- Campbell, J.B. & Wynne, R.H. (2011). *Introduction to Remote Sensing. Fifth Edition*. New York: Guilford Press.
- CloudCompare (version 2.10.2) [GPL software]. (2018). Available from <http://www.cloudcompare.org/>
- Dandois, J.P. & Ellis, E.C. (2010). Remote Sensing of Vegetation Structure Using Computer Vision. *Remote Sensing*, vol. 2 (4), pp. 1157–1176.
- Eklundh, L., Harrie, L., Klang, D., Olsson, H., Ågren, J. (2013). Geografisk informationsbehandling: teori, metoder och tillämpningar. 6. Kapitel 5., [rev.] uppl. Lund: Studentlitteratur.

- Jensen, J.L.R. & Mathews, A.J. (2016). Assessment of Image-Based Point Cloud Products to Generate a Bare Earth Surface and Estimate Canopy Heights in a Woodland Ecosystem. *Remote Sensing*, vol. 8 (1), p. 50.
- Kraus, K. & Pfeifer, N. (1998). Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 53 (4), pp. 193–203.
- Lantmäteriet 2018. Kvalitetsbeskrivning nationella höjddata p. 24. Available from: https://www.lantmateriet.se/globalassets/kartor-och-geografisk-information/hojddata/kvalitetsbeskrivning_nh.pdf
- Lantmäteriet 2019. laserdata_nh_v2.6.pdf. Available from: https://www.lantmateriet.se/globalassets/kartor-och-geografisk-information/hojddata/laserdata_nh_v2.6.pdf
- Lisein, J., Pierrot-Deseilligny, M., Bonnet, S. & Lejeune, P. (2013). A Photogrammetric Workflow for the Creation of a Forest Canopy Height Model from Small Unmanned Aerial System Imagery. *Forests*, vol. 4 (4), pp. 922–944.
- Martin Isenburg, LASTools © 2011 - efficient tools for LiDAR processing. Version 190307, <https://rapidlasso.com/lastools/>.
- Næsset, E., Gobakken, T., Holmgren, J., Hyyppä, H., Hyyppä, J., Maltamo, M., Nilsson, M., Olsson, H., Persson, Å. & Söderman, U. (2004). Laser scanning of forest resources: the nordic experience. *Scandinavian Journal of Forest Research*, vol. 19 (6), pp. 482–499.
- Nyström, M. (2014) Mapping and monitoring of vegetation using airborne laser scanning. Diss. Umeå: Swedish University of Agricultural Sciences.
- Olsson, P.-O. (2009). Digitala höjddata och höjdsystem. Insamling av höjddata med fokus på flygburen laserskanning. p. 63.
- Quick Terrain Modeler (Version 8.1.0) (Software). (2018) Available from <http://appliedimagery.com/>
- Tang, L. & Shao, G. (2015). Drone remote sensing for forestry research and practices. *Journal of Forestry Research*, vol. 26 (4), pp. 791–797.
- Torresan, C., Berton, A., Carotenuto, F., Gennaro, S.F.D., Gioli, B., Matese, A., Miglietta, F., Vagnoli, C., Zaldei, A. & Wallace, L. (2017). Forestry applications of UAVs in Europe: a review. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 38 (8–10), pp. 2427–2447.
- Ullah, S., Dees, M., Datta, P., Adler, P. & Koch, B. (2017). Comparing Airborne Laser Scanning, and Image-Based Point Clouds by Semi-Global Matching and Enhanced Automatic Terrain Extraction to Estimate Forest Timber Volume. *Forests*, vol. 8 (6).

- Vastaranta, M., Wulder, M.A., White, J.C., Pekkarinen, A., Tuominen, S., Ginzler, C., Kankare, V., Holopainen, M., Hyyppä, J. & Hyyppä, H. (2013). Airborne laser scanning and digital stereo imagery measures of forest structure: comparative results and implications to forest mapping and inventory update. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 39 (5), pp. 382–395.
- Wehr, A. & Lohr, U. (1999). Airborne laser scanning—an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 54 (2–3), pp. 68–82.