

3D-UAV: Insamling av 3Ddata från3D-Lidar med mini-UAV som mätplattform

HÅKAN LARSSON, MICHAEL TULLDAHL

FOI-R--4045--SE ISSN 1650-1942 december 2014

Håkan Larsson, Michael Tulldahl

3D-UAV: Insamling av 3Ddata från 3D-Lidar med mini-UAV som mätplattform

Titel 3D-UAV: Insamling av 3D-data från 3D-Lidar med mini-UAV som mätplattform Title 3D-UAV: Collection of 3D-data from 3D-Lidar with mini- UAV as measurement platform Rapportnr/Report no FOI-R--4045--SE Månad/Month december Utgivningsår/Year 2014 Antal sidor/Pages 40 p ISSN 1650-1942 Kund/Customer FMV Forskningsområde 7. Sensorer och signaturanpassning FoT-område Sensorer och signaturannpassning Projektnr/Project no E54178 Godkänd av/Approved by Martin Rantzer Ansvarig avdelning Sensorer- och EW-system

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk. All form av kopiering, översättning eller bearbetning utan medgivande är förbjuden.

This work is protected under the Act on Copyright in Literary and Artistic Works (SFS 1960:729). Any form of reproduction, translation or modification without permission is prohibited.

Sammanfattning

Under 2014 har FMV finansierat projektet 3D-UAV: *Insamling av 3D-data från 3D-Lidar med mini-UAV som mätplattform*, på FOI kallat *3D:UAV*. Projektets syfte har varit att visa kapaciteten med 3D-avbildning med lidar från en liten UAV, typ multirotor. Laserskannern Velodyne HDL-32E lidar har integrerats elektriskt och mekaniskt på en multirotor, i vårt fall en hexakopter med en totalvikt på 7 kg. Små UAV:er har potential att bära små effektiva sensorsystem för militära uppdrag. I denna rapport presenteras nyttan och en del tilltänkta militära användningsområden för en lidar integrerad i en liten UAV.

Små UAVer (Unmanned Aerial Vehicles) är för närvarande i en snabb teknisk utvecklingsfas. Prestandan för systemkomponenter till UAVer, såsom tröghetssensorer, motorer, elektronik och algoritmer, förbättras gradvis. Samtidigt utvecklas lidartekniken i fråga om tillförlitlighet, noggrannhet, hastighet för datainsamling, datalagringsförmåga och bearbetningsprocesser. Dessutom har sensorernas både storlek och vikt kommit ner i sådana nivåer för att att de ska kunna bäras av en liten UAV. Lidarutvecklingen mot miniatyrsystem, med hög datainsamlingshastighet, ger tillsammans med senaste tidens utveckling av UAV:er, nya möjligheter till tredimensionell (3D) avbildning.

Jämfört med lidarkartering från fullstora bemannade flygplan, kan en liten obemannad farkost vara kostnadseffektiv över små geografiska områden (några tusen kvadratmeter) och mer flexibel att använda, lättare att lyfta och landa och har kortare ledtid. En skillnad med högupplöst lidar jämfört med 3D-kartering från passiv fotogrammetri är förmågan att tränga igenom vegetation, kamouflagenät och att upptäcka delvis skymda mål. En annan skillnad är att lidar har förmåga att se sneda/tunna objekt t ex ledningar, master, flaggstänger eller stag till master. Höguppöst lidar påverkas heller inte i samma grad av vind i träd som fotogrammetri kan påverkas av rörelseoskärpa. Ytterligare en skillnad är möjligheten att snabbt erhålla 3D-data över ett stort sökningsområde där passiv fotogrammetri kan ha en begränsad förmåga.

Nyckelord: lidar, UAV, systemintegration, punktmoln, militära användningsområden

Summary

In 2014, the Swedish Defence Materiel Administration (FMV) has funded the project *Collection of 3D data from Lidar with mini-UAV*, at FOI called *3D:UAV*. The project's aim has been to show the capacity of 3D imaging lidar from a small UAV, type multi-rotor. Small UAV's have the possibility to carry small efficient sensors for military missions. This report presents the mechanical and electrical integration of the laser scanner Velodyne HDL-32E lidar on a multirotor, in our case a hexacopter, with a total weight of 7 kg. The report presents some prospective military uses and contains experimental results.

Small UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) are currently in a rapid technological development phase. The performance of the system components for UAVs, such as inertial sensors, motors, electronics and algorithms, are gradually improving. Simultaneously the lidar technology is improved in terms of reliability, accuracy, speed of data collection, data storage capacity and processing. In addition, the sensor size and weight have decreased to reasonable levels to be carried by the small UAVs. The lidar development towards miniature systems, high-speed data acquisition, together with the recent development of UAVs, delivers new opportunities for three-dimensional (3D) imaging.

3D lidar imaging from a small unmanned vehicle compared to full-sized manned aircraft is more cost effective over small geographic areas (a few thousand square meters) and more flexible to use, easier to take off and land. One difference between high resolution lidar compared to 3D mapping from passive photogrammetry is the ability to penetrate vegetation and to map and detect partially obscured targets. Another difference is the lidar ability to detect oblique surfaces and thin structures such as masts, flagpoles, and struts to masts. High resolution lidar is less affected by wind in trees than photogrammetry which can suffer from image motion blur. Another difference is the ability to quickly obtain 3D data over a large search area where passive photogrammetry in low-contrast areas can have a limited capability.

Keywords: lidar, UAV, system integration, point clouds, military applications

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
2	Nyttan och tillämpningar med lidar-UAV	8
2.1	Lidar-UAV i jämförelse med andra lidarkoncept	8
2.2	Lidar-UAV i jämförelse med fotogrammetri	11
2.3	Lidar-UAV och tillämpningar	12
3	Experimentellt system	20
3.1	Multirotor Tarot-810 hexakopter	20
3.2	Lidar Velodyne HDL-32E	21
3.3	Integrationen av lidar i multirotor	23
4	Databearbetning	24
5	Experimentell utvärdering	26
5.1	Laborativ utvärdering av Velodyne HDL-32E	26
5.2	Utvärdering av flygning över vegetation	26
5.3	Utvärdering av urbana miljöer	27
6	Diskussion och slutsatser	32
7	Referenser	33

FOI-R--4045--SE

1 Inledning

Att ha kunskap om omgivningen är viktigt vid militära operationer för att exempelvis kunna bestämma framryckningsvägar och för att upptäcka hot. Informationsinhämtning i okända miljöer är ett av de farligaste momenten för marktrupper. Den tekniska utvecklingen av UAVer och den utveckling vi ser av sensorer till små miniatyriserade sensorsystem ger nya möjligheter att sända fram sensorer för spaning före, efter och i samband med insats. En nedlänkad kamerabild till en operatör ger viss information, men det kan vara svårt att uppfatta hot som är dolda i vegetation eller placerade i djup skugga, eller bakom persienner, att särskilja objekt från en bakgrund med liknande färg eller att avgöra hur svårpasserbart ett hinder är. Möjligheten att bygga upp tredimensionella miljöer från foton är idag god avseende tydligt synliga mål, exempelvis hus i urbana miljöer, men har brister i vegetationsmiljöer, delvis skymda mål och tunna strukturer. En skillnad mellan högupplöst lidar ("Light Detection and Ranging") och 3D-kartering från foton är förmågan att tränga igenom vegetation och att upptäcka delvis skymda mål. En annan skillnad är att lidar har förmåga att se sneda/tunna objekt t ex ledningar, master, flaggstänger eller stag till master. Höguppöst lidar påverkas heller inte i samma grad av vind i träd som fotogrammetri som kan påverkas av rörelseoskärpa. Ytterligare en skillnad är möjligheten att snabbt erhålla 3D-data över ett stort sökningsområde där passiv fotogrammetri kan kräva mer databehandling i låga kontrastområden. Tredimensionell data mätt med ett lidarsystem ger stora möjligheter till avbildning i svåra miljöer eftersom laserstrålen penetrerar även små hål i vegetation och separerar ytor på olika avstånd. I urbana scenarier kan lidartekniken sägas komplettera fotogrammetri då lidartekniken bättre avbildar tunna strukturer och detaljer (exempelvis master och tunna staket), medan fotogrammetri är bättre för att modellera byggnader till ytor med textur. En lidarsensor har med sig sin egen belysning och kan med fördel samla in data i mörker; sensorplattformen kan då behöva då bestyckas med en IR- eller lågljuskamera för stöd till piloten.

Små UAVer (Unmanned Aerial Vehicles) är för närvarande i en snabb teknisk utvecklingsfas. Prestandan för systemkomponenter till UAVer, såsom tröghetssensorer, motorer, elektronik och algoritmer, förbättras gradvis. Samtidigt utvecklas lidartekniken i fråga om tillförlitlighet, noggrannhet, hastighet för datainsamling, datalagringsförmåga, och bearbetningsprocesser. Dessutom har sensorernas både storlek och vikt kommit ner i rimliga nivåer för att kunna bäras av en liten UAV. Lidarutvecklingen mot miniatyrsystem, med hög datainsamlingshastighet, ger tillsammans med senaste årens utveckling av små UAVer, nya möjligheter till tredimensionell (3D) avbildning. Laserskanning från multirotor är ett mycket lovande sensorkoncept med stor nytta för militära tillämpningar (Henriksson, M. et. al (2014)).

Under 2014 har FMV finansierat projektet *Insamling av 3D data från Lidar med mini-UAV*, på FOI kallat *3D:UAV*. Projektets syfte har varit att visa kapaciteten med 3D-avbildning med lidar från en liten UAV, typ multirotor. Laserskannern Velodyne HDL-32E lidar har integrerats på en multirotor, i vårt fall en hexakopter, med en totalvikt på 7 kg. I denna rapport presenteras en del tilltänkta militära användningsområden för en lidar integrerad i en liten UAV och nyttan med det data den kan generera i form av punktmoln. Algoritmer kan filtrera data för att stötta operatören. Rapporten beskriver elektrisk och mekanisk integration i multirotorn, databearbetning och experimentell utvärdering. I Appendix A sammanfattas databearbetningen matematiskt.

2 Nyttan och tillämpningar med lidar-UAV

2.1 Lidar-UAV i jämförelse med andra lidarkoncept

Användningen av tredimensionell (3D) sensordata blir mer och mer vanlig både civilt och militärt. Senaste tidens utveckling av små lätta UAVer och miniatyriserade lätta lidarsensorer har öppnat möjligheter för en ny typ av luftburet lidarsystem som lätt kan komma upp i luften och som är effektiv för insamling av data med hög punkttäthet. På den kommersiella marknaden har det tills i år, 2014, funnits tre inmätningsmetoder baserade på laserskanning för 3D-avbildning och kartering. Dessa är

- markbaserad laserskanning,
- bemannad flygburen laserskanning,
- bilburen laserskanning,

och från 2014 är laserskanning från små UAV:er den fjärde inmätningsmetoden.

De olika inmätningsmetoderna kompletterar varandra för olika tillämpningar, så det går inte att säga att den ena generellt är bättre än den andra, men för givna tillämpningar går det att prata om för- eller nackdelar. Då datainsamling sker under rörelse, vilket är fallet från flyg, bil och från små UAV:er, måste lidarsensorns rörelser och position mätas kontinuerligt. Rörelser och position mäts med tröghetsnavigering och GPS. För laserskanning från flyg, bemannad eller från liten UAV, inkluderas också en höjdmätare.

Laserskanning var kommersiellt först ut som bemannad flygburen sådan och i mitten på 90-talet kom det första kommersiella flygburna lidarsystemen. Insamlade punktmoln från bemannad flygande laserskanning är i jämförelse med andra lidarsystem tämligen glesa, men tillräckligt noggranna (dm) och dessutom kan stora arealer mätas in snabbt (flera km² under en flygning). Vilken täthet som kan erhållas på marken beror på flera parametrar, laserskott per sekund, laserstrålens avlänkningshastighet, flyghöjd och flyghastighet. Generellt kan sägas att punkttätheten i bästa fall är några tiotal punkter per m². En ökad punkttäthet blir på bekostnad av ett mindre täckningsområde per timma. Figur 1 visar punktmolnsexempel från flygburen laserskanning. Möjligheten att penetrera vegetationen uppifrån gör att många punkter når marken och eventuella mål. En översikt över kommersiella system för flygburen laserskanning finns i (Petrie, G., 2011).



Figur 1. Flygburen laserskanning. Vänster bild är punktmolnet av ett skogsparti rakt uppifrån, överst till höger samma punktmoln uppvridet (färgerna anger höjd). Nedre bilden till höger är ett tvärsnitt genom skogen, 0,5 m brett, markerad med ett svart streck i vänster bild. Exemplet är från flygningar med lidarsystemet Optech Gemini.

I början av 2000-talet kom de första kommersiella markbundna laserskannrarna, vilka idag kan mäta med en noggrannhet ner mot ett par mm. Ofta är färgkamera integrerad för att erhålla färgtextur. De markbundna laserskannrarna är de mest noggranna, men de måste också vara stillastående under mätning, vilket gör metoden tidskrävande. Figur 2 visar den detaljrikedom och fotografiska 3D som kan fås med en markbaserad laserskanner.



Figur 2. Markbaserad laserskanning. Övre vänster bild visar laserintensitet, övre höger pålagt höjdfilter i två cykler och bilden underst pålagd färgtextur. Avståndsnoggrannheten är ca 5 mm. Exemplet är från mätningar med den markbaserade laserskannern Riegl VZ-400.

Bilburen laserskanning introducerades på marknaden 2007. Liksom bemannad flygskanning kan insamlingen från bil ske snabbt under det att plattformen rör sig. Jämfört med bemannad flygskanning ger bilburen laserskanning mycket tätare punkttäthet på marken och i fordonets omedelbara närhet, men glesas snart ut vid sidan om färdvägen. Bilburen laserskanning används med fördel vid vägkartering. Figur 3 visar exempel på bilburen laserskanning. En omfattande översyn av mobila laserskannrar finns i (Puente, I. et al., 2013).

Att lyfta en laserskanner några fåtal meter över marken skapar en ny typ av punktmoln, insamlat med optimal vinkel mot marken, med en markant ökad punkttäthet på marken jämfört med bemannad flygskanning och ett relativt större avsökningsområde än vad bilburen eller bemannad flygskanning kan erbjuda, se Figur 4 och Figur 5. Jämfört med lidarkartering från fullstora bemannade flygplan, kan en liten obemannad farkost vara kostnadseffektiv över små geografiska områden (några tusen kvadratmeter) och mer flexibel att använda, lättare att lyfta och landa och har kortare ledtid. Dessutom får laserskanning från UAV anses vara den klart billigaste, tillräckligt billig för att eventuellt gå förlorad. Det finns flera användningsområden där små UAV:er kan användas som sensorplattform åt lidar och bidra med värdefull data. Tredimensionella lidardata kan användas för

geologi, arkeologi, stadsplanering, terrängkartering, skogsbruk, säkerhetstillämpningar, sökning och räddning och inom försvarssektorn. Inom försvarsektorn är tekniken tillämpbar för att erhålla en snabb lägesbild (för t ex framryckning eller för forensisk inmätning). På grund av att en lidar kan penetrera skyl ges möjligheten att detektera mål bakom exempelvis vegetation och kamouflage eller att titta in i byggnader genom fönster.



Figur 3. Bilburen laserskanning. De gula pilarna visar den bilburna sensorplattformens rörelseriktning. Den övre bilden visar miljön visuellt och den undre bilden ett uppvridet punktmoln snett uppifrån. Notera hur glest punktmolnet blir bara några meter bredvid färdriktningen, men att tätheten är god nära sensorplattformen. Exemplet är från mätningar med lidarsensorn Optech Lynx.



Figur 4. Flygburen laserskanning från UAV. Vänster bild visar ett punktmoln från en flygning på 3-4 meters höjd, ca 10 sekunders flygning. Redan denna förhållandevis låga flyghöjd gör att punktmolnet breddas avsevärt i marknivå jämfört med laserskanning från marken (1,5 meters höjd). Gul ellips markerar en asfaltssträcka på ca 30 m mätavstånd, en yta som normalt anses svår att avbilda från marknivå, på grund av dess låga reflektans. Här har asfalten detekterats genom den ökade infallsvinkeln mot markytan. Exemplet är från en av de första flygningarna med laserskanner Velodyne HDL-32E integrerad i multirotor.



Figur 5. Vänster kolumn visar ett efterbehandlat punktmoln (färgen visar höjdinformation) insamlat från multirotorn (pilen markerar flygriktning och den ungefärliga sträcka mätdata samlades in). Höger kolumn visar motsvarande yta insamlad i marknivå med en markbaserad laserskanner. Notera skillnaden i punkttäthet i de markerade ellipserna. Punkttätheten är mycket tätare för data som samlats in från multirotorn även om flyghöjden endast är 3-4 meter.

2.2 Lidar-UAV i jämförelse med fotogrammetri

Fotogrammetrins utveckling har, liksom utvecklingen av lidarsensorer, även den gått snabbt de senaste åren. Foton tagna från en multirotor eller annan bemannad flygfarkost kan kombineras till en 3D-modell. Det svenska företaget Spotscale¹ genererar 3D-modeller utifrån foton. I urbana scener och för att avbilda huskroppar är tekniken mycket användbar, se Figur 6. Detaljer måste dock handmodelleras och beroende på detaljrikedom kan en modell ta från timmar till flera dagar att generera. Tekniken har svårt med tunna strukturer såsom finmaskiga nät, tunna stolpar och master, fina detaljer samt vegetation, vilket laserskanning klarar bra. Figur 7 visar problematiken med vegetation där trädens form dras ner från trädens översida direkt ner till marken. Vidare har fotogrammetri svårt att urskilja skuggiga partier, där ett laserbaserat system bär med sig sin egen belysning och avbildad miljö från lidar blir skuggfri, se Figur 8. Fotogrammetrin får också svårigheter med dis och dimma, där laserbaserade sensorer klarar detta bättre. Tekniken fotogrammetri och laserskanning från UAV kommer förmodligen att kunna komplettera varandra bra i framtiden.



Figur 6. 3D-modell framtagen utifrån foton tagna från en multirotor (Bild från Spotscale¹).

¹ www.spotscale.com



Figur 7. Utsnitt av en fotogrammetrisk 3D-modell. Notera hur vegetation avbildas utifrån foton. Buckligheten på vegetationen kommer av att kameror enbart ser bildpunkter på ytan. (urklipp från www.swescan.se)



Figur 8. Vänster bild visar en visuell bild där en stor del av scenen ligger i skugga med svåra kontraster. Höger bild visar samma scenario laserskannat, där punktmolnet blir skuggfritt.

2.3 Lidar-UAV och tillämpningar

Inom försvarssektorn kan 3D-informationen i insamlade punktmoln användas för olika tillämpningar såsom detektering och segmentering, klassificering, spaning och för att spåra mål. Att erhålla en snabb lägesbild är en annan viktig applikation. Eftersom en lidarsensor ofta kan mäta multipla ekon kan den också penetrera exempelvis vegetation. Figur 9 är en bildserie från Riegl² som visar styrkan med laserskanning från luften och den lagerinformation som kan presenteras på olika vis. I den vänstra kolumnen visas tre olika sätt att texturera och visualisera punktmoln, laserintensitet, färgtextur och höjdinformation. Den högra kolumnen visar tre olika sätt att presentera markinformationen, överst en terrängmodell färglagd efter reflektans, i mitten en markmodell inkluderat markerosion (se det mörkbruna området) och den undre bilden visar buskar (röda områden) och döda träd (gula). Markmodellen med inkluderad erosion och markmodellen innehållande buskar och träd

² www.riegl.com

kräver analys för slutligt resultat. Data till bildserien har samlats in med lidarsensorn Riegl VUX-1³, som släpptes i september 2014. Riegl har integrerat sensorn i en UAV (RiCOPTER) med en vikt på knappt 25 kg.



Figur 9. Vänster kolumn visar hur punktmoln kan textureras, överst laserintensitet, mitten färginformation från visuell kamera, underst höjdinformation från marknivå. Höger kolumn visar estimerad mark, överst markinformation baserad på reflektans, mitten ytmodell som inkluderar erosion, underst detekterade buskar och döda träd. (Bilder <u>www.riegl.com</u>)

2.3.1 Penetration och detektion

Figur 10 visar en scen av ett skogsparti vari tre stridsvagnar placerats. Visuellt går det att se stridsvagnen som står öppet på fältet till vänster om skogen. Ytterligare två stridsvagnar står gömda inne i vegetationen. Ett exempel på processen för detektion av dessa visas i Figur 11. Automatisk detektion av stridsvagnarna görs genom att estimera fram marken, behålla alla punkter tre meter över marken (höjdregion vari stridsvagnar befinner sig), dela in punktmolnet i kuber och titta på fördelningen (många punkter inom en kub tyder på ett hårt mål). Då erhålls ett punktmoln som reducerats avseende punkter och som fortfarande innehåller eventuella mål. Genom att behålla marken som en referensnivå 0 och sedan lägga på ett färgfilter som visar höjd kommer stridsvagnarna fram i dager. Dataexemplet i Figur 10 och Figur 11är insamlat med en markbaserad laserskanner placerad i ett 100 m högt torn. Penetration kan också utföras in genom fönsterutor (till och med genom persienner, dock måste ett minimalt gap finnas mellan persiennlamellerna, eller genom tunna gardiner), se Figur 12. Att hovra utanför eller passera sakta utanför ett fönster skulle generera en avbild interiört av rummet innanför.

³ www.riegl.com/products/uasuav-scanning/



Figur 10. Bilderna visar ett scenario insamlad med en markbaserad laserskanner placerad i ett ca 100 m högt torn. Den övre bilden till vänster visar scenariot sett från laserskannerns position. Tre stridsvagnar var placerade i detta skogsparti.



Figur 11. Automatisk detektion av stridsvagnar i ett skogsparti (se Figur 10). Övre bilden visar det ofiltrerade punktmolnet. Bilden i mitten är punktmolnet filtrerat med marken estimerad, alla punkter från marknivå och 3 m däröver, och likaså punkter inkluderade i kuber med många antal punkter. Den nedre bilden är höjdvisualiserad från marknivå och då kommer tydligt de två stridsvagnarna fram. Exemplet är från en skannande laser från en position (Bilder FOI). En lidar i en UAV skulle generera betydligt fler punkter både på marken och på målen.



Figur 12. Exempel av ett punktmoln insamlat med markbaserad laserskanning där datainsamlingen skett från flera positioner utanför en byggnad. En stor del av byggnaden är avbildad även interiört. En UAV skulle kunna avbilda en byggnad interiört genom att hovra eller passera fönster även flera våningar upp.

2.3.2 Förändringsanalys

Förändringsanalys kan utföras genom att jämföra två punktmoln av samma scen, som är separerade i tid. Tidsskillnaden är godtycklig, från sekunder till dagar. För att kunna hitta förändringar måste först de två punktmolnen registreras (överlagras). Punktmolnen delas sedan in i kuber, så kallade voxlar. En jämförelse inom respektive voxel görs sedan avseende antalet, om det tillkommit eller försvunnit punkter. Det går också att titta på tyngdpunkten av punkter inom en voxel eller grannvoxlarna för att inte detektera exempelvis en svajande gren eller lövverk som en förändring. På så vis detekteras i detta fall de stora förändringarna, se Figur 13. Mindre objekt som IED:er (Improvised Explosive Devices) kan i stort sätt använda samma typ av algoritmer för att hitta IED:erna som förändringar i ett punktmoln. Skillnaden är att mindre voxlar till storleken används. Figur 14 visar hur en mindre tunna har detekterats som en förändring. Det kan finnas möjlighet att hitta förändringar ner till IED:er i storleksklass 1 dm³. På FOI undersöker vi om det går att detektera förändringar av störd jord med lidar, vilket kan indikera nedgrävd IED. Två överlagrade punktmoln, det senare efter att något grävt i vägbanan, visar att det visuellt går att skönja en förändring genom att enkelfärga punktmolnen. Figur 15 visar ett sådant scenario där en förhöjd täthet av den ena färgen tyder på tillagd jord och den andra färgen borttagen jord. Så länge vi inte har någon förändring befinner sig de båda punktmolnen i varandras brus. Försök till automatiserade algoritmer för detektion av störd jord är under framtagning av FOI.



Figur 13. Bilderna till vänster visar två punktmoln insamlade vid två olika tidpunkter. Vilka förändringar finns mellan de två punktmolnen? Resultatet visar nederst till höger där alla förändringar visas genom att lägga på ett höjdfilter på de punkter som är förändrade. Detta är en automatgenererad process. Vi kan se en pickup överst i bilden, ett par personer på fältet och en stridsvagn som kör ut ur skogen. Övre höger bild är en visuell bild tagen vid den senare tidpunkten. Exemplet är från en skannande markbaserad lidar placerad i ett 100 m högt torn.



Figur 14. Förändringsanalys av små objekt, typ IED. I stort sett används samma algoritmer som det beskrivna scenariot i Figur 13. I den övre högra bilden pekas förändringen ut med röd färg. Detta är en automatgenererad process. Punktmolnen samlades in från en bilburen lidar.



Figur 15. Störd jord. Avseende förändringsanalys torde detta vara det svåraste en lidarsensor kan ge sig på. Exemplet är insamlat med en markbaserad lidar. Resultatet nere till höger visar förändringarna, här endast visuellt och detta är inte automatgenererat. För att kunna detektera så små förändringar som störd jord krävs en vidareutveckling av algoritmer för förändringsanalys.

2.3.3 Lägesbild

Vid militära incidenter och inhämtning av underrättelseinformation (bakhåll, improviserade sprängladdningar (IED), avbildning av materiel, skadeutfall, fordon, byggnader) är det värdefullt att samla in korrekt information, på plats och så snabbt som möjligt för att minska risken för personalen. Snabb ledtid och snabb datainsamling kan också vara till nytta i många civila tillämpningar (trafikolyckor, skadebedömning efter extremt väder, och sjöräddning). I ett tidigare transferprojekt provades den handhållna laserskannern Mantis Vision F5 ut (Larsson H. och Letalick D. 2012). Den visade sig vara användbar för forensiska tillämpningar för att samla in högupplöst geometri med en noggrannhet på sub-mm. De geometriska resultaten insamlade över ett och samma område med olika lidarteknologier och olika upplösningar går alldeles utmärkt att fusionera. En sprängd bil skulle exempelvis lokalt kunna mätas in forensiskt med en handhållen skanner medan ett större område, med bilen inkluderad, skulle kunna mätas in med en lidar från en UAV och data sedan fusioneras, se Figur 16. En användbar applikation för militären är siktfältsanalys. Från utpekad position visas det område som har fritt synfält från denna position. Detta kan exempelvis vara användbart för att avgöra varifrån en krypskytt skulle kunna skjuta mot denna position, se Figur 17.



Figur 16. Det geometriska resultatet från ett område går att kombinera med olika lidarteknologier (eller med fotogrammetri). En sprängd bil kan mätas in lokalt med en handhållen laserskanner, medan helheten kan mätas med en lidar monterad i en UAV. (Nedre bilden från www.phoenix-aerial.com/)



Figur 17. Siktfältsanalys. Den gula punkten markerar en position. Det gröna fältet visar det fria siktfält som uppnås från denna position.

2.3.4 Datafusion med andra EO-sensordata

Vi har tidigare visat att färgerna från en visuell kamerabild kan drapera punktmoln (se Figur 2). Genom att integrera andra EO-sensorer tillsammans med en lidar i en UAV, exempelvis termisk kamera eller hyperspektral kamera kan dessa drapera punktmolnen. På detta vis kan vi uppnå termisk 3D, eller hyperspektral 3D. Både termisk och hyperspektral information tillför mycket för att detektera mål. Hyperspektral sensor mäter varje pixel spektralt i det visuella våglängdsbandet och en bit upp i när-IR (NIR). Varje material har sin unika spektralkurva (likt ett fingeravtryck) och på så vis kan exempelvis ett kamou-flagenät separeras från vegetation eller ett vapen separeras från marken, se Figur 18 för detektion av röda bilar.



Figur 18: Hyperspektral avbildning. Färgerna visar ytmaterialklassning. Röda bilar har detekterats.

3 Experimentellt system

I projektet "Insamling av 3D data från Lidar med mini-UAV" har vi haft till uppgift att integrera en lidar i en multirotor. Valet av lidar var tämligen enkelt då Velodyne HDL-32E⁴ var den enda laserskannern på marknaden, vid tiden för projektets start, som var tillräckligt liten och tillräckligt lätt. Valet av multirotor blev hexakopter Tarot-810 för att den kan ta med sig tillräcklig nyttolast och är stark nog.

3.1 Multirotor Tarot-810 hexakopter

Den Tarot-810⁵ hexakopter som använts, se Figur 19, är en flygfarkost med sex borstlösa elmotorer (Turnigy 4830), vilka matas av varsitt fartreglage (Hobbywing). Motorerna drivs av ett Litium Polymer batteri (LiPo, 22.2V, 6Ah) och elektroniken på ett annat LiPobatteri (11.1V, 1.4Ah). Elektroniken spänningsmatas med 5V och 12V via två switchade omformare. Den totala vikten är 7,0 kg (varav 1.1 kg är batterier och 2.4 kg nyttolast). Nyttolasten inkluderar Velodyne lidar, vibrationsdämpning, lidar gränssnittsbox, trådlöst Ethernet-modem, och monteringsdelar. Maximal dragkraft för varje motor är 2.4 kg eller ca 14 kg för alla motorer tillsammans. Hexakoptern hovrar vid cirka 50 % av full motordragkraft. Rotorhastigheten vid hovring är ca 3600 varv per minut. Som flygdator (Flight Controller - FC) används den öppna hårdvaran APM⁶ (ArduPilot Mega), version 2.6 från 3DRobotics⁷ med öppen källkod, firmware version 3.1.3. APM/FC (APM/Flight Controller) är monterad nära farkostens tyngdpunkt och används med en 3DR uBlox GPS/kompassenhet (även den från 3DRobotics) monterad på en plattform ca 20 cm ovanför chassit för att minska elektromagnetiska störningskällor från motorer och elektroniken. Vi har även använt en andra APM för att utnyttja dess data för geometrisk bearbetning av lidardata. Denna andra APM benämner vi APM/INS. APM/INS (Inertial Navigation System) innehåller MEMS (Microelectromechanical systems) IMU-sensorer (Inertial Measurement Unit) sensorer med 3-axliga gyron och accelerometrar, en trycksensor för höjdmätning och en 3DR uBlox GPS/Kompass monterad på den upphöjda plattformen i likhet med APM/FC. INS-data skickas kontinuerligt till en markstation (en laptop) via en radioförbindelse (3DRobotics, 433 MHz) och presenteras för flygoperatören och sensoroperatören kontinuerligt via gränssnittet Mission Planner,⁸ se Figur 20.



Figur 19. Hexakopter Tarot-810 med lidar Velodyne HDL-32E.

⁴ www.velodyne.com

⁵ www.tarot-rc.com

⁶ www.ardupilot.co.uk

www.3drobotics.com

⁸ planner.ardupilot.com



Figur 20. Gränssnitt av Mission Planner, som innehåller information från hexakopterns APM. Gränssnittet länkas ned till marken både till flygoperatör och sensoroperatör.

3.2 Lidar Velodyne HDL-32E

Velodyne HDL-32E (Figur 21) bygger på pulsad flygtidsmätning (pulsed ToF - Time-of-Flight). Lidarn detekterar det starkaste ekot från varje laserpuls. Det betyder att detektion av delvis skylda objekt kan vara möjlig från ett laserskott (beroende på träffade ytors reflektans och laserns stråltvärsnitt). HDL-32E innehåller 32 laser/detektorpar, som är vertikalt åtskilda i steg om 1.33° och täcker stående ett vertikalt synfält (FOV) från ungefär +10° till -30°. Så länge HDL-32E står still en position erhålls kontinuerligt 32 pulsade linjer, se Figur 22. Skannern roterar kontinuerligt 360° och är selekterbar mellan 300 till 1200 varv per minut (rpm). Ju snabbare skannern roterar desto glesare punktfördelning erhålls horisontellt, men det leder i sin tur till en tätare fördelning i vertikal ledd under flygning (framåt i flygriktning). Hur tät den vertikala fördelningen blir beror på UAV:ns flyghastighet och flyghöjd och kan vid låga hastigheter och låg flyghöjd bli mycket tät. Velodyne HDL-32E avger 700000 punkter per sekund. Vidare mäter den med kalibrerad reflektans vilket innebär att det intensitetsvärde respektive punkt erhåller har avståndskompenserad intensitet. För att sammanfatta så ska exempelvis torrt gräs alltid presenteras med ett specifikt värde oberoende av mätavståndet. De viktigaste parametrarna för Velodyne HDL-32E är sammanfattade i Tabell 1. För överföring av lidardata till markstationen använder vi en trådlös 5.8 GHz Ethernetbrygga och samlar in data med mjukvaran WireShark.



Figur 21. Laserskanner Velodyne HDL-32E.



Figur 22. I en statisk situation (stillastående skanner) erhålls kontinuerligt 32 pulsade 360°-linjer. Exemplet visar resultatet av en huskropp från en rotation. Då skannern sätts i rörelse måste denna mätas med tröghetsnavigering, höjdmätare, kompass och GPS.

Tabell 1. Specifikation för laserskanner Velodyne HDL-32E

Laservåglängd	905 nm (klass 1 ögonsäker)		
Laserpunkter per sekund	Ungefär 700 000		
Mätavstånd	1 till 70 m		
Detektorer	32 laser/detektorpar		
Synfält (Field Of View - FOV)	+10.67° till -30.67° FOV (vertikal)		
	360° FOV (horisontell)		
Horisontell rotationshastighet	5-20 Hz (300 till 1200 varv per minut)		
Vinkelupplösning	~1.33° i vertikal ledd		
	~0.08° till 0.32° (300 till 1200 rpm)		
Avståndsnoggrannhet	<2 cm @ 25 m avstånd (one sigma)		
Dimensioner	149.86 × 85.3 mm		
Sensorvikt	1.3 kg		

3.3 Integrationen av lidar i multirotor

Vi har monterat Velodynelidarn i hexakoptern och integrerat den i farkosten både elektriskt och mekaniskt. Vi har valt att luta skannern 20° för att erhålla många punkter på marken från luften (FOV -10° till -50° i förhållande till horisonten i farkostens framåtriktning; 0° anger multirotorns horisontella normalvinkel), se Figur 23. Vi har för tillämpningen, insamling av 3D data från mini-UAV, valt 600 rpm för att erhålla en kompromiss på fördelningen av punkter både vertikalt och horisontellt. Vi har då möjligheten att mäta exempelvis trädvegetation med flygriktning rakt fram, samtidigt som vi erhåller många punkter på marken. De 700000 avgående punkterna per sekund är fördelade på 32 lasrar och 10 varv per sekund, vilket resulterar i en horisontell punkttäthet på 0.16 grader. Vi har begränsat synfältet till $\pm 105^{\circ}$ från framåtriktningen av farkosten, för att undvika reflektioner från hexakoptern själv.



Figur 23. Schematisk ritning av den mekaniska integrationen av Velodynelidarn och INS.

För att kunna mäta med Velodynelidarn under rörelse måste både dess rörelse och orientering mätas kontinuerligt, vilket vi gör med extern tröghetsnavigering (APM/INS). INSsensorerna består av accelerometrar, gyron, GPS, magnetometrar och en trycksensor för höjdmätning. Velodynelidarn innehåller i sin tur en IMU (3-axligt gyro och accelerometrar) som används för synkronisering med APM/INS vilket beskrivs i kapitel 4.

Mätdata från Velodynelidarn länkas ner till marken via en Ethernetbrygga på 5.8 GHz. Data från APM/INS länkas till marken på 433 MHz. Lidardata sänds som två nätverksprotokoll (User Datagram Protocol (UDP)) vilka skickas som hexkodade paket, ett för lidardata och ett för interna IMU- och GPS-data. Dessa IMU- och GPS-data är internt tidsynkroniserade i lidarn.

Efterbearbetningen utförs i flera steg, enligt beskrivning i kapitel 4. Slutprodukten av efterbearbetningen blir ett punktmoln angivet i globala xyz-koordinater och intensitetsvärden.

4 Databearbetning

I detta kapitel beskrivs förenklat den efterbearbetning av nedlänkad data som görs för att erhålla ett punktmoln i ett geografiskt koordinatsystem. En mer detaljerad beskrivning återfinns i Appendix A och i ref. (Tulldahl, M och Larsson, H., 2014). Vi har implementerat en bearbetningsmetod där varje uppmätt avståndsvärde transformeras i en flerstegsprocess till en geografisk position enligt schemat som visas i Figur 24. Vi kommer här beskriva dessa steg. Steg 1 - Steg 3 anser vi vara standardmetod för liknande sensorsammanhang (t ex bemannad flygburen laserskanning) och Steg 4 är en egen utveckling som vi gjort där laserdata används för att förbättra precisionen i bearbetat data.



Figur 24. Schematisk beskrivning av bearbetning av sensordata för framtagning av geografiskt refererat punktmoln.

Laserskannern Velodyne kan betraktas som en roterande laseravståndsmätare. I det första steget används rotation- och elevationsvinklar från lidarn tillsammans med avståndet för att placera punkten i ett (x,y,z)-koordinatsystem lokaliserat i centrum av laserskannern. Steg 1 kan göras oberoende av tid eftersom vi utnyttjar vinkelmått som levereras direkt ut från Velodynelidarn. Synkronisering av varje punkts avstånd, rotation- och elevationsvinklar görs internt i lidarn.

I steg 2 förflyttas punkten så att den placeras i ett koordinatsystem som är placerat i och linjerat med APM/INS, som vi använder data ifrån för nästkommande steg 3. Steg 2 kan göras oberoende av tid eftersom monteringen av lidarn i förhållande till INS ska vara fast. I steg 2 görs dels en rotation av punkten baserat på tiltvinkeln framåt (20 grader i vårt fall) och dels en förflyttning (translation) nedåt (16 cm, enligt Figur 23). Dessa mått är alltså tagna från den ritning som beskriver hur vi monterat lidarn i förhållande till INS.

I steg 3 utnyttjar vi de lokaliseringsdata som levereras av INS. Med lokaliseringsdata avser vi här position (latitud, longitud, höjd) och orientering (roll, pitch, yaw). Baserat på lokaliseringsdata, förflyttas punkten till ett geografiskt refererat koordinatsystem och blir alltså

FOI-R--4045--SE

en punkt som har sin position angiven i latitud, longitud och höjd. Eftersom plattformen rör sig måste lokaliseringsdata hela tiden uppdateras. Vi har förnärvarande använt en uppdatering med tidssteg 0.01 s, vilket som exempel motsvarar 5 cm förflyttning vid en hastighet av 5 m/s. Vid hög plattformshastighet eller snabba plattformsrörelser kan ett kortare tidssteg vara motiverat om tillämpningen kräver hög noggrannhet i bearbetat data.

Att använda enbart lokaliseringsdata från INS ger upphov till ett grovinriktat punktmoln med fel upp till flera meter. I steg 4 förbättrar vi precisionen i geografiskt refererade data från steg 3. Denna delprocess kallar vi för dynamisk kalibrering. Vi utgår då från en sekvens av data, vilket innebär en mängd punkter (ett punktmoln). I vår nuvarande version av metoden använder vi datasekvenser med 0.1 s tidssteg. Eftersom insamlingstakten är hög motsvarar 0.1 s flera 10-tusentals mätpunkter. Den geografiska positionen för dessa punkter i miljön jämförs med punkterna från tidigare sekvens med hjälp av en markmodell. Genom att förfina och göra små justeringar av lokaliseringsdata från INS (latitud, longitud, höjd, roll, pitch, yaw), kan en lösning uppnås som minimerar felet mellan markmodellen och punktmolnet från "senaste" datasekvensen. Kalibreringsparametrarna (lösningen) som vi får ut är alltså småjusteringar av lokaliseringsdata från INS var 0.1 s. Dessa kalibreringsparametrar interpoleras sedan fram till tidssteget 0.01 s. Slutligen läggs kalibreringsparametrarna till det "råa" INS-data och varje datapunkt förflyttas till ett geografiskt refererat koordinatsystem, på samma sätt som i steg 3. Metoden har i våra utvärderingar visat sig ge en stor förbättring av noggrannheten i bearbetat data. En principiell förklaring till hur metoden fungerar, kan göras genom att betrakta ett enkelt fall där vi mäter avståndet till marken rakt under plattformen med hjälp av en enda lidarstråle. Om vi då har en drift i INS-data, t ex på grund av en mindre exakt höjdmätare som mäter höjd med hjälp av lufttryck, kan plattformens höjd bestämmas mer noggrant med hjälp av lidarsignalen. Om vi dessutom har flera strålar som mäter i olika riktningar mot marken, kan dessa avståndsvärden sammanvägda användas för att relativt noggrant beräkna t ex plattformens roll- och pitchvinklar.

5 Experimentell utvärdering

Inom projektet har utvärdering av sensorer och sensorsystem skett i flera steg.

5.1 Laborativ utvärdering av Velodyne HDL-32E

Specifikationen till Velodynelidarn säger att sensorn mäter med en standardavvikelse bättre än 2 cm vid 25 m avstånd (1-sigma). Att ange en standardavvikelse på ett fast avstånd på detta vis säger egentligen inte mycket eftersom noggrannheten är synnerligen reflektansberoende. Vidare säger specifikationen att intensitetsvärden ska presenteras som kalibrerad reflektans, det vill säga en kalibrerad reflektansyta ska presenteras med samma intensitet oavsett avstånd. För att verifiera Velodynelidarns prestanda avseende avståndsnoggrannhet och reflektansberoende mättes tre kvadratmeterstora kalibrerade reflektansytor inomhus från 5-60 meters avstånd. Noterbart från dessa verifieringsmätningar var att lidarn mäter avstånd bättre än förväntat. För en av de kalibrerade reflektanstavlorna (30 % reflektansyta) mättes med en standardavvikelse på avståndet bättre än 15 mm ända upp till 55 m mätavstånd. Detta får anses vara ett mycket bra värde då de flesta naturliga material reflekterar mer än så vid lidarns våglängd 905 nm (ex vegetationsmaterial 45-80%) och ju högre reflektans desto bättre avståndsnogrannhet. Sensorn visade sig inte kunna presentera samma intensitetsvärde oberoende av avståndet. Vi kan notera att intensiteten, oberoende av avståndet, presenteras i rätt härad, men att värdena fluktuerar 10-30 % av absolutvärdet. Velodyne har inte fullt ut lyckats med sin intensitetskalibrering. AP-PENDIX B innehåller ytterligare resultat och resonemang kring dessa verifieringsmätningar.

5.2 Utvärdering av flygning över vegetation

Velodyne detekterar för närvarande det starkaste ekot från ett laserskott. Detta innebär att detektion bakom skyl är möjlig (bereonde på ytornas reflektans). Detektionssannolikheten skulle öka om sensorn hade möjlighet att kunna detektera sista ekot. Efter samtal med Velodyne meddelar de att de håller på att ta fram en ny mjukvara till sensorn där detta ska vara möjligt. En artefakt (en blandning av två ekon) uppstår då separationen mellan två ytor är kortare än laserstrålens pulslängd. Kontrollerade mätningar inomhus visar att sensorn kan separera två ekon med 60 cm separation (mätningar till ett fönsterglas och till en yta bakom; ändrad fönstervinkel mellan två mätningar); överensstämmande med 4 ns pulslängd. Genom högre gräs och träd kan vi anta att vi har åtminstone delar av alla inmätta punkter påverkade av sådana artefakter. Att komma upp över en yta med högt gräs och mäta uppifrån minskar antalet artefaktar, då det är mycket lättare att dels träffa djupt ner i gräset, dels ha möjligheten att detektera små hårda mål, exempelvis IED:er. Resultatet av flygningar över högt gräs visas i jämförelse med markbaserad laserskanning i Figur 25.

Penetrationsegenskaperna genom skog illustreras i Figur 26. En signifikant andel av punkterna har penetrerat en skogsridå och detekterat marken. I detta fall antar vi att det till största delen beror på att det varit fri siktlinje till marken. Laserstrålens minimala divergens och lob gör att det är troligare att marken detekterats direkt, snarare än att vi erhållit det starkaste ekot från marken efter att ha träffat löv på vägen dit. Den nya mjukvaran i Velodynelidarn kommer drastiskt att öka penetrationsgraden och möjligheten till detektion av skylda mål.



Figur 25. Ett utsnitt ur ett punktmoln (färgerna visar höjd), där en person har trampat ned en yta på 30×30 cm i det höga gräset, en tydlig höjdskillnad syns (orange färg)



Figur 26. Efterbehandlad punktdata från en testflygning på låg höjd. Många markpunkter har detekterats genom en förhållandevis tät trädlinje (punkter manuellt markerade röda till höger i bild). Flygningen var ca 25 m lång och 4 m i flyghöjd (cirkeln med ett kryss markerar flygkursen, rakt in i bilden). Markpunkter detekterades ca 10 m in i skogen.

5.3 Utvärdering av urbana miljöer

Vi har samlat in data i semiurban miljö, hus med omkringliggande vegetation. Mätningarna gjordes med hexakoptern monterad på taket på en Land Rover, för att simulera flygningar till den första versionen av vår databehandling. En sträcka på ungefär 600 meter kördes på 3 minuter. Lidarsystemet har varit i funktion på precis samma sätt som vid en flygning med den skillnaden att inte motorerna startats. Det finns två anledningar till att vi mätte med hexakoptern monterad på biltaket. Den första anledningen var att erhålla data för utveckling av databearbetning i ett tidigt skede. En annan anledning är att Transportstyrelsens regler kring framförande av små flygfarkoster säger att flygning i tättbefolkat område måste avlysas med ett säkerhetsavstånd på 50 m, vilket vi inte kunde utföra i området med mycket människor i rörelse. Figur 27 visar den körda sträckan och det resulterade punktmolnet. Vid en första anblick ser resultatet mycket bra ut.



Figur 27. Mätningar med Hexakoptern monterad på taket på en Land Rover. Den gula linjen markerar en ca 600 m lång körd sträcka. De nedre tre bilderna visar det processade punktmolnet draperat med laserintenitet.

Frågan är hur noggrant vi egentligen avbildar verkligheten? Ett utsnitt gjordes av det hus som kallas G-huset vid Universitetet i Linköping, se Figur 28 och Figur 29. Utvärdering av positioneringssystemet gjordes till en början med lidardata registrerad (inbördes inriktad varv efter varv) med hjälp av APM/INS (baserat på dess IMU, höjdmätare, kompass och GPS). Huset är avbildat från drygt 30 m avstånd, med en hastighet på 6 m/s, utmed en körd sträcka på 80 m. Vi kan notera att huskroppen inte avbildats rak och avbildas med mycket brus. I Figur 30 visas en del av scenen för att beskriva resonemanget kring detaljer. I det okalibrerade datat (Figur 29, vänster), kan vi se att "takkant ovan cykelställ" är lokalt felorienterad, upplevs som flera lager uppifrån. Genom att dra nytta av det 3D-data som lidarn samlar in varv efter varv kan en dynamisk kalibrering utföras genom att i hela ka-libreringen rätar upp plana ytor och drar ner bruset, se höger bild i Figur 29. Den svaga skjuvning vi nu ser av långsidan på byggnaden torde kunna kalibreras ytterligare genom att titta på ytterligare rotationer bakåt i tiden, men detta är något vi inte har implementerat ännu.



Figur 28. G-huset utanför FOI.



Figur 29. G-huset avbildat med Velodyne med hastighet ca 6 m/s. Vänster bild är data registrerad med hjälp av APM/INS (baserat på IMU, höjdmätare, compass och GPS). I höger bild är punktmolnet dynamiskt kalibrerat, huskroppen har rätats upp och platta ytor är mindre brusiga.



I Figur 30 visas hur lidarn har penetrerat fönsterglas och avbildat väggar inne i byggnaden. En hovrande helikopter utanför ett fönster skulle kunna avbilda en stor del av rummet innanför.

Figur 30. G-huset avbildad med Velodynelidarn i multirotorn efter dynamisk kalibrering. Efter kalibrering är plana ytor mindre brusiga (takkant ovan cykelställ och husfasaden). Notera att vi ser in i huset och innerväggen i kontoren, och stundtals även den borte väggen i korridoren innanför, det vill säga laserpulsen har penetrerat fönsterrutorna.

Övre bilden till vänster i Figur 31, visar ett punktmoln baserad på registrering med INS från mätningen med Land Rovern (färgen visar höjd). Den övre bilden till höger visar samma punktmoln, men nu dynamiskt kalibrerad baserad på en bakåtrotation (0.1 s). Bilden längst ner till vänster är ett ortofoto från Google, och nedre bilden till höger visar miljön skannad med en markbaserad laserskanner. En längre tidsperiod än nuvarande 100 ms för referensmarkmodellen skulle sannolikt minska det absoluta felet (drift över tid) i de bearbetade punktmolnen.



Figur 31. Övre bilden till vänster visar ett punktmoln baserad på registrering med INS, GPS, kompass och höjdmätare från mätningen från Land Rovern (färgen visar höjd). Den övre bilden till höger visar samma punktmoln, men nu dynamiskt kalibrerat. Bilden längst ner till vänster är ett ortofoto från Google och nedre bilden till höger visar miljön skannad med en markbaserad laserskanner. Målet är att vi med i sammanhanget billiga komponenter ska kunna producera punktmoln dynamiskt från UAV med en noggrannhet näst intill så noggrant som den markbaserade laserskannern.

6 Diskussion och slutsatser

Vi har beskrivit integration, databehandling och första experimentella resultat av laserskanning från en liten UAV, typ multirotor (hexakopter). Sensorkonceptet öppnar nya möjligheter för insamling och användning av högupplösta 3D-data. Metoden är snabb att driftsätta och den totala systemkostnaden är relativt låg jämfört med de andra inmätningsmetoderna markbaserad laserskanning, bemannad flygskanning och bilburen laserskanning. Den är tillräckligt billig för att eventuellt gå förlorad. Jämfört med de andra skannande lidarkoncepten erbjuder laserskanning från en liten UAV 3D-data, som

- från en gynnsam vinkel på låg höjd erbjuder en punkttäthet (många faktorer tätare än den från bemannad flygskanning) som möjliggör detektion av små mål,
- kan penetrera vegetation och semitransparenta ytor (ex fönsterglas) och se vad som finns bakom,
- med kort ledtid kan täcka in lokala areor, om några tusen kvadratmeter, för olika syften.

En skillnad med högupplöst lidar jämfört med 3D-kartering från passiv fotogrammetri är förmågan att tränga igenom vegetation, kamouflagenät och att upptäcka delvis skymda mål. En annan skillnad är att lidar har förmåga att se sneda/tunna objekt t ex ledningar, master, flaggstänger eller stag till master. Höguppöst lidar påverkas heller inte i samma grad av vind i träd som fotogrammetri kan påverkas av rörelseoskärpa. Ytterligare en skillnad är möjligheten att snabbt erhålla 3D-data över ett stort sökningsområde där passiv fotogrammetri kan kräva mer databehandling i låga kontrastområden.

Inom försvarssektorn kan 3D-informationen i insamlade punktmoln användas för olika tillämpningar såsom detektering och segmentering, klassificering, spaning och för att spåra mål. Vid militära incidenter och inhämtning av underrättelseinformation (bakhåll, improviserade sprängladdningar (IED), avbildning av materiel, skadeutfall, fordon, byggnader) är det värdefullt att samla in korrekt information, på plats och så snabbt som möjligt för att minska risken för personalen. Eftersom en lidarsensor ofta kan mäta multipla ekon kan den också penetrera exempelvis vegetation eller se in i byggnader.

Våra resultat visar att billig tröghetsnavigering baserad på MEMS-teknologi kan användas tillsammans med lidardata i en dynamisk kalibreringsprocess för att erhålla hög noggrannhet i bearbetade punktmoln. Vår dynamiska kalibreringsprocess bygger på felminimering av den markmodell vi använder mellan två efterföljande lidarrotationer. Vårt systemkoncept har stor potential att kunna förbättra noggrannheten ytterligare i det slutliga punktmolnet. Några exempel på potentiella förbättringar är; att köra laserskannern med högre rotationshastighet, utföra den dynamiska kalibreringen över ett större tidsspann och att förbättra noggrannheten på INS.

Ett framtida mål är att med i sammanhanget billiga komponenter kunna producera punktmoln från en liten-UAV näst intill så noggrant som den markbaserade laserskannern (och i framtiden i realtid). För en realtidsapplikation måste beräkningarna ske mycket effektivt. En metod kan vara att processa och filtrera den datamängd som ska länkas till marken (Grönwall, C. och Bissmarck, F. 2014).

7 Referenser

Larsson, H., Letalick, D., "Military forensic use of handheld 3D camera FOI-S--4445— SE", SPIE Defense Security+Sensing 2013, Baltimore, 2013-04-29 - 2013-05-03, (2013).

Grönwall, C., SPIE Defense Security+Sensing 2013, Baltimore, 2013-04-29 - 2013-05-03för stor och liten UAV", FOI-R--xxx-SE, (2014). (Under framtagande)

Henriksson, M., Amselem, E., Larsson, H. "Lasersensorkoncept för UAV – En marknadsgenomgång av befintliga och framtida koncept", FOI-R--3904--SE (2014).

Petrie, G., "Airborne Topographic Laser Scanners," GEO Informatics 14, 34-44, (2011).

Puente, I., González-Jorge, H., Martínez-Sánchez, J., and Arias, P., "Review of mobile mapping and surveying technologies," Measurement 46, 2127-2145, (2013).

Tulldahl, H. Michael, and Larsson, Håkan, "Lidar on small UAV for 3D mapping," Proceedings of Security + Defence, Electro-Optical Remote Sensing, SPIE 9250, (2014).

APPENDIX A Geometrisk bearbetning av punktdata

Här beskrivs den efterbearbetning av nedlänkad data som görs för att erhålla ett punktmoln i ett geografiskt koordinatsystem. En motsvarande beskrivning återfinns även i ref. (Tulldahl, M och Larsson, H., 2014).

Laserskannern Velodyne kan betraktas som en roterande laseravståndsmätare. Varje laserskott ger upphov till en uppmätt punkt i tre dimensioner (xyz). Vi tar först fram positionen för varje mätpunkt genom att använda avstånd, skannerrotation, och höjdvinkeln som erhålls från lidarn. Vi transformerar varje mätpunkt till ett kartesiskt koordinatsystem $p_{Lidar} = \begin{bmatrix} x & y & z \end{bmatrix}$ lokaliserat i centrum på Velodyne lidar (se rapportens Figur 23). Transformen ges av

$$p_{Lidar} = p_{RF} R_{RF \to Lidar} \tag{1}$$

där p_{RF} är punkten i ett avståndsmätar- (Range Finder) koordinatsystem som också är lokaliserat i centrum av Velodyne-skannern. Detta koordinatsystem roterar med skannerhuvudet och är tiltat med elevationsvinkeln för var och en av de 32 lasrarna. I en allmän form kan rotationsmatrisen $R_{RF \rightarrow Lidar}$ skrivas

 $R_{RF \rightarrow Lidar}(\gamma_{Lidar}, \alpha_{Lidar}, \beta_{Lidar})$

$$= \begin{bmatrix} \cos(\gamma)\cos(\beta) - \sin(\gamma)\sin(\alpha)\sin(\beta) & \cos(\beta)\sin(\gamma) + \cos(\gamma)\sin(\alpha)\sin(\beta) & -\cos(\alpha)\sin(\beta) \\ -\cos(\alpha)\sin(\gamma) & \cos(\gamma)\cos(\alpha) & \sin(\alpha) \\ \cos(\gamma)\sin(\beta) + \cos(\beta)\sin(\gamma)\sin(\alpha) & \sin(\gamma)\sin(\beta) - \cos(\gamma)\cos(\beta)\sin(\alpha) & \cos(\alpha)\cos(\beta) \end{bmatrix} (2)$$

där γ_{Lidar} är lidarns rotationsvinkel kring z-axeln (skannerns rotationsvinkel), α_{Lidar} rotationsvinkeln kring x-axeln (elevationsvinkeln) och β_{Lidar} rotationsvinkeln kring y-axeln (i vårt fall lika med noll). Av utrymmesskäl har vi i Ekv. (2) ovan utelämnat indexet *Lidar* till vinklarna γ_{Lidar} , α_{Lidar} och β_{Lidar} . I vårt specifika fall har vi $P_{RF} = [0 \ r \ 0]$, där r är lasermätt avstånd längs den roterande y-axeln. Från detta första steg i bearbetningen kan vi gruppera flera punkter till ett "punktmoln" P_{Lidar} . Detta punktmoln transformeras till ett koordinatsystem centrerat i och linjerat med INS (se rapportens Figur 23). Punktmolnet i INS-koordinatsystemet beräknas genom

$$P_{INS} = P_{Lidar} R_{Lidar \to INS} + T_{Lidar \to INS}, \tag{3}$$

där

$$R_{Lidar \to INS} = R_{Lidar \to INS} \left(\gamma_M + \gamma_{M,trim}, \alpha_M + \alpha_{M,trim}, \beta_M + \beta_{M,trim} \right) \tag{4}$$

är en rotationsmatris, enligt samma notation som visas i detalj i Ekv. (2), och and γ_M , α_M , β_M lidarns *Monteringsvinklar* kring respektive z-, x-, och y-axlarna. I vårt fall är värdena på dessa: $\gamma_M = 0$, $\alpha_M = -20^\circ$, and $\beta_M = 0$. I Ekv. (4) introducerar vi även trimparametrar $\gamma_{M,trim}$, $\alpha_{M,trim}$, och $\beta_{M,trim}$ för att möjliggöra framtida finjustering av de (statiska) monteringsvinklarna i förhållande till INS. I Ekv. (3) är

$$T_{Lidar \to INS} = \begin{bmatrix} x_M + x_{M,trim} & y_M + y_{M,trim} & z_M + z_{M,trim} \end{bmatrix}$$
(5)

translationsvektorn mellan origo för *Lidar*- och INS-koordinatsystemen. I vårt fall är dessa värden $x_M = 0, y_M = 0$, and $z_M = -0.16$ m. På samma sätt som för trimvinklarna för monteringen är variablerna $x_{M,trim}, y_{M,trim}$ och $z_{M,trim}$ trimparametrar för finjustering av monteringspositionen av lidarn i förhållanden till INS. I vårt arbete hittills har vi dock inte utvecklat denna finjustering vidare. I nästa steg i vår bearbetningsprocess transformeras från INS-koordinatsystemet till ett geografiskt "World" koordinatsystem genom

$$P_{World} = P_{INS}R_{INS \to World} + T_{INS \to World}, \tag{6}$$

där

$$R_{INS \to World} = R_{INS \to World} \left(-(\gamma_Y + \gamma_{Y,trim}), \alpha_P + \alpha_{P,trim}, \beta_R + \beta_{R,trim} \right)$$
(7)

är en rotationsmatris innehållande yaw-, pitch- och rollvinklar γ_Y , α_P , och β_R från INS orienteringsdata och tillhörande dynamiska trimvariabler variables $\gamma_{Y,trim}$, $\alpha_{P,trim}$, och $\beta_{R,trim}$ för dessa vinklar. Dessa trimvariabler beräknas i vår dynamiska kalibreringsprocess som vi strax ska beskriva. I Ekv (6) är

$$T_{INS \to World} = \begin{bmatrix} x_G + x_{G,trim} & y_G + y_{G,trim} & z_G + z_{G,trim} \end{bmatrix}$$
(8)

translationsvektorn till *Geografiska* världskoordinater, som vi erhåller från INS positionsdata x_G , y_{G,Z_G} (longitud, latitud, höjd), och $x_{G,trim}$, $y_{G,trim}$, $z_{G,trim}$ motsvarande dynamiska trimvariabler. De horisontella positionsberäkningarna genomförs både i WGS84 (longitudoch latitudgrader) och lokala koordinater (meter). Vertikala positionsdata beräknas som relativ höjd (meter).

De tidstämplade INS positions- och orienteringsdata som mottas via telemetri till markstation har en samplingsfrekvens på ca 3 Hz (position) och 10 Hz (orientering). Lidardata mottas som Ethernetpaket vilka innehåller tidsstämplade lidarpunktdata (avstånd, intensitet, rotationsvinkel, elevationsvinkel) och data från lidarns interna gyron. För tidssynkronisering mellan INS och lidardata använder vi gyrodata från båda dessa system. Det första steget sker genom uppsampling av båda IMU-dataströmmarna till 100 Hz. I nästa steg högpassfiltreras pitchgyrodata (för att minska påverkan från pitchvinklarnas olika absolutvärden). Därefter genomförs en korrelationsberäkning där maximal korrelation i gyrodata används för att tidssynkronisera INS- och lidardataströmmarna. En illustration av tidssynkroniseringen visas i Figur 32. Den stationära nivån i Figur 32 skiljer mellan systemen eftersom vi bara genomförs en grovkalibrering av lidarns IMU sensorer. Denna skillnad påverkar dock inte tidssynkroniseringen.



Figur 32. Exempel på tidssynkronisering av INS och lidardata med hjälp av data från båda systemens pitchgyro. Figur (a) visar tidssignalerna uppsamplade till 100 Hz, och (b) tidssynkroniserade data.

För bearbetning av punktdata till världskoordinater (Ekv (6)-(8), använder vi INS data uppsamplade till en datahastighet på 100 Hz (linjär interpolation mellan verkliga sampel). Därmed används en och samma rotationsmatris $R_{INS \rightarrow World}$ och en och samma translationsvektor $T_{INS \rightarrow World}$ i ett tidsintervall på 10 ms för bearbetning av lidardata. I vår nuvarande implementering sätts de dynamiska trimvariablerna $\gamma_{Y,trim}, \alpha_{P,trim}, \beta_{R,trim}, x_{G,trim}, y_{G,trim}$ och $z_{G,trim}$ till noll i det första bearbetningssteget, sedan appliceras de i ett andra upparbetningssteg där de beräknas och deras faktiska värden sätts in i Ekv (6) - (8). Det är dock möjligt att utföra dessa uppgifter i ett enda processeringssteg som vanligen genomförs i så kallade SLAM-algoritmer (Simultaneous Localization And Mapping). Några exempel på SLAM metoder beskrivs i referenserna (McDonald et al., 2013) (visuell SLAM) och (Wang , et al., 2013) (kombinerad visuell- och lidar-SLAM). Vi kommer nu att beskriva vår dynamiska kalibreringsmetod, exemplifierat med den dynamiska "yaw"-trim variabeln $\gamma_{Y,trim}$. Beräkningen av de dynamiska trimvariablerna utförs vid en datahastighet på 10 Hz dvs. en gång per skannervarv. Värdet på yaw-trim vid tiden *t* beräknas som

$$\gamma_{Y,trim}(t) = \gamma_{Y,trim}(t - \Delta t) + \Delta \gamma_{Y,trim}(t)$$
(9)

där $\gamma_{Y,trim}(t - \Delta t)$ är yaw-trim vid föregående skannervarv, i vårt fall $\Delta t = 100$ ms tidigare. "Delta"-trim $\Delta \gamma_{Y trim}(t)$ vid tiden t beräknas så att RMSE (root mean square error) mellan två efterföljande markmodeller (Ground Models - GM) minimeras från tiden $t - \Delta t$ till tiden t. Vi beräknar alltså värdet på $\Delta \gamma_{Y,trim}(t)$ som minimerar RMSE[GM($t - \Delta t$)] Δt), GM(t, $\Delta \gamma_{Y,trim}(t)$)]. Det bör noteras att även om trimvariablerna beräknas på 100 ms intervall, så uppsamplas dessa data därefter (spline interpolation) och appliceras sedan på punktdata med 10 ms tidsintervall. Vi utför skattningen av de dynamiska trimvariablerna i ett begränsat sökområde med fasta delta-trimvärden för de sex trimvariablerna. De värden som vi använt i detta arbete visas i Tabell 2. Alla sex variablerna skattas i varje trimsteg i samma ordning som visas i tabellen från vänster till höger. Samtliga kombinationer av trim testas inte, och således utförs denna skattning som en lokal optimering. Exempelvis, efter att den optimala $\Delta \gamma_{Y,trim}$ har bestämts, tillämpas detta värde när de fem $\Delta z_{G,trim}$ -värdena ska utvärderas. Syftet med de små delta-värdena $\Delta \gamma_{Y,trim}(t)$ för varje Δt är att de ska hantera och kompensera för en liten drift eller brus i INS-data. I Figur 33 (a) - (b) visas exempel på två efterföljande markmodeller. Varje markmodell skapas från punktdata där alla punkter 0.7 m över marken har tagits bort (markhöjden beräknas som medianhöjden i punktmolnet). Nivån 0.7 m är ett preliminärt värde som har till syfte att avlägsna träd, tak och andra höga föremål från markmodellen. Markmodellen skapas på ett 5 cm raster och interpolering av data genomförs för att fylla tomma pixlar mellan lidarpunkterna. Vi har satt en begränsning på denna interpolation till maximalt tre pixlar. Trimvärden, pixelstorlek och maximal interpolation är för närvarande preliminära värden som kan justeras t.ex. för flyghöjd och miljöförhållanden. I Figur 33 (c) - (d) visar vi exempel på skillnaden mellan två efterföljande markmodeller. Höjdskillnaden (felet) beräknas naturligtvis enbart för överlappande pixlar mellan markmodellerna. Figur 33 (c) visar höjdfelet innan, och Figur 33 (d) höjdfelet efter den dynamiska trimmen $\gamma_{Y,trim}(t)$ har tillämpats (jfr Ekv. (6) -(7)). Metoden med dynamisk kalibrering som en lokal optimering görs för att minska beräkningstiden. Den lokala optimeringen som vi genomför kräver 22 beräkningssteg (5 vardera för yaw och höjd, och 3 vardera för de återstående fyra variablerna) jämfört med 2025 steg för en global sökning ($5^2 \times 3^4$). Varje beräkningssteg innebär i detta fall rotation och translation av ett punktmoln (Ekv. (6)) och rastrering av punkterna till en markmodell. Vår dynamiska kalibreringsmetod har likheter med den metod som presenteras i ref. (Guerreiro et al., 2014) som bygger på principen att minimera felen mellan ett uppmätt punktmoln och en representation av en känd kalibreringsyta eller alternativt felen mellan flera punktmoln, genom att jämföra varje uppmätt punktmoln med en ytrepresentation av de andra.



Figur 33. Ett exempel på markmodeller från två på varandra följande skannerrotationer (a)-(b). Markmodellerna har skapats på ett 5 cm raster, och interpolation av data för ifyllnad av tomma rasterpixlar har gjorts till maximalt 3 pixlar. Figurerna (c)-(d) visar markmodellfel (i höjd) mellan markmodellerna före respektive efter "yaw"-trim $\gamma_{X,trim}(t)$ har lagts till i bearbetningsprocessen.

Tabell 2. Sammanfattning av de fasta värden som används i den dynamiska kalibreringsprocessen för kalibrering av INS data.

Description Variable (unit)	Yaw $\Delta \gamma_{Y,trim}$ (°)	Altitude $\Delta z_{G,trim}$ (m)	Pitch $\Delta \alpha_{P,trim}$ (°)	Roll $\Delta \beta_{R,trim}$ (°)	$\begin{array}{c} x \\ \Delta x_{G,trim} \\ (m) \end{array}$	$y \\ \Delta y_{G,trim} \\ (m)$
Trim steps per Scan- ner Revo- lution	$0 \\ \pm 0.08 \\ \pm 0.4$	$0 \\ \pm 0.01 \\ \pm 0.04$	0 ±0.07	0 ±0.07	0 ±0.015	0 ± 0.015

Vår erfarenhet av den efterbearbetningsmetod som beskrivs i detta projekt, är att inte bara drift i INS kan hanteras av den dynamiska kalibreringen, utan också att absoluta fel kan korrigeras, fel orsakat av t.ex. kompassfel. Ett exempel på korrigerade kompassfel visas i Figur 34. Exemplet är från testerna med multikoptern monterat på taket av en Land Rover. Figuren visar beräknad gir- (kompass) trim, från flera dynamiska kalibreringar av INS och lidardata, vid olika körriktningar (olika girvinklar). Baserat på beräkningen av fordonets kurs över marken från GPS-data, har vi kunnat verifiera att de erhållna trimvärdena är korrekta. Plottad data i figuren är från sju separata dataset, där varje dynamisk kalibrering börjar från 0 i gir-trim. I alla dessa kalibreringar driver girtrimmen mot sitt rätta värde

(jämfört med rörelsevektorn över mark från GPS) inom två till fem sekunder beroende på det initiala kompassfelet i INS (stora initiala kompassfel tar längre tid). De data som visas i Figur 34 är efter dessa inledande fem sekunder av kalibrering. Vi har använt dessa data för att göra en kalibreringsmodell av kompassen, där vi initierar första värdet på girtrimmen beroende på den initiala girningsvinkeln enligt Figur 34. Det bör noteras att denna typ av kompass kalibrering också kan ingå i INS, och att grundlig kalibrering av INS kompassen i regel leder till mindre fel än vad som anges i Figur 34. Principen för att dynamisk kalibrering ska kunna hantera sådana fel är ändå viktig för att hantera situationen t ex med starka elektromagnetiska fält från motorer och elektronik ombord UAV.



Figur 34. Data från estimerad girtrimning utifrån flera dynamiska kalibreringar av INS och lidardata. Data samlades in vid olika körriktningar med sensorplattformen monterad på en Land Rover.

Referenser till Appendix A.

Guerreiro, Bruno J., Silvestre, Carlos, and Oliveira, Paulo, "Automatic 2-D LiDAR geometric calibration of installation bias," Robotics and Autonomous Systems 62, (2014), pp. 1116-1129.

McDonald, J., Kaess, M., Cadena, C., Neira, J., and Leonard, J. J., "Real-time 6-DOF multi-session visual SLAM over large-scale environments," Robotics and Autonomous Systems 61, (2013), pp. 1144-1158.

Tulldahl, H. Michael, and Larsson, Håkan, "Lidar on small UAV for 3D mapping," Proceedings of Security + Defence, Electro-Optical Remote Sensing, SPIE 9250, (2014).

Wang, Fei, Cui, Jin-Qiang, Chen, Ben-Mei, and Lee, Tong H., "A Comprehensive UAV Indoor Navigation System Based on Vision Optical Flow and Laser FastSLAM," Acta Automatica Sinica 39, (2013), pp. 1889-1899.

APPENDIX B Prestandaverifiering Velodyne HDL-32E

Kalibrerad reflektans

För att verifiera specifikationens påstående om kalibrerad reflektans mättes kalibrerade reflektanstavlor i ett inomhuslaboratorium. Tre kalibrerade diffusa reflektansytor användes (svart 4,6%, grått 30,3% och vitt 81,3%, reflektans vid 905 nm (Velodyne laservåglängd)); alla tre karakteriseras som fullständigt diffust reflekterande mål. Mätningar från 6,5 m upp till 60 m utfördes. Intensitetsdata från Velodyne lidar är fabrikskalibrerad (avståndskompenserade) och presenteras med 8-bitars dynamiskt omfång från 0 till 255, där 1 till 100 definierar diffus reflektans från 1 till 100 procent, och över 100 förutsätts reflektansen vara spekulär (speglande). Detta innebär i teorin att systemet ska presentera samma intensitet värde från en diffus reflektionsyta, oberoende av avstånd. Alltså, intensitetsvärdena vid dessa mätningar ska presenteras vara 5, 30 och 81 (värden nära värdena för reflektionsytorna). Grafen i Figur 35 visar uppmätta intensitetsvärden över mätavståndet från de tre kalibrerade reflektansytorna. För utvärderingen användes endast en laser, den laser som träffar ytan med en infallsvinkel av 0° mot ytnormalen. Vi observerade att intensitetsvärdena var något instabila, vilket vi antar är orsakat av något varierande lasereffekt. De returnerade intensitetsvärdena från respektive reflektansyta visar sig vara i närheten av de förväntade värdena. Noterbart är att avstånd längre än 21 m inte var detekterbart från 4,6 % reflektans. Utebliven detektion är att förvänta och är allmänt vanlig för vilken godtycklig lidar som helst mot mål med sådan låg reflektans. Material med så låg reflektans är inte särskilt vanlig (svart gummi är ett exempel).



Figur 35. Resultat från verifierad intensitet över avståndet. Noterbart är att intensiteten fluktuerar, men att den är i rätt härad för respektive reflektansyta.

Standardavvikelse på avståndet

Specifikationen säger att sensorn mäter avståndet bättre än 2 cm vid 25 m avstånd (Sigma 1). Att ange en standardavvikelse på ett fast avstånd på detta vis säger egentligen inte mycket eftersom noggrannheten är synnerligen reflektansberoende. För att verifiera Velodynelidarns prestanda avseende avståndsnoggrannhet mättes tre kvadratmeterstora kalibrerade reflektansytor inomhus från 5-60 meters avstånd.

Noterbart från dessa verifieringsmätningar var att lidarn mäter avstånd bättre än förväntat. En av de kalibrerade reflektanstavlorna var 30 % reflekterande med en standardavvikelse på avståndet bättre än 15 mm ända upp till 55 m mätavstånd, se Figur 36. Detta får anses

vara ett mycket bra värde då de flesta naturliga material reflekterar mycket högre än så, se Tabell 3.

Att träffa en yta med hela laserstrålens lob är sällan fallet. Mycket ofta träffar loben tunna strukturer och med en mycket sned infallsvinkel, vilket påverkar retursignalen och minskar sannolikheten för detektion. Asfalt och is är två ytor som reflekterar dåligt. Vi har dock vid flygningar visat att vi kan detektera asfalt med en infallsvinkel på 80° på drygt 30 m avstånd vilket får anses vara mycket bra. Vi har också jämfört resultatet mot gräs där samma infallsvinkel ger oss en medelintensitet på 34 och alltså var det inga som helst problem att detektera ytan.



Figur 36 Utvärdering av intensitetsvärden över avståndet och (b) standardavvikelsen i meter över mätavståndet, i båda fallen mot kalibrerade reflektanstavlor kalibrerade vid 905 nm.

Naturliga ytor	Reflektans	Manmade surfaces	Reflektans
Gröna löv	~0.45-0.6	Asfalt	~0.08-0.12
Bark på träd	~0.5-0.8	Betong och cement	~0.3
Färskt gräs	~0.7	Tegelsten	~0.3-0.7
Torra bruna löv	~0.45-0.6	Träkonstruktioner	~0.8-0.9
Snö	~0.9	Metallytor	~0.1-0.5
Is	~0.02		
Grus och jord	~0.2-0.5		

Tabell 3. Reflektans från några naturliga mål och från några tillverkade mål (värden vid 905 nm).

FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1000 anställda varav ungefär 800 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.



FOI Totalförsvarets forskningsinstitut 164 90 Stockholm

Tel: 08-55 50 30 00 Fax: 08-55 50 31 00 www.foi.se