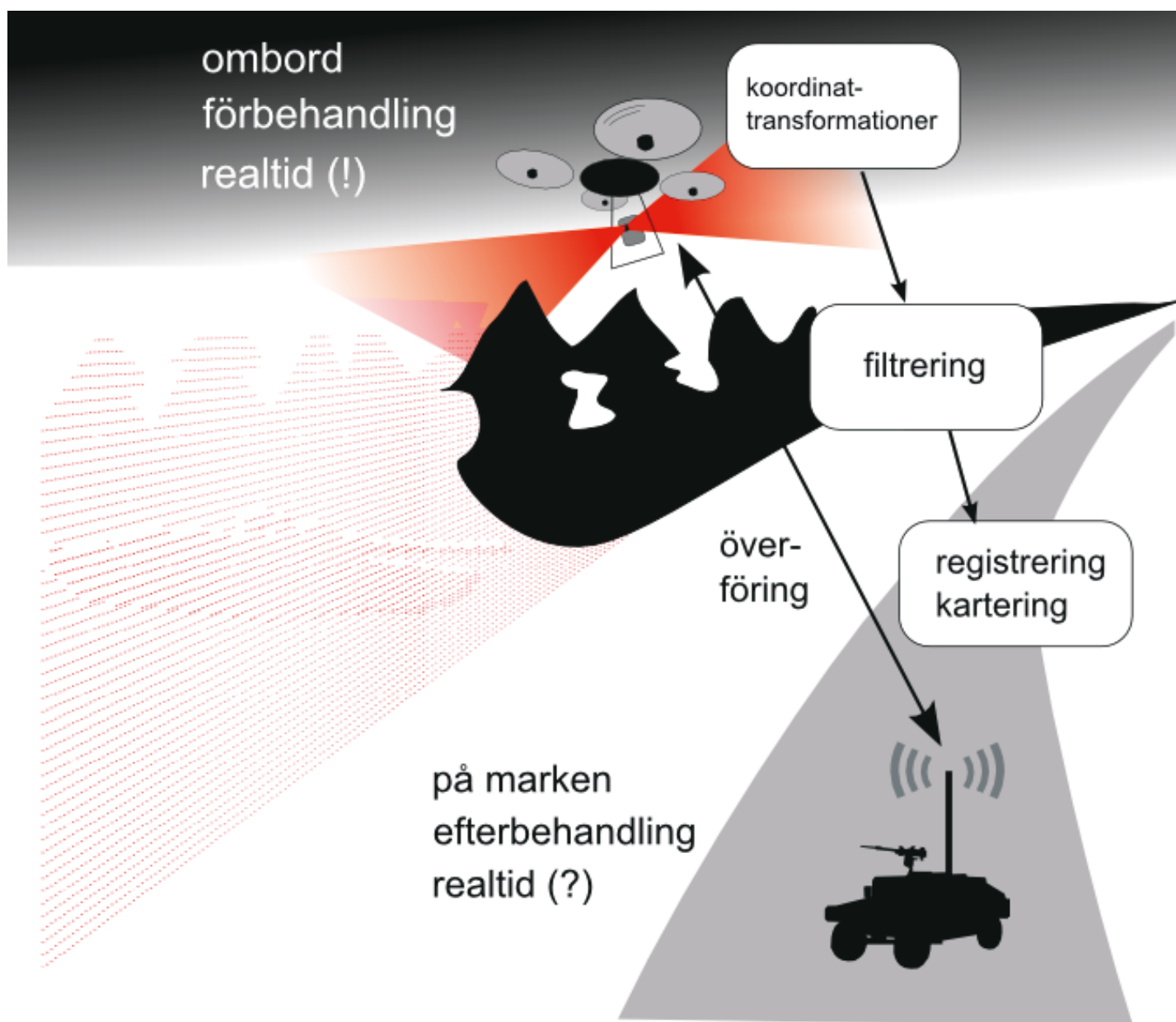


CHRISTINA GRÖNWALL & FREDRIK BISSMARCK



Christina Grönwall & Fredrik Bissmarck

Signalbehandlingskoncept för liten och stor UAV

Titel	Signalbehandlingskoncept för liten och stor UAV
Title	Signal processing concepts for small and large scale UAVs
Rapportnr/Report no	FOI-R—4025--SE
Månad/Month	December
Utgivningsår/Year	2014
Antal sidor/Pages	38 p
ISSN	1650-1942
Kund/Customer	FM
Forskningsområde	7. Sensorer och signaturanpassning
FoT-område	Sensorer och signaturanpassning
Projektnr/Project no	E54533
Godkänd av/Approved by	Per Johannesson
Ansvarig avdelning	5

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

I denna rapport diskuteras två möjliga sensorer baserat på kända prestanda för kommersiella ladarsystem och förväntad prestanda efter produktifiering av system. I en tidigare rapport föreslogs två olika ladarsensorer för placering i två olika typer av UAV. De UAV-koncept som föreslogs består av en liten UAV, i samma storlek som Försvarmaktens nuvarande Korpen och den tidigare Falken, och en stor UAV, i samma storlek som Försvarmaktens nuvarande Örnen och den tidigare Ugglan.

Den lilla UAVn kan bära mindre last och är utrustad med en enklare skannande ladar, visuell kamera, kamera operativ i infraröda området (IR) och ett navigeringssystem med GPS med noggrannhet inom ett par meter. Den ska användas för att ge en snabb lägesbild för ett litet område eller för att dokumentera en situation. Flyghöjden är upp till drygt 100 m.

Den stora UAVn kan bära större last och är utrustad med en högpresterande ladar med matrisdetektor, visuell kamera, kamera operativ i infraröda området (IR), och ett navigeringssystem med noggrannhet inom 1 dm. Den ska användas för storskalig spaning, underrättelseinhämtning och kartering. Den flyger typiskt ca 1 km över marken.

Baserat på dessa sensorer och dess prestanda har vi föreslagit möjlig signal- och bildbehandling, för att få fram hanterlig information som stöd för användarens beslutsfattande. Vi beräknar de datamängder som genereras och baserade på dem studerar vi krav på lagringskapacitet samt datatakt för beräkningar och dataöverföring. Sammantaget bedömer vi att efter produktifiering kan vi för båda UAVerna komma ner i bearbetnings- och transmissionstider som gör att data kan presenteras för en användare i eller nära realtid.

Vi föreslår att FOI arbetar vidare med området, för att på sikt kunna verifiera (eller avfärda) de beräkningar som presenterats här. På FOI har vi en testplattform där vissa koncept kan undersökas närmare. Här föreslår vi vidare arbete med signalbehandlingskedjan, för att testa och verifiera våra antaganden. I den stora UAVn används en ny generation ladar, med ny mätprincip och krav på brusreducering. Här behöver vi bygga upp mer kunskap inom framförallt brusreducering, vilket kan göras med data från simuleringar och om möjligt mätningar med sensorsystem i kontrollerad miljö.

Nyckelord: Ladar, UAV, signalbehandling, kartering, spaning, underrättelse, datamängd, datatakt

Summary

In this report we discuss two ladar sensor concepts for mounting unmanned aerial vehicles (UAV). The discussion is based on known performance in commercial ladar systems today and predicted performance in future UAV applications. The UAV systems include one small with similar size as the SwAF systems Korpen and Falken and a large UAV with size similar to SwAF systems Örnén and Ugglan.

The small UAV may only carry a few kg of equipment in total, and is equipped with a short-range scanning ladar, visual camera, camera operating in the infrared (IR) wavelengths, and a GPS-based navigation system with accuracy within a few meters. The system is aimed for quick situational analysis of small areas and for documentation of a situation. Maximum altitude is approximately 100 meters.

The large UAV may carry a heavier load and is equipped with a high-performing photon counting ladar with matrix detector, visual camera, IR camera, and a GPS-based navigation system with accuracy within a few decimeters. Its purpose is to support large-area surveillance, intelligence and mapping operations. Typical altitude is approximately 1000 meters.

Based on these sensors and their performance, signal and image processing support for data analysis is analyzed. The purpose of the data processing is to condense information, in order to facilitate human decision making. Generated data amounts are estimated and demands on data storage capacity and data transfer is analyzed. We predict that after commercial development of the full UAV systems the speeds of data processing and transmission can be reduced to real time or near real time.

It is proposed that FOI should study the ladar concepts further, to be able to verify (or reject) the current conclusions. FOI evaluates a test platform where parts of the concepts can be studied further, for example to scrutinize the suggested signal processing chain. In the large UAV a new generation of ladar is suggested, that uses a new measurement principle and that put new demands on noise reduction. In this case we need to extend FOIs knowledge about this type of data processing as a whole, which can be performed on simulated data and measurements in controlled environments.

Keywords: Ladar, UAV, signal processing, mapping, surveillance, intelligence, data rates, data amounts

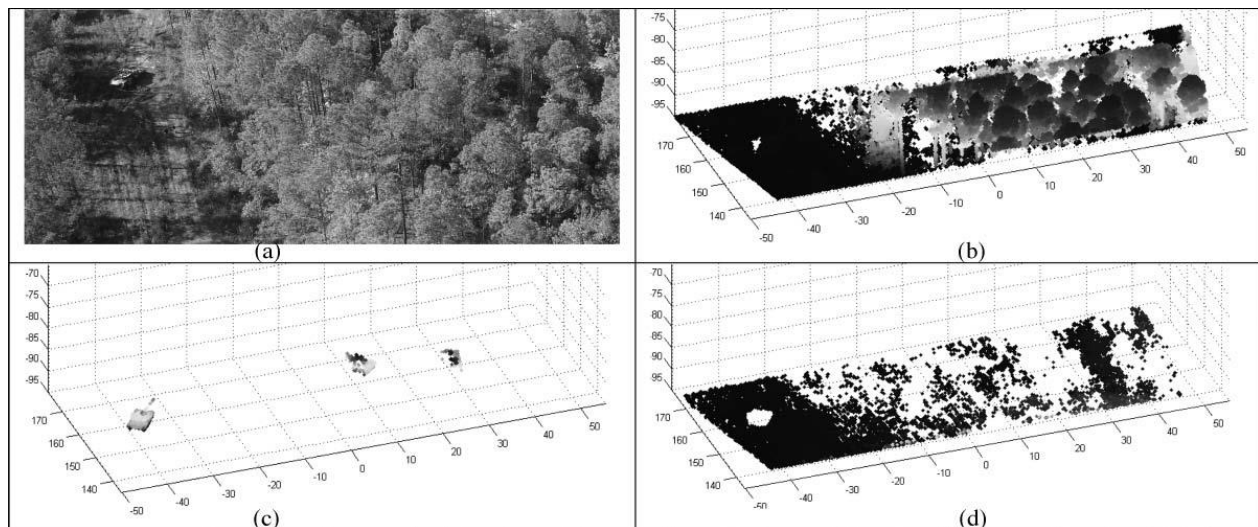
Innehåll

1	Inledning	7
2	Bearbetning och analys av 3D-data	9
2.1	Krav på upplösningar för måldetektioner.....	9
2.2	Brusreducering.....	10
2.3	Registrering	12
2.4	Kartering	13
2.5	Datastrukturer för kartering.....	13
2.6	Mätoptimering med Next Best View	14
2.7	Sensorfusion	14
3	Liten UAV	16
3.1	Beskrivning av UAV och lasersssystem.....	16
3.2	Användning och innebörd för dataanalys	19
3.2.1	Noggrannhet	20
3.3	Realtidsaspekter för signalbehandling	20
3.3.1	Datataktter	20
3.3.2	Minneskrav för en voxel-grid-karta (Occupancy Grid Map).....	21
3.4	Sammanfattning	21
4	Stor UAV	22
4.1	Lasersystemet och andra sensorer.....	22
4.2	Användning och innebörd för datagenerering	25
4.2.1	Datakvalitet vid kartering	25
4.2.2	Datamängder vid kartering	26
4.2.3	Datakvalitet och datamängder vid inmätning av litet område	28
4.2.4	Datakvalitet och datamängder vid målföljning	30
4.3	Brusreduktion av data	31
4.4	Sammanfattning	32
5	Slutsatser	34
6	Referenser	36

1 Inledning

Detta arbete utfört i projektet Avbildande lasersensorer inom FoT Sensorer och Signaturanpassning. Projektet pågår 2014-2015 och har som mål att värdera luftburen, laserbaserad 3D-teknik för UAV-koncept. Dessa sensorer ger unika möjligheter för kartering, spaning och måligenkänning, med särskilt stora fördelar mot delvis dolda eller maskerade mål. Eftersom systemen är laserbaserade är de inte beroende av dagsljus utan kan användas vid alla tidpunkter på dygnet.

I rapporten diskuteras olika möjliga sensorer baserade på kända prestanda för kommersiella ladarsystem och förväntade prestanda efter produktifiering av system publicerade i vetenskapliga artiklar. I Henriksson et al. (2014b) föreslogs två olika ladarsensorer för placering i två olika typer av UAV. De UAV-koncept som föreslogs består av en liten UAV, i samma storlek som Försvarsmaktens nuvarande Korpen och den tidigare Falken, och en stor UAV som är i samma storlek som storlek som Försvarsmaktens nuvarande Örnen och den tidigare Ugglan. Baserat på dessa sensorer och dess prestanda har vi föreslagit möjlig signal- och bildbehandling, för att ge mer begriplig information till användaren. I många fall ska antagligen 3D-data aldrig visas, utan avståndsinformationen ska användas för att segmentera fram ett objekt som sedan visas i form av en bild (se Figur 1).



Figur 1. Exempel på detektion av mål i 3D-data, där konventionella sensorer inte är tillräckliga. a: flygvy över vegetation med visuell kamera. b: 3D punktmoln av samma vy. c: från 3D-data 3 st utsegmenterade, sanna mål (stridsfordon). d: markskattning av 3D-data. Från Grönwall et al. (2011).

Den lilla UAVn kan bära mindre last och är utrustad med en liten skannande ladar, visuell kamera, kamera operativ i infraröda området (IR) och ett navigeringssystem med noggrannhet inom några meter med GPS-stöd. Den ska användas för att ge en snabb lägesbild för ett litet område eller för att dokumentera en situation. Den flyger typiskt 20-100 meter över marken. Sammanlagd data från systemet medger noggrann *relativ positionering*¹ (cm) men sämre *absolut positionering*² (några meter).

Den stora UAVn kan bära stor last och är utrustad med en högpresterande ladar med matrisdetektor, visuell kamera, kamera operativ i infraröda området (IR) och ett navigeringssystem med noggrannhet inom en decimeter. Den ska användas för storskalig spaning, underrättelseinhämtning och kartering. Den flyger typiskt ca 1 km

¹ Relativ position: avstånd mellan två positioner i data stämmer väl överens med avståndet i verkligheten. Till exempel längden på en husvägg i verkligheten och i data stämmer överens inom någon centimeter.

² Absolut position: positioner angivna i data stämmer överens med en geografisk plats. Till exempel stämmer GPS-koordinaten för husknuten är lika (med viss osäkerhet) både för data och i verkligheten.

över marken. Sammanlagd data från systemet medger noggrann relativ positionering (cm) och absolut positionering (cm).

I rapporten kommer vi att använda några begrepp som definieras här. Begreppen rör måligenkännings-kedjan, på engelska kallad *Aided/automated Target Recognition (ATR)*. Begreppen för ATR definieras olika i litteraturen, här använder vi de som är vanliga inom analys av ladardata och som även Ratches (2011) använder:

Måldetektion (Target detection): skilja mål från icke-mål, t ex utskiljning av bakgrundens träd, klippor från målen, samt skilja ut brus och artefakter i data.

Målklassificering (Target classification): utskiljning av olika klasser av mål; byggnader, fordon, flygplan.

Måligenkänning (Target recognition): utskiljning inom olika klasser av mål; fordon kan separeras i stridsvagn, bepansrad persontransport, lastbil eller personbil.

Målidentifiering (Target identification): man kan skilja ut olika modeller inom en målklass, till exempel man skilja på olika sorters stridsvagnar (M60, Strv122 eller T90).

Målkarakterisering (Target characterization): utskiljning av olika karakteristiska, fysiska skillnader inom en modellklass, till exempel om stridsvagnen är utrustad med extra antenner, bränsletankar eller speciell beväpning.

I rapporten presenterar vi först den bearbetning av 3D-data från en ladar som är intressant för tillämpningarna som diskuteras här. Därefter undersöker vi de två ladarsensorerna med avseende på de datamängder som kommer att genereras. Slutligen förs en diskussion om lämpliga flyghöjder, datataktiker och möjligheter till realtidsbearbetning av data.

2 Bearbetning och analys av 3D-data

Signalbehandlingskedjan för 3D-sensorer består av två distinkta steg. Det första är specifikt för sensorernas natur (fysikaliska principer), plattform och kontext, och går från inhämtade råa signaler till 3D punkter, sk punktmoln. Det andra, senare steget är behandling av det skapade punktmolnet, som kan behöva filtreras, utjämnas, komprimeras, flyttas och segmenteras. Denna signalbehandling är gemensam för alla 3D-sensorer. I detta kapitel gör vi en översikt av olika algoritmer för det senare steget, för de som kan vara relevanta för UAVer:

- **Brusreducering:** mätning i 3D resulterar i mycket artefakter och brus, som förvärras vid sämre förutsättningar, så som dåliga väderförhållanden. Det är önskvärt att ta bort bruset, genom att applicera olika filter.

- **Registrering:** med *registrering* (eng. *registration*) menas att sammanföra data i ett gemensamt koordinatsystem. Det är nödvändigt att göra kontinuerligt på en mindre UAV för att kompensera för positioneringsfel. Att automatisera registrering är värdefullt för många tillämpningar, men det är inte trivialt och därmed ett hett forskningsområde.

- **Kartering:** När en sensor i rörelse kontinuerligt inhämtar data, så vill man vanligen sammanföra det i en och samma karta. Även med GPS och tröghetsensorer så tillkommer fel i bilden, som kan korrigeras ytterligare. SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) är ett ramverk, där man försöker att optimera användningen av tillgänglig information från mätningar, för att skatta uppmätta punkter (landmärken) och egenpositionen simultant. Det är mycket användbart när den absoluta positionen (geoposition från GPS) inte är tillgänglig, i inomhusmiljöer som t ex kulvertar, fartyg, (brinnande) byggnader, och gruvor. Ramverket är fortfarande användbart när absolutpositionen är känd, för att minimera skattningsfel.

- **Representation av data:** kontinuerlig insamling av data, i synnerhet 3D-data, tenderar att resultera i stora datamängder, som till stor del innehåller redundant information. På en plattform med begränsad förmåga till data-beräkning och lagring så är det viktigt att kasta bort redundanta delar i största möjliga omfattning. Det kan göras genom att använda sig av en kompakt representation av kartan. Se kapitel 2.

- **Mätoptimering:** om flygningen behöver vara automatisk är det viktigt att se till att flygrutten är effektiv för mätningen. Ett relativt nytt forskningsområde är att utvärdera potentiella nya mätdatapunkter, för att optimera flygrutten för maximal kvalitet på erhållen karta på minimal flygtid.

- **Sensorfusion:** 3D-mätning ska kanske i första hand ses som ett komplement till konventionell visuell kamera och Termisk IR-kamera, ett komplement som ger information om geometri. Fusionen 3D och visuell/TIR kan i bästa fall ge ytterligare information. Kombinationen färg och geometri kan t ex underlätta för terränganalys. Ytterligare sensorer kan användas för att förbättra registrering.

Nedan följer först ett resonemang om vilka upplösningar som kan behövas för automatisk måligenkänning. Sedan beskrivs de ovan nämnda algoritmklasserna i tur och ordning.

2.1 Krav på upplösningar för måldetektioner

Under 2000-talet togs det fram några uppskattningar för mål-detektion, -klassificering, -igenkänning och -identifiering av de som arbetade inom området. Någon formell utvärdering hur väl dessa stämmer saknas ännu, men författarna har kommit till ungefär samma slutsatser vid egna tester. De baseras på att man använder målets geometri för analysen; intensitet med mera beaktas inte. Vidare ska 3D-punkterna vara jämnt fördelade över målet. Uppskattningarna lyder:

- Detektion: minst 10 punkter på målet
- Klassificering: minst 50 punkter på målet
- Recognition/Igenkänning: minst 200 punkter på målet
- Identifiering: minst 500 punkter på målet

I Tabell 1 visas hur många mätpunkter/m² det motsvarar för olika mål. För måligenkänning (*recognition*) är det vanligt att man matchar mot bibliotek, som kan vara CAD-modeller eller 2D/3D-modeller genererade från tidigare mätningar (2D eller 3D-data). De typer av UAV-system som studeras här är inte tänkta för att känna igen personer, andra system passar bättre till det. Man kan dock konstatera att med 50 punkter/m² kan vi identifiera alla fordon och detektera personer. Med en punkttäthet på 25 punkter/m² kan vi identifiera de större fordonen och göra måligenkänning på en personbil.

Tabell 1. Exempel på krav på antal punkter på målet (i toppvy) motsvarar i punkter/m².

	Stridsvagn T72 3,52 × 7,13 m	Bepansrat trupptransport BTR80 2,87 × 7,42 m	Personbil v70 2,07 × 4,68 m	Person 0,5 × 0,5 m	Landmina 0,1 × 0,1 m
Måldetektion	0,4	0,5	1,0	40	10 ³
Målklassificering	2,0	2,4	5,1	200	5*10 ³
Måligenkänning	8,0	9,7	20,6	800	2*10 ⁴
Målidentifiering	19,9	24,2	51,5	Sannolikt omöjligt	5*10 ⁴

2.2 Brusreducering

I Time-of-flight laserdata kan artefakter och brus uppstå på flera sätt. Dåliga väderförhållanden med t ex regn, snö, eller dimma kan ge upphov till brus, likaså starkt ljus från sol eller andra källor, direkt eller indirekt (t ex reflexer från vattenyta). Data kan också innehålla delmängder som man vill ta bort beroende på tillämpning, temporära objekt som t ex fordon eller djur, mark, lövverk etc. Då den inkommande datamängden vanligen är mycket stor (~1 000 000 punkter/s) är det väsentligt att reducera så mycket data som möjligt utan att förlora information om det som är av intresse.

Brus och artefakter tas bort med olika filter. Utjämning kan göras med hjälp av *statistiska filter*, t ex ett rullande medel- eller medianvärde. Avvikelsefilter (Figur 2E) tar bort enskilda punkter avviker från datapopulationen på något sätt, t ex att de har för stort avstånd från en yta som övriga punkter bildar. Ofta är det önskvärt, antingen för det visuella intrycket eller för att många algoritmer kräver det, att datat har samma punkttäthet på uppmätta ytor. Med *samplingfilter* omsamlas datat med en given upplösning, antingen genom att enbart behålla max en punkt inom varje voxel (*culling*, Figur 2D), eller genom ersättning (*replacement*), att ta mittpunkten av voxeln eller ett lokalt statistiskt medelvärde.

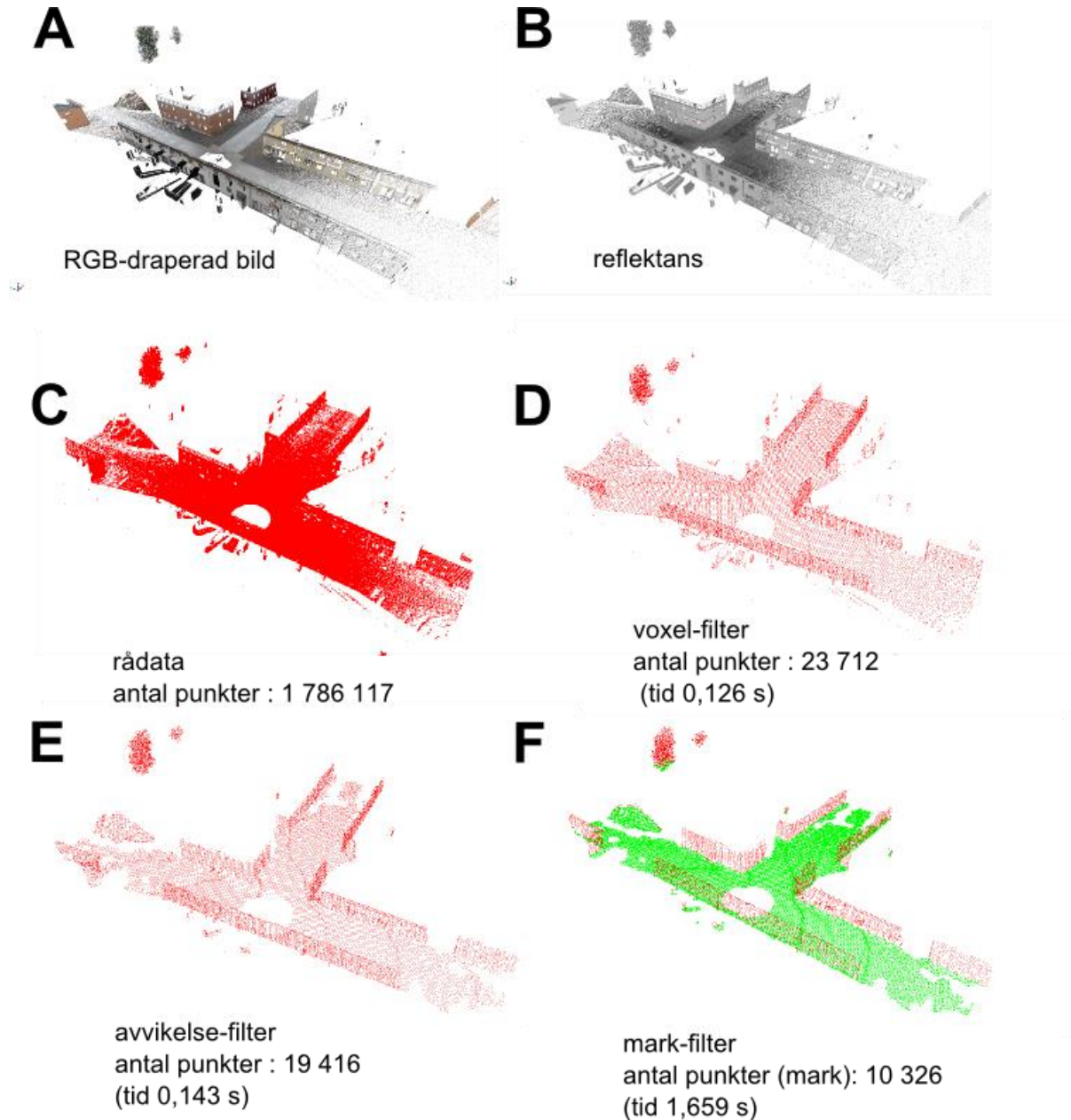
Med *morfologiska filter* kan bl a kluster av datapunkter avlägsnas, eller hål fyllas igen där data saknas. Morfologiska filter fyller en annan viktig funktion, de resulterar ofta i någon form av segmentering av bilden, som kan vara mycket användbar för t ex visualisering och detektion, då segmenten kan svara mot hela eller delar av objekt. Markestimering (se nedan) är ett sådant exempel.

Figur 2 ger exempel på effekt och tidsåtgång för några olika typiska filter³. Markskattning (eng. *bare earth extraction*) är exempel på en mer sofistikerad filterning, där man försöker klassificera vilka punkter som kommer från marken (Figur 2F). Det är ett aktivt forskningsområde. Prestanda varierar med olika algoritmer och olika markområdestyper; algoritmerna är ofta anpassade för en speciell typ. En bra jämförelse av prestanda på olika algoritmer ges av Sithole och Vosselman (2004).

Sammanfattningsvis kan sägas att filtrering av 3D-data är ett moget och konsoliderat forskningsområde. De flesta tillämpningar kräver en förfiltrering, där en kombination av väl beprövade filter väljs ut för ändamålet, utan att ta mycket utvecklingstid i anspråk. Sällan blir filtreringssteget tids- eller kvalitetsbestämmande för

³ implementerade med C++-biblioteket Point Cloud Library, <http://pointclouds.org>.

systemets funktion. Det är dock ett förutsägbart och relativt enkelt steg, vilket möjliggör parallellisering, på grafikkort eller FPGA:er (skraddarsydd hårdvara). På så vis kan en uppsnabbning mellan 10 till 100 gånger göras på filtreringssteget, jämfört med en seriell algoritm på en konventionell processor.



Figur 2. Effekt och beräkningstider hos några olika typiska filter, på en modern desktop (Xeon 3.2 GHz). Filtern är tillämpade seriellt efter varandra i ordning: rådata (C), voxel-filter (D), avvikelse-filter (E) och mark-filter (F). Återstående antal punkter efter filtrering samt beräkningstiden är angiven för varje steg. A: 3D-data draperat med RGB, som referens. B: reflektans.

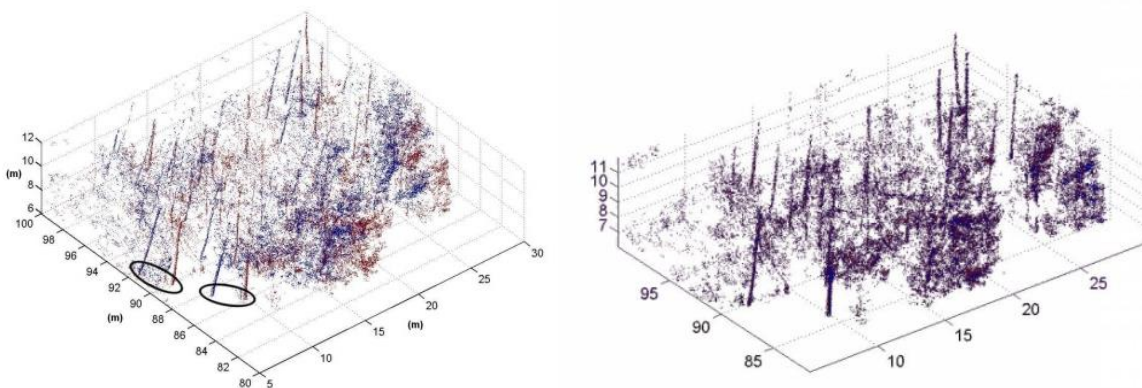
2.3 Registrering

Med sensorer i rörelse tillkommer ett problem – man måste skatta den egna rörelsen från den ena mätningen till en annan. Detta innebär att ett avstånds- och rotationsfel föreligger mellan mätningarna. Dessa fel är synnerligen relevanta för små, lågkostnads-UAVer, där positioneringsnoggrannheten inte är tillräcklig. Om mätningarna överlappar kan dessa fel kompenseras för genom att matcha överlappet – *registrering* (se definition ovan).

Detta kan göras för hand, men det är för kostsamt för de flesta applikationer. En enkel, populär algoritm för att registrera har allmänt använts sedan början av 90-talet – *Iterative Closest Point* (ICP, Besl & McKay 1992).

Algoritmen har dock många svagheter: den är iterativ och därmed långsam, den garanterar inte konvergens till rätt läge, och det finns ingen tydlig indikation på om registreringen lyckats eller inte. Forskningen inom området är dock mycket aktiv. Få alternativa algoritmer har utvecklats. Istället har olika förbättringar föreslagits: uppsnabbning, algoritmiskt (Rusinkiewicz & Levoy, 2001; Jost & Hugli, 2003; Nüchter et al. 2007) eller på grafikkort (Qiu et al., 2009; Tamaki et al., 2010) och FPGA (Belshaw & Greenspan, 2009), robustare algoritm (Gelfand et al., 2005), utnyttjande av mer information, såsom färginformation (Hu et al., 2012). Varianterna tenderar att lösa registrering väl i en viss kontext som uppfyller vissa antaganden, snarare än att vara en generell lösning på ICP:s tillkortakommanden.

För att registrering för kartering i utomhusmiljöer (Lee et al., 2013) skall fungera måste a) det finnas någon 3-dimensionell form i miljön (plan mark går inte), b) det måste finnas väl definierade ytor (lövverk t ex behöver filtreras bort), c) man på något sätt utvärdera registreringen, att resultatet är rimligt. När registrering med ICP inte är möjlig får man använda sig av alternativa metoder (Tolt et al., 2006) eller enbart förlita sig på dödräkning från sensorn.



Figur 3 – Exempel på registrering med ICP, från Wiklund (2006). Vänster: två punktmoln (blått respektive rött) uppmätta på ett skogsparti överlappar, men har förskjutna koordinatsystem relativt varandra. De svarta ellipserna belyser två trädstammar förekommande i de två punktmolnen. Höger: punktmolnens förhållande efter registrering.

Resultat från ICP kan avsevärt förbättras om man har ett utgångsläge som ligger nära registeringsläget (dit algoritmen ska konvergera). Flera metoder, t ex *Spin Image* (Johnsson, 1997), *Point Feature Histograms* (PFH, Rusu et al., 2011) och *Normal Aligned Radial Features* (NARF, Steder et al., 2009) förekommer. Det antal iterationer som ICP behöver för att konvergera varierar mycket, och i praktiken kan registreringar ta allt mellan 0,5-15 s på en modern dator. Hårdvaruoptimering har också utvärderats (Qiu et al., 2009; Tamaki et al., 2010; Belshaw & Greenspan, 2009) och kan i praktiken ge en uppsnabbning mellan 10 till 100 gånger.

2.4 Kartering

Simultaneous Localization And Mapping (SLAM, svenska "samtidig lokalisering och kartering) är ett beräkningsproblem, där man samtidigt försöker skatta en karta och den egna mätpositionen relativt kartan. För en översikt av SLAM se t ex Thrun (2002), Aulinas et al. (2008) och Puente et al. (2013). En sekvens av mätpositioner från en rörlig sensorplattform relateras till varandra dels via uppmätta landmärken, dels via en rörelsemoddell för plattformen. Genom att kontinuerligt relatera rörelsen och landmärkena till varandra, så kan man minimera skattningsfelet, till exempel genom tillståndsfiltrering. Vanligen används samma typer av filtrering som är vanlig inom målföljning, t ex Kalmanfilter (Thrun, 2002; Aulinas et al., 2008). Någon variant på Kalmanfiltrering tillämpas vanligen. För att det ska fungera måste landmärken associeras mellan efterföljande mätningar. Om det är ett stort område som skall karteras så blir det många landmärken och därmed beräkningstungt.

SLAM kan tillämpas för vilka sensorer som helst. Stereovision (Rydell & Emilsson, 2012), monokulärt (Lemaire & Lacroix, 2007) och djupkameror är vanliga, men akustiska (sonar för undervattenstillämpningar) förekommer också (Aulinas et al., 2008).

Det är särskilt motiverat att använda SLAM när god positionering (typiskt med GPS och tröghetssensorer) saknas eller är mycket dålig. Därför är SLAM synnerligen motiverat i komplexa inomhusmiljöer, t ex gruvor, brinnande hus, stora fartyg etc. Men även med positionering är SLAM motiverat för att minimera skattningsfel.

En SLAM-algoritm kan tillämpas för att förbättra registreringarna mellan punktmoln i en 3D-kartering (benämns ofta 6D SLAM, då både position och orientering skattas). Man måste då spara varje enskilt punktmoln, och iterativt registrera och kompensera för sensors rörelseskattning, för att relaxera registreringsfelen över hela kartan. Resultat med rimliga beräkningstider har demonstrerats av flera (Nüchter et al., 2004; Nüchter et al., 2007). En SLAM-algoritm speciellt avsett för Velodynes roterande laserskanner har också föreslagits (Moosmann & Stiller, 2011).

2.5 Datastrukturer för kartering

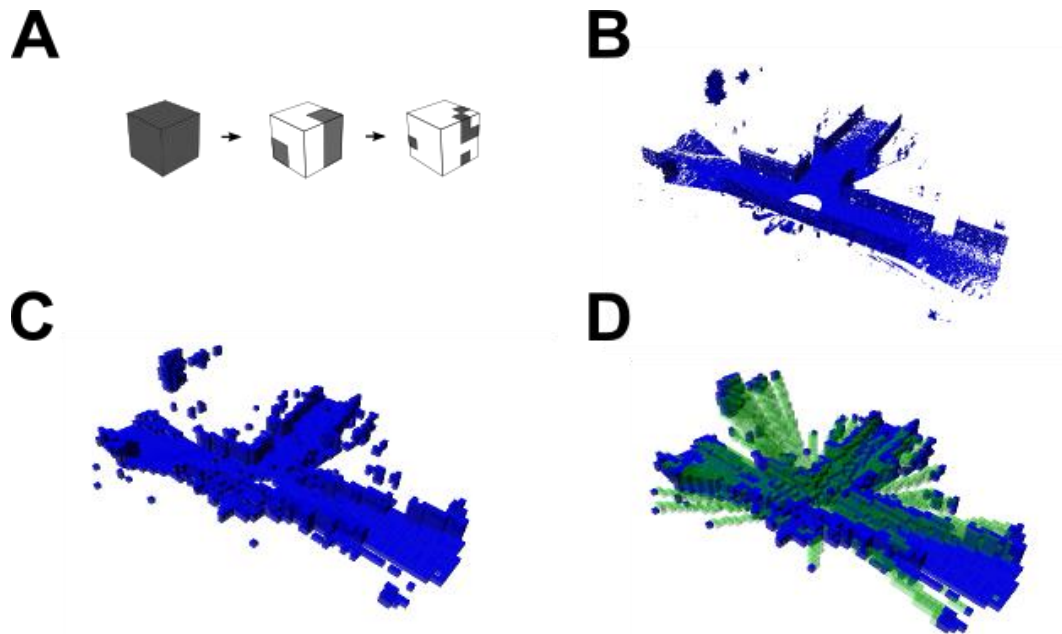
Datainsamling i 3D ger mycket snabbt upphov till stora mängder data. Till exempel mäter FOIs Velodyne-sensor 700 000 punkter/sekund. Behovet av att reducera data och behålla en kompakt information är stort inom många tillämpningar. En utveckling går mot en representation som kallas *Occupancy Grid Map* (OGM, bra svensk term saknas ännu). Det är en voxelgrid (voxelkarta) med effektiv datastruktur, en karta där man lagrar information om vad man vet om var i rymden det finns ytor, och var det inte finns (se Figur 4). OGM:er är intressanta för att

- det sparas information om avmätta områden (även tom volym, luft),
- 3D-upplösning kan flexibelt ställas in, och kan vara olika inom olika områden,
- nya uppmätta punkter som svarar mot gamla förbättrar noggrannheten, men kostar inget extra minne,
- de gynnar algoritmer som kräver snabb genomsökning av kartan, t e x registrering.

I en OGM så sparas ett skalärt värde per voxel (volymcell) som representerar *occupancy*. Lågt värde betyder att voxeln sannolikt representerar fri volym (luft, laserstrålar har passerat igenom vid mätning). Högt värde innebär att solid sannolikt finns i voxeln (laserstrålar har reflekterat vid mätning). Detta ger en minneskompakt representation. Beroende på tillämpning kan information behöva utökas för varje voxel med mätstatistik, t ex medelvärde och varians för uppmätta punkter. I vissa fall sparas samtliga uppmätta punkter. Då blir voxelkartan minneskrävande, men kan användas för att effektivt söka punkter i molnet.

En OGM är synnerligen lämpad för kartering, som kan göras ombord på UAVn. På en modern PC (3,2 GHz, 32GB RAM) kan 200 000 punkter/s läsas in till en OGM⁴.

⁴ FOIs tester, 120x125x14 m stort område, 0.4 x 0.4 x 0.4 m upplösning.



Figur 4. Exempel på Occupancy Grid Mapping (OGM). **A:** strukturen hos ett OGM: rymden (mätområdet i 3D) är indelat i voxlar i en hierarki som kallas för octträd, från en grövre till allt finare upplösning. Varje cell, som är kubiskt formad, har 8 st lika stora subceller. Grå färg innebär att data har mätts upp i voxeln, vit färg att inga data påträffats där. **B:** Exempel på OGM, renderad med 0,2 m upplösning. **C:** Samma data som i (B), med 1,6 m upplösning. **D:** Samma som i (C), men även fria voxlar (voxlar som genomkorsats av laserstrålar utan att reflektera ljus tillbaka till sensorn) visualiserade i grön färg.

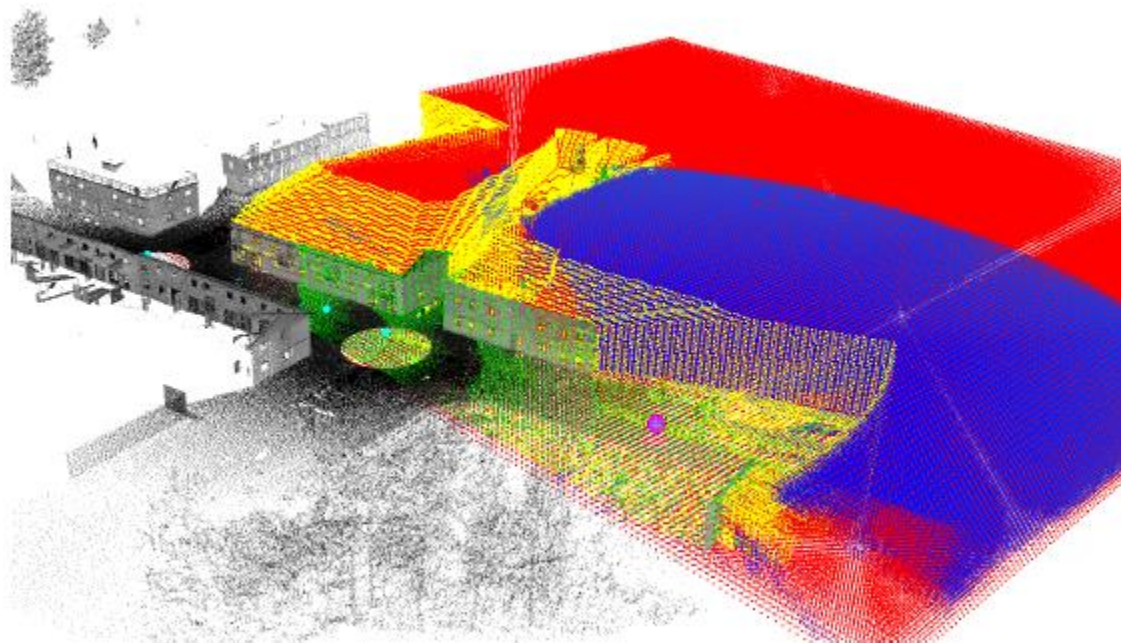
2.6 Mätoptimering med Next Best View

När det är bråttom med datainhämtning, eller om en operatör inte är tillgänglig, måste ruttplaneringen automatiseras. Då kommer datakvaliteten att avgöras av vilken rutt som gjorts. Den kan optimeras med avseende på datakvalitet. Detta kan göras med hjälp av en utvärderingsalgoritm som kallas *Next Best View* (svenska ”nästa bästa vy”) – givet vad plattformen mätt upp hittills, var är bäst att göra nästa mätning ifrån (Connolly 1984, Svensson 2014)? Gör man en lagom grov skattning, som kan göras till exempel med en Occupancy Grid Map, så kan man göra sådana utvärderingar i realtid (Svensson 2014). Occupancy grid maps gör det möjligt att mycket enkelt väga beräkningstid mot noggrannhet.

2.7 Sensorfusion

3D-data kan draperas med RGB (färg), gråvärde från en visuell kamera, från TIR-kamera eller från uppmätt laserintensitet, för att förbättra visualiseringen. Drapering kan även underlätta segmentering och registrering av 3D-data. RGB eller gråvärden från IR kan också användas för att förbättra tillståndsestimeringen i en 3D-kartering med SLAM (Kühnert et al., 2006; Henry et al., 2010). Data från en multi- eller hyperspektral kamera kan användas på samma sätt, men med skillnaden att man kan få flera olika (våglängdsberoende) draperingar av sitt punktmoln. Vid multipla ekon från ett laserskott kommer endast det första ekot att draperas med uppmätt kulör.

Ytterligare sensorer kan också förbättra robustheten vid klassificering och identifiering.



Figur 5. Illustration av Next Best View. Det gråa är uppmätta punkter, det röda är okänd volym i det aktuella intresseområdet och gula voxlar angränsar till okänd volym. Om sensorn hypotetiskt ställs i den lila punkten i figuren, så är den blå volymen potentiell ny uppmätt volym (grön visar sensorns överlapp med tidigare mätningar). Den volymen ska då jämföras med motsvarande utvärderingar från andra kandidatmät punkter (ljusblå).

3 Liten UAV

Det sker idag en snabb utveckling av små UAV:er, både för civilt och militärt bruk (Nex & Remondino, 2013). En liten UAV faller under flygfordon klass 1A (transportstyrelsen, vikt upp till 1,5 kg), 1B (vikt upp till 7 kg) och klass 2 (från 7 upp till 150 kg). Dessa klasser får inte flyga högre än 120 m och pilot måste ha visuell kontakt med farkosten. Små UAVer har potential att snabbt och effektivt tillföra en lägesbild för förbandet över det operativa området. Det handlar om att dokumentera ett begränsat område. Systemets syfte är därför inte att i första hand att leverera högnivåinformation, så som måligenkänning, klassificering eller följning av t ex stridsfordon. Istället handlar det om att leverera en tydlig, överskådlig lägesbild eller karta till operatören som enkelt kan användas för exempelvis en siktanalys. Det ställer höga krav på signalbehandling och användargränssnitt (se Figur 6). En annan möjlig tillämpning är förändringsanalys, t ex för att upptäcka så kallade *Improvised Explosive Devices* (IED, se Björkert et al., 2013).

En småskalig UAV-plattform innebär relativt låg kostnad, portabilitet och enkel logistik, men den har på grund av sin storlek mycket begränsad lastvikt, och därmed processorkraft, signalbehandling och dataöverföring. Dess sårbarhet (bekämpning eller telestörning) gör också att den inte bör vara för dyr.

Lasersensorer genererar 3D-punkter relativt ett koordinatsystem, som i sin tur är relativt sensors position. Ett första steg är att transformera 3D-data till ett gemensamt koordinatsystem, som kan vara i ett lokalt koordinatsystem eller globalt geokoordinatsystem. Dessa beror av plattformens (UAVns) position, som kontinuerligt måste skattas, med hjälp av tröghetsensorer och GPS. Detta steg tas ej upp här, det behandlas utförligt i t ex Tulldahl & Larsson (2014). I det här kapitlet beskrivs uppskattningar på punkttätheter vid inhämtning av data, samt olika realtidsaspekter för småskaliga UAVer såsom datatakt och beräkningstider för olika algoritmer.

3.1 Beskrivning av UAV och lasersystem

FOI utvecklar sedan 2014 en liten UAV-plattform i kategori 1B för ladar (Se Tulldahl & Larsson, 2014). Plattformen är en Hexakopter, som bär en roterande laserskanner, en Velodyne HDL-32E. Målet är att kunna demonstrera potentialen hos ett komplett sensorsystem. I det här kapitlet utgår våra resonemang från denna plattformens prestanda. Plattformens parametrar sammanfattas i Tabell 2.

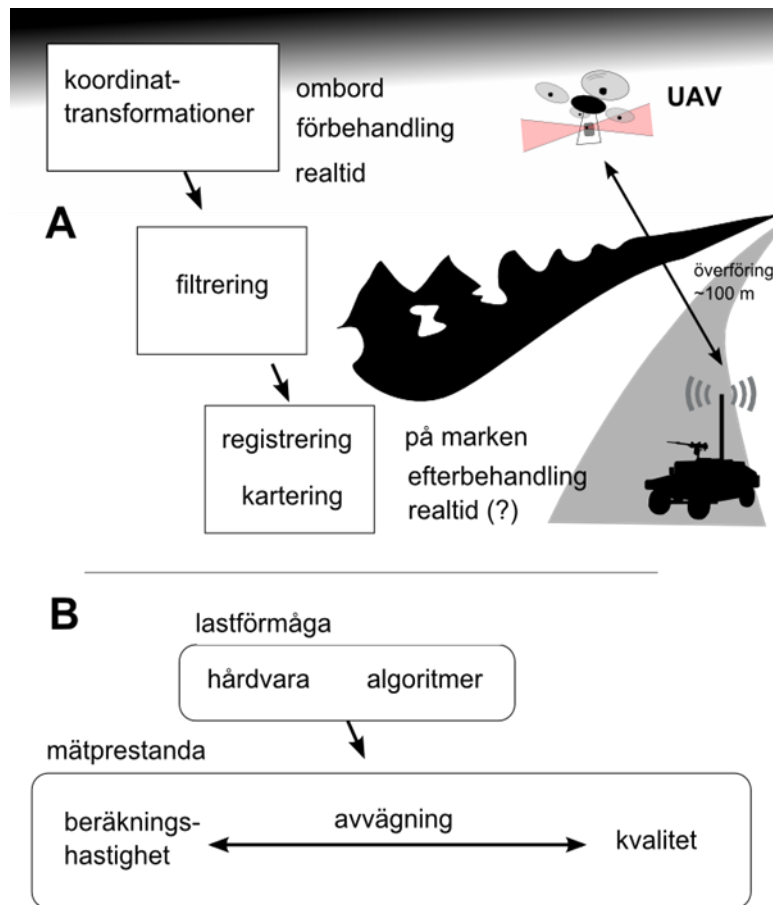
Sensorn består av 32 st laser-detektorpar, separerade med ca 1,33° vertikalt, som roterar 360° horisontellt kring sensors lodaxel. Eftersom skannern roterar samtidigt som den rör sig i en flygande plattform kommer punkttätheten vertikalt bero på flygfarkostens marschhastighet framåt. Långsammare fart resulterar i ett tätare punktmoln. Standardavvikelsen på avståndet är bättre än 2 cm på 25 meters mätavstånd. För varje utsänt laserskott detekteras det starkaste ekot. Sannolikheten att penetrera vegetation ökar med denna metod. Att detektera sista ekot ökar sannolikheten att detektera marken eller eventuella mål (en sådan mjukvara är under framtagning). Ett alternativ till Velodyne kan vara laserskannern Riegl VUX-1, som klarar av att registrera multipla ekon (se Henriksson et al., 2014b). Plattformen kompletteras lämpligen med visuell och/eller IR-kamera, se kapitel 2.7.

Utvecklingen av lågkostnadssensorer för positionering har varit explosionsartad under de senaste åren, både för tröghetsensorer (IMU, Chao et al., 2010) och globala positioneringssystem (däribland GPS), ofta motiverade för lågkostnads-UAVer för civila tillämpningar. Det är svårt att bedöma vilken noggrannhet som kommer att uppnås inom en tidshorisont på 10 år. En billig positionering idag kan utan vidare uppnå en noggrannhet på +/- 5m GPS, men vissa tillverkare som använder sig av *Real Time Kinematic* (RTK)-teknik (till exempel Swift Navigation Inc.) hävdar att de klarar noggrannheter på cm-nivå.

Dataöverföring från UAVn till mark via WiFi kan begränsas av dess räckvidd (ca 100 m) och bandbredd (44 Mbit/s för nyttodatomängder line-of-sight, civila datalänkar). (Andra alternativa kommunikationslänkar kan vara tänkbara, av utrymmesskal tas de ej upp i denna rapport). Ett svårt designbeslut är vilken signalbehandling som behöver göras ombord på UAVn, och vad som får göras efter dataöverföring (Figur 6).

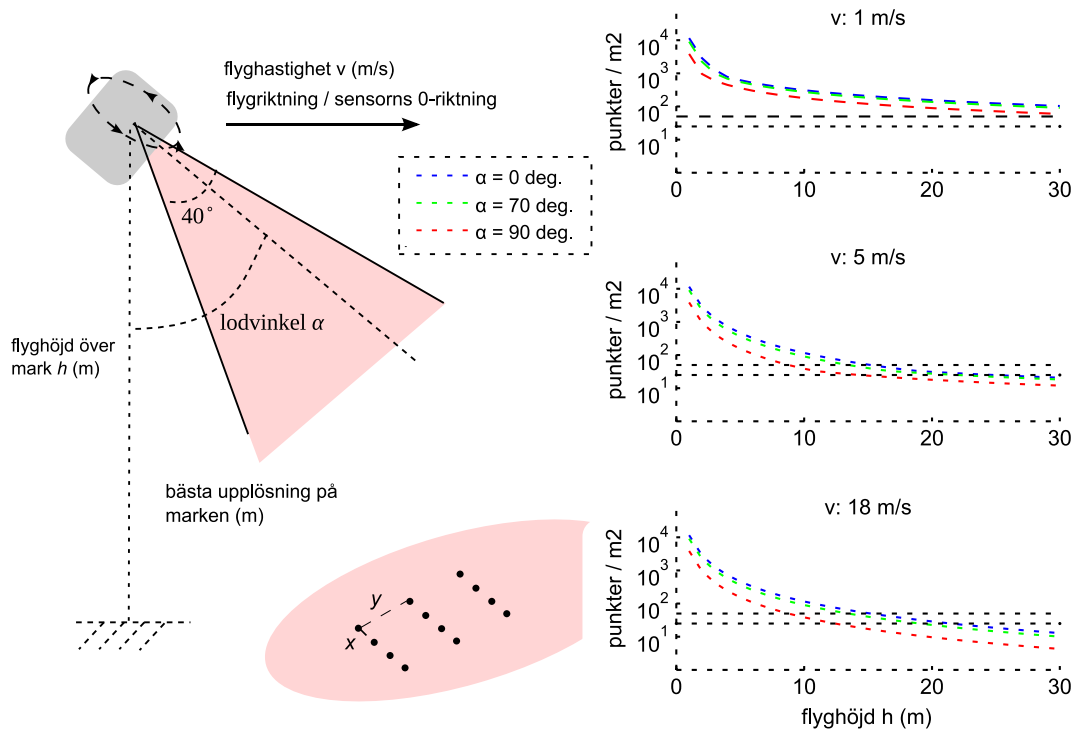
Tabell 2. Sammanfattning prestanda för sensorsystem för FOI:s UAV-system. Se Henriksson et al. (2014b), samt Tulldahl & Larsson (2014).

Parameter	Skannande multistråle
Avståndsupplösning Det minsta avstånd mellan två ytor inom synfältet för samma mätning som krävs för att ytorna ska kunna skiljas åt. För en matrisdetektor innebär detta olika ytor inom synfältet för en pixel.	~0.5 m (pulslängden är 2-5 ns)
Lateral vinkelupplösning Den minsta utbredning på ett objekt som kan mätas utifrån data, det vill säga hur stort ett punktformat objekt ser ut att vara.	0,08°
Bildalstringsförmåga	Utskärning ur stor scen, stort antal pulser
Räckvidd	1-70 m
Punkter per sekund	700 000
Punktseparation Avståndet i sidled mellan uppmätta punkter. Kan anges som vinkel eller som avstånd mellan två punkter på ett definierat avstånd. Anges ofta istället som antal punkter per kvadratmeter på en definierad flyghöjd när punkterna inte är fördelade enligt ett rutmönster.	600 punkter/m ² @ 5 m 150 punkter/m ² @ 10 m 40 punkter/m ² @ 20 m
Absolut noggrannhet positionering Standardavvikelse för positionsfel när datapunkter har georefererats. Detta ger ett mått på felet mellan två mätningar mot samma punkt från olika sensorpositioner.	~0.1 m
Relativ noggrannhet positionering Standardavvikelse för mätfel vid många mätningar mot samma yta. Innehåller endast fel från ladarsensorn och mäts för stillastående sensor mot statisk scen.	2 cm @ 25 m
Synfält (FOV) ladar	40° vertikalt, 360° horisontellt
Typisk marchfart för UAV	1 – 20 m/s



Figur 6. Förutsättningar för signalbehandling på småskaliga UAVer med skannande laser. **A:** signalbehandlingskedja. Insamlad data behöver transformeras till 3D punkter, filtreras och sedan registreras och tillämpas, för t ex kartering. UAVns processorkraft och WiFi-länkens bandbredd avgör vad som görs ombord och vad som görs efter inhämtning av datat på marken. **B:** Lastförmågan, och sensors fysiska storlek begränsar vilken hårdvara som kan användas, som i sin tur begränsar vilka algoritmer som kan tillämpas. Dessa avgör sedan mätprestandan hos systemet, där kvalitet alltid kan offras för snabbare beräkningstider.

3.2 Användning och innebörd för dataanalys



Figur 7. Exempel på bästa dataupplösning på marken beroende på parametrar sensorplattformens vinkel relativt lodriktningen, höjd över marken och UAVns färdhastighet, som vi antar sker i sensors riktning. Vi antar att vi använder FOI:s UAV (Tulldahl & Larsson 2014). Sensors rotation beror ej av färdhastigheten, utan bara av sensors upplösning (700 000 punkter/s/360 grader, sensorn roterar i 10 Hz). Vänster: sensorgeometri, parametrar. Höger: Bästa punkttäthet på marken i punkter/m², för tre olika flyghastigheter och tre olika lutningar α på sensorn. På låga flyghöjder på några meter kan upplösningar på 1 000 – 10 000 punkter/m² uppnås. Svarta heldragna (50 punkter/m²) och streckade (25 punkter/m²) linjer markerar gränsvärden för måldetektering och målklassificering.

Sensors infallsvinklar, markhöjd och flyghastighet har inverkan på vilken upplösning man får på 3D-data. Här gör vi en uppskattning på hur upplösningen beror av dessa parametrar. Vi väljer FOI:s UAV-plattform som exempel. Figur 7 visar upplösningen för givna geometrier. Tittar man på punkttätheten kan man se hur den varierar med parametrarna (observera logskalan). De svarta linjerna anger värdet 25 punkter/m² som är ett minimikrav för detektering av större fordon och måligenkänning av personbil (se ovan). Det riskerar alltså att understigas om man flyger tillräckligt högt, fort eller horisontellt.

För att tillämpa förändringsanalys för att upptäcka mindre föremål som IED:er (toppvy ca 1 dm^2) krävs 10^3 - 10^4 punkter/m². Från figuren kan man utläsa att för att komma upp i sådana punkttätheter måste man flyga på mycket låg höjd, med låg hastighet och mäta med en mycket liten lodvinkel.

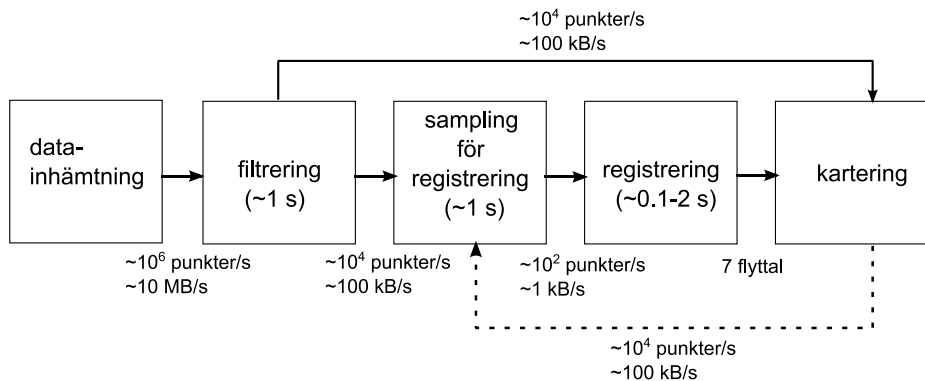
Låga flyghöjder gör att mätningen påverkas av flygrutten: kuperad terräng och byggnader innebär skylning i sensorvyerna och behöver därför mätas från flera perspektiv för att få fullständighet. Brus och gleshet i data gör också att det är eftersträvsvärt att mäta flera gånger över samma område. Att registrera data, dvs att få mätningarna att överlappa utan spatials fel, är en viktig problemställning som man bör lösa automatiskt.

3.2.1 Noggrannhet

När sensorn inte är i rörelse är den relativa noggrannheten uppmätt till ca 2 cm standardavvikelse på 25 m avstånd. Då det är betydligt mindre än punktseparationen (typiskt 0.1-1.0 m) för de flesta fall, är noggrannheten sannolikt bestämd av hur väl vi kan skatta plattformens rörelse mellan mätningarna. Noggrannheten som kommer att uppnås under de närmaste åren är svår att förutse, men det finns en tydlig trend att de blir billigare och noggrannare. De bästa produkterna 2014 hävdar redan en noggrannhet för GPS på centimeter-nivå för ca 1000\$ (Swift Navigation Inc.). Stora fel på punktmolnets läge kan dock tillkomma med mycket små lutningsfel från tröghetssensorn, pga punktmolnets avstånd från rotationscentrum (UAVn). Det är därför osannolikt, att man kan lösa karteringen enbart genom att förlita sig på GPS och tröghetssensor.

3.3 Realtidsaspekter för signalbehandling

3.3.1 Datatakt



Figur 8. Diagram för datatakt för kartering.

En modern ladar, t ex den Velodyne-sensor som används på FOI, ger ifrån sig 700 000 punkter/s. Dessa måste behandlas online eller offline, ombord på UAVn eller efter överföring till dator på marken. En dator motsvarande en modern, kraftfull skrivbords-PC behöver inte vara större än en läskburk (t ex Dustin Nano, 3.2 GHz Xeon processor), så det är en beräkningskapacitet som vi kan anta finns ombord på en liten UAV. Data, så länge WiFi är inom räckvidd, kan överföras med 44 Mbit/s (uppgift för nyttodata, på en typisk civil länk line-of-sight).

Figur 8 visar en skiss på vilka beräkningar och datatakt det kan vara fråga om. Tiderna som anges i sekunder är typiska för de datamängder som kommer ifråga. Datainhämtningen och filtreringen är i stort sett deterministisk i beräkningstid, det vill säga de varierar inte nämnvärt. Det gör inte heller samplingen för registrering. Registrering (med ICP, se kapitel 2), däremot, är stokastisk pga att algoritmen är iterativ, och konvergerar olika fort. Punktmoln kan stoppas in i en voxelkarta med ca 200 000 punkter/s (egna tester på FOI, Xeon 3.20 Hz processor).

Ett designbeslut som komplicerar bilden är kartering, om man tillämpar SLAM (se kapitel 2.4). Då får man ett iterativt förfarande (den streckade återkopplingen i figuren) allteftersom data kommer in, som medger att man kan efterkorrigera alla tidigare registreringar för att minimera det totala felet. Iterationerna gör att det blir svårt att hinna med i realtid. (Ett exempel från kartering av en gruva (Nüchter et al., 2004), byggdes en karta av 48 st 3D-skanningar upp med en iterativ SLAM-ICP-algoritm offline, där totalt 497 st ICP-registreringar gjordes på 52 s (Pentium IV processor)). När data stoppas in i en voxelkarta, så förloras normalt information om vilken mätning data kommer ifrån. Det är alltså inte förenligt med en iterativ lösning, utan får göras när man är klar.

En hybridlösning är tänkbar, där man itererar över flera punktmoln lokalt, sparar och fortsätter sedan på en annan voxelkarta, med en sammanföring av alla kartor på slutet (Ratter et al, 2013) . En fråga är om man bör kartera i voxelkarta på plattformen, och skicka ned denna, eller om man bör skicka ned rå- eller filtrerat data, och stoppa in i en voxelkarta i ett senare skede. Det tidigare blir nödvändigt om kartans har en finare upplösning.

3.3.2 Minneskrav för en voxel-grid-karta (Occupancy Grid Map)

Anta att vi vill kartera 1 hektar (100m x 100m) landyta. En konservativ uppskattning är att vi kommer att ha 1 fylld voxel i varje vertikal kolumn, givet att det inte finns stora vertikala ytor i området. Med en upplösning på 0.2 m blir det ca 300 000 voxlar, inklusive supervoxlar (grövre upplösningar på kartan, se kapitel 2.5). Med en voxelstorlek på 100 bytes/voxel blir det ca 30 MB minne totalt. Om fria volymer också modelleras blir minneskravet 10-100 ggr större, beroende på hur högt upp i luften man vill gå. I ett exempeltest på FOI, där också fri volym modelleras, tog en karta på 4 100 000 voxlar (125 m x 120 m område, 14 m högt) upp ca 1 GB arbetsminne (ca 250 bytes/voxel. Dessa voxlar innehöll en del annan information, större än vad som är nödvändigt).

Om allt filtrerat data (istället för att använda en voxelkarta) sparas i en takt av 10 MB/s, så kommer man alltså upp i 1 GB minne på mindre än 2 minuter (hur lång tid det tar att kartera 1 hektar beror på flera faktorer, terrängens natur och hur noggrann man vill vara.)

3.4 Sammanfattning

Våra beräkningar av punkttäthet för olika flyghastigheter visar att om man flyger med 18 km/h (5 m/s) kan man få 25 punkter/m² på en maximal flyghöjd av 25 m, för 64 km/h (18 m/s) gäller en maximal flyghöjd 20 m. Vi bedömer att 25 punkter/m² är tillräcklig punkttäthet för att generera en lägesbild. Om man vill titta på detaljer, t ex markplacerade minor eller störd jord för indikationer på nedgrävda objekt, behöver man en punkttäthet på mer än 10 000 punkter/m². För att få de punkttätheterna måste man flyga på mycket låga höjder och långsamt.

Våra och andras försök med lagring och analys av punktmoln visar på datamängder runt 10⁵-10⁶ punkter/s, lagringsutrymme på Mbyte-Gbyte för rådata, och beräkningstider på PC-processorer på sekunder-minuter. Om man har specialanpassad hårdvara, t ex FPGA, kan man minska dessa beräkningstider. Det är ännu oklart om vissa beräkningar ska ske ombord på UAVn eller om rådata ska länkas ner till markstationen, förmodligen beror det på tillämpningen och hur noggrann positionsinformation som krävs. Gör man beräkningar ombord kan datamängden reduceras och kapacitetskraven på datalänken minskar. Om man har behov av bästa möjliga positionsinformation kommer man att behöva göra registreringsberäkningar med SLAM av hela punktmolnet, och då måste rådata länkas ner till markstationen.

4 Stor UAV

Huvud användningen för den här typen av UAV är storskalig spaning och inhämtning av underrättelser. I storskalig spaning ingår att ett större område (km^2) ska kunna täckas och inom det området ska mål (fordon, byggnader, broar) kunna detekteras, följas, klassificeras och kännas igen. Resultat av dataanalys ska presenteras i realtid, för att kunna vara underlag till exempel för en vapeninsats. Data bör lagras som en del av dokumentation av underlag inför ett beslut.

Även för inhämtning ingår att ett större område (km^2) ska kunna täckas och inom det området ska mål (fordon) kunna detekteras, följas, klassificeras och kännas igen. Ibland krävs även här att resultat av dataanalys ska kunna presenteras i realtid. Det som tillkommer är möjligheten till vidare efteranalys av data, till exempel att jämföra data insamlad vid två olika tillfällen och att kunna kombinera data/resultat med data/resultat från andra plattformar (sk data- och informationsfusion). Detta medför viktiga krav på lagring av data och märkning (annonsering) av data/resultat (sk metadata).

Denna typ av UAV bär ett högpresterande sensorsystem, som medger hög upplösning och mätning under långa tider (timmar). Lasersystemet är av typen fotonräknande med matrisdetektor. Fördelarna med fotonräknande matrisdetektorer, jämfört med ett traditionellt skannande system, är flera, till exempel låg lasereffekt, lång räckvidd, hög yttäckning och hög avståndsupplösning. Nackdelarna är höga krav på positioneringssystem, stora krav på beräkningskapacitet och krav på långa fokallängder för att nå bra lateral upplösning. Precis som i (Henriksson et al, 2014), (Henriksson, 2014), och (Amselem, 2014) använder vi Princeton Lightwaves sensorsystem med fotonräknande matrisdetektor för räkneexempel. Nedan beskrivs ladar- och andra sensorsystem som UAV:n bär, därefter studerar vi krav på antal mätningar och vilka datamängder och datatakter som det innebär för kartering, noggrann inmätning litet område och målföljning.

4.1 Lasersystemet och andra sensorer

Fotonräknande system skiljer sig från skannande system på ett fundamentalt sätt, som påverkar hur data ska behandlas. För varje laserpuls fås ett svar (en detektion) som antingen innehåller tidpunkten när den första fotonen detekterades eller svaret att ingen foton detekterades (50% sannolikhet). Det finns inget sätt att från en enskild mätning avgöra om fotonen kommer från en reflekterad laserpuls eller bakgrundsljus. Det är därför nödvändigt att mäta många gånger mot samma position och sedan med statistiska analysmetoder av mottagna fotoner hitta de delar av data som troligen motsvarar en reflekterande yta. Det är också nödvändigt med många mätningar för att upptäcka multipla reflekterande ytor på olika avstånd, då svar endast kan fås från en av dem i varje mätning. Sensorsystemet är känsligt för brus, för en ansenlig mängd pixlar får man detektioner som härrör från aerosoler och andra partiklar i luften eller från brus i sensorn (till exempel mörkerklick). Det finns också en viss sannolikhet för överhörning mellan pixlarna i matrisdetektorn. Tillsammans gör detta att man måste mäta flera gånger mot samma position för att få tillförlitlig data och man måste göra gedigen brusreducering av signalen. Det är möjligt att göra varje mätning i en position mycket snabbt (μs -ms), så det går snabbt att samla ihop mycket data från en position eller att mäta mot samma position från flera olika riktningar. Efter brusreduceringen erhåller man ett 3D-punktmoln med mycket högre precision och avståndsupplösning än vad ett klassiskt skannande, flygburet system kan ge.

Ett exempel på simulerad data visas i Figur 9, där ett fordon har placerats bakom ett träd och döljs delvis av trädstammen och lövverket. Avståndet mellan sensor och mål är 1 km och mätningen är gjord i framåttittande vy, som om sensorn vore placerad på en UAV med flyghöjd 250 m.

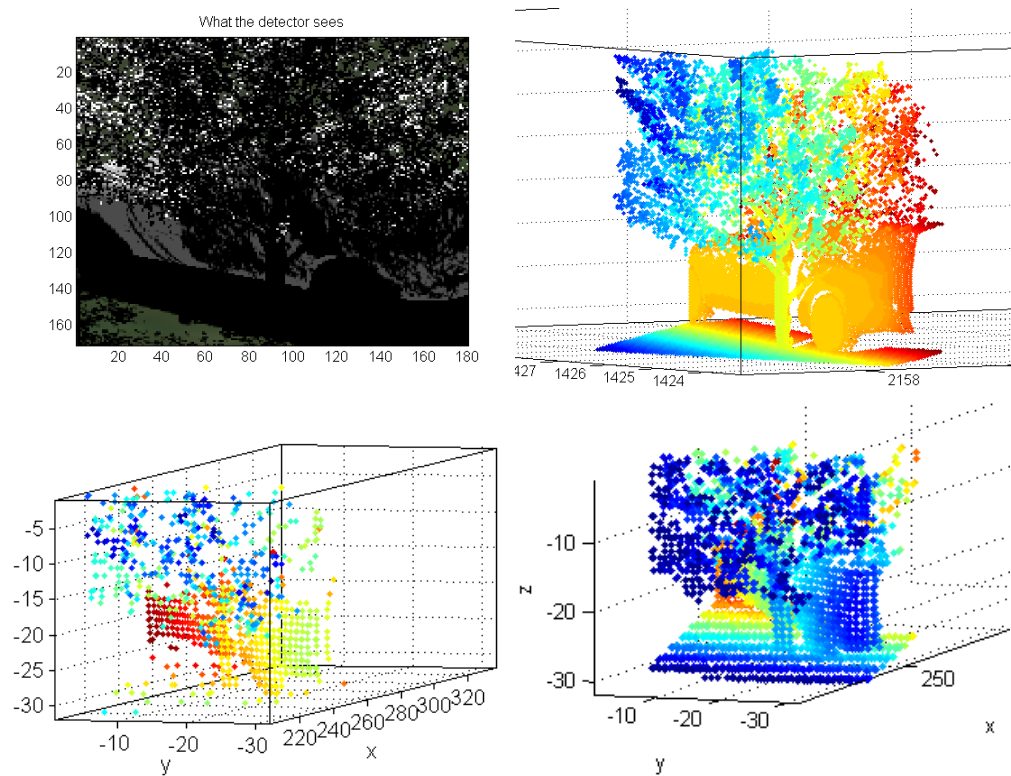
Förutom ladarn kommer sensorsystemet att ha en visuell (VIS) kamera och en högpresterande infraröd (IR) kamera i mellanvågsbandet, liknande de som finns i US Navys UAV ScanEagle⁵. Det är möjligt att erhålla både 3D-information och reflektans från ladarn. 3D-information av god kvalitet erhålls genom att mäta några

⁵ <http://www.insitu.com/systems/scaneagle>

millisekunder mot samma scen, vilket vi betraktar som en rimlig mättid för dessa tillämpningar. För att få tillförlitliga reflektansvärden från scenen krävs mättider på flera sekunder, vilket är för långt. Vi antar därför att vi använder ladarn för att mäta 3D och VIS/MWIR-sensorerna för att mäta intensitet och/eller termisk emission.

Dessutom finns ett högpresterande IMU och GPS för georeferering av mätdata. Rörelser på UAVn, t ex pga vinden eller girar, tas om hand av IMU och kompenseras i positionsdata. Sammantaget innebär det att vi har bra absolut och relativ positionering i data. Vibrationer i plattformen pga motor mm hanteras av gyro med typisk samplingsfrekvens 1-5 kHz. Vi antar här att de positionsstörningarna i data är maximalt av samma storleksordning som övrigt brus i mätsystemet och kan ignoreras.

Samtantaget kan vi få följande information i en pixel på dagtid: klockslag, 3D-position i världen, visuellt värde (RGB), och MWIR-värde. På natten erhåller vi klockslag, 3D-position i världen, och MWIR-värde. I Tabell 3 finns en sammanställning av data från sensorsystemen ombord på UAVn. Information om ladarn kommer från Henriksson et al. (2014b), visuell och IR-kamera valdes att vara samma som ombord på US Navys UAV ScanEagle där det finns sensorer från AltiCam Vision⁶. Övrig prestanda baseras på författarnas erfarenheter av liknande system.



Figur 9: Simulering av bil bakom träd, delar av bilen döljs bakom trädet. Överst, vänster: Sensorvy, Överst, höger: ideal 3D-bild. Nere, vänster: ladardata vid 100 mätningar per position, Nere, höger: ladardata vid 400 mätningar per position. Från Amselem (2014).

⁶ <http://www.alticamvision.com/index.html>

Tabell 3. Sammanfattning prestanda sensorer för sensorsystem i "stor UAV".

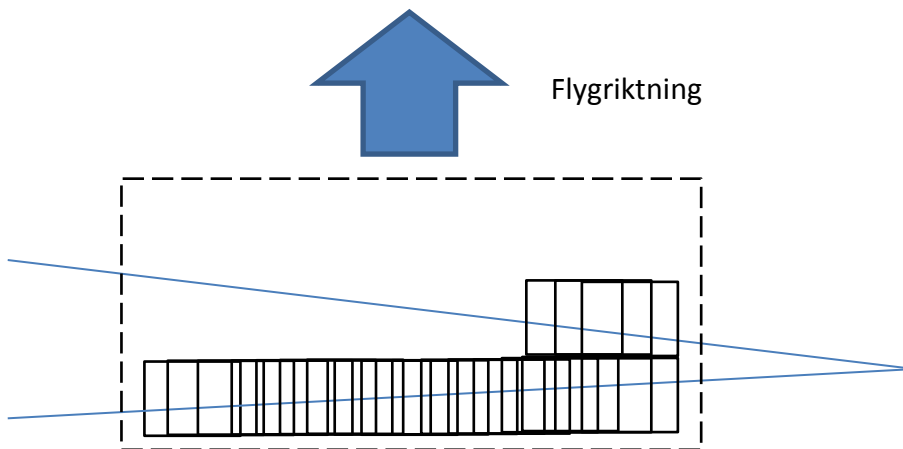
Parameter	Foton-räknande matris-detektor
Avståndsupplösning Det minsta avstånd mellan två ytor inom synfältet för samma mätning som krävs för att ytorna ska kunna skiljas åt. För en matrisdetektor innebär detta olika ytor inom synfältet för en pixel.	Ca 0,1 m
Lateral vinkel-upplösning Den minsta utbredning på ett objekt som kan mätas utifrån data, det vill säga hur stort ett punktformat objekt ser ut att vara.	Pixelstorlek ~100 µm
Bildalstrings-förmåga	Multipla pulser
Räckvidd	>10 km
Punkter per sekund	~10 ⁶
Positioneringskrav	Många pulser för 3D
Punktseparation Avståndet i sidled mellan uppmätta punkter. Kan anges som vinkel eller som avstånd mellan två punkter på ett definierat avstånd. Anges ofta istället som antal punkter per kvadratmeter på en definierad flyghöjd när punkterna inte är fördelade enligt ett utmönster.	13 cm @ 330 m 20 cm @ 500 m 40 cm @ 1000 m
Positionsnoggrannhet. Standardavvikelse för positionsfel när datapunkter har georefererats. Detta ger ett mått på felet mellan två mätningar mot samma punkt från olika sensorpositioner.	Ca 5 cm (beror mest på IMU och GPS)
Avståndsnoggrannhet. Standardavvikelse för mätfel vid många mätningar mot samma yta. Innehåller endast fel från ladarsensorn och mäts för stillastående sensor mot statisk scen.	Ca 5 mm
Antal pixlar ladar	32×32
FOV ladar	Några grader (varierar)
Max antal avståndsluckor	8192 st
Min avstånd i en enskild avståndslucka	0,25 ns (3,7 cm)
Avstånd som kan täckas med alla avståndsluckor (gateluckan)	307 m (2 µs)
Antal pixlar VIS-kamera	640×480
FOV VIS-kamera	1,1-25 grader
Antal pixlar MWIR-kamera	640×480
FOV MWIR-kamera	2-25 grader
Typisk marchfart för UAV	100 - 150 km/h.
Noggrannhet absolut position Positionsangivelse i data uttryckt i världskoordinater	5 cm i 3D

4.2 Användning och innebörd för datagenerering

Vid både spaning och underrättelseinhämtning kommer mycket data att samlas in. Det ställer krav på effektiv lagring av data, automatiserad grundanalys för att sortera och markera intressanta företeelser i data, samt verktyg för effektiv användarinteraktion. Nedan går vi igenom datakvalitet och genererade datamängder för tre olika tillämpningar; kartering, noggrann mätning mot ett litet område där ett mål skyls mycket väl samt följning av fordon under rörelse.

4.2.1 Datakvalitet vid kartering

Vid kartering kommer ladarn att pendla i sidled (vinkelrätt mot flygriktningen) för att man ska kunna täcka ett större område. Sensormatrisen antas flytta sig en pixelrad per mätposition och UAVn flyttar sig motsvarande en matrislängd i flygriktningen från skannlinje till skannlinje, se Figur 10. Detta är ett approximativt skanningsmönster – egentligen rör sig skannern mer i ett sick-sack-mönster. Om man pendlar skanner ± 10 grader i sidled kommer ett 350 m brett stråk på 1000 m flyghöjd att täckas, vilket ger ett stråk som är 340 m brett med bra data.



Figur 10. Skanningsmönster för ladar vid kartering. Flygriktning uppåt i bilden, ladarn kommer att pendla i sidled för att få ett brett skanstråk. VIS- och IR-sensorernas synfält täcker hela skanstråket. Varje svart ruta illustrerar en positionsmätning med matrisen, för varje sådan mätning sänds flera laserpulser iväg. Mätningarna kommer att ske överlappande med förflyttning på en kolumn per mätposition.

Om man har en lodtittande sensor (32×32 pixlar) med upplösning $0,2 \times 0,2$ m horisontellt på målet (motsvarar 25 pixlar/m²), täcker hela matrisen $6,4 \times 6,4$ m på marken. I Tabell 4 visas hur många mätningar man får per mätposition vid flyghastigheterna 100 km/h (28 m/s) respektive 150 km/h (42 m/s).

Tabellen visar att om man flyger med 100 km/h får man $24,2$ samplingsar per bild. Detta är för få mätningar för att få bra fotonstatistik. Eftersom man mäter överlappande kommer man att för större delen av skanstråket att mäta på samma mätposition 32 gånger, vilket ger totalt 775 mätningar per pixel. Det är tillräckligt många mätningar för att få mycket bra data från scener med och utan skyl.

När man i stället flyger med 150 km/h får man $16,2$ samplingsar per bildruta. Detta är för få mätningar för att få bra fotonstatistik. Med överlappande mätningar får man totalt 518 mätningar per mätposition. Detta är tillräckligt många mätningar för att få bra data från scener med och utan skyl. När man mäter på mål i skyl får man i regel mer data på målet vid mätningar från olika vinklar (vilket förflyttningen av matris i sidled ger). Det ger i regel mer data på målet än att mäta många gånger från samma håll.

Om istället sensorn tittar framåt kommer en matris på 32×32 pixlar ge samma upplösning horisontellt på målet som vid lodtittande mod. Längs flygriktningen kommer sensorn att täcka ett större område än om den tittar i lod, vilket ger att varje matriselement avbildar ett större område på marken. Om sensorn tittar 20 grader relativt lodplanet täcker matrisen 6,8 m på marken, vid 30 grader relativt lodplanet täcker matrisen 7,4 m på marken. Vi föreslår att man skannar på samma sätt som vid lodtittande sensor, men man får överlapp av skanstråken i flygriktningen. Under dessa antaganden gäller beräkningarna i detta kapitel även för framåttittande sensor, med möjligheten till fler mätningar per mätposition (pga överlappet) och det ger bättre datakvalitet. Alternativt skulle man kunna justera mätningen för att inte få överlapp längs flygriktningen, och därmed erhålla mindre datamängd från systemet.

Tabell 4. Data vid kartering med upplösning $0,2 \times 0,2$ m horisontellt på målet (motsvarar 25 pixlar/m²). Tidsåtgång för att flytta sensorn mellan mätpositionerna har ignorerats.

Flyghastighet (km/h)	Mättid per skannstråk (ms)	Mättid per kolumn (µs)	Antal samlingar per bildruta	Antal samling per mätposition
100	228,6	130,6	24,2	775
150	154,2	87,1	16,2	518

Om man väljer en högre upplösning, till exempel $0,1 \times 0,1$ m horisontellt på målet (motsvarar 100 pixlar/m²), täcker hela matrisen $3,2 \times 3,2$ m på marken. Med flyghöjd på 1000 m och 350 meter brett skannstråk på marken, kommer man att få skanna dubbelt så mycket som i tidigare exempel. I Tabell 5 visas hur många mätningar man får per mätposition vid flyghastigheterna 100 km/h (28 m/s) respektive 150 km/h (42 m/s).

Tabellen visar att om man flyger med 100 km/h får man 6,1 samlingar per bildruta. Detta är för få mätningar för att få bra fotonstatistik. Med överlappande mätningar får man totalt 195 mätningar per mätposition. Detta är tillräckligt många mätningar för att få bra data från scener utan skyl. För scener med skyl bör flera överflygningar utföras.

När man i stället flyger med 150 km/h får man 4 samlingar per bildruta och överlappande mätningar ger totalt 128 mätningar mätposition. Detta är nära den undre gränsen för att få bra data från scener utan skyl. För mål i skyl bör ytterligare några överflygningar över scenen några gånger till utföras.

Tabell 5. Data vid kartering med upplösning $0,1 \times 0,1$ m horisontellt på målet (motsvarar 100 pixlar/m²). Tidsåtgång för att flytta sensorn mellan mätpositionerna har ignorerats.

Flyghastighet (km/h)	Mättid per skannstråk (ms)	Mättid per kolumn (µs)	Antal samlingar per bildruta	Antal samlingar per mätposition
100	228,6	65,3	6,1	195
150	154,2	43,5	4	128

4.2.2 Datamängder vid kartering

I detta avsnitt studerar vi hur mycket data som genereras per sekund och i vilka format den ska sparas. Sensor samplar med 186 kHz och enligt Henriksson (2014a) kommer ungefär varannan sampling att generera data i en pixel. Det innebär att varje matris som genereras kommer att innehålla ett (avståndsvärde (från mål, bakgrund eller brus) i en del av pixlarna. Eftersom data i varje sampling är osäker behöver man vänta till all data för en mätposition är insamlad innan man börjar med brusreducering. Vi föreslår att man sparar alla mätvärden från ett skannstråk, innan man gör brusreducering. Om man mäter med överlapp även i flygriktningen kommer man att behöva spara rådata från 2-3 skann innan brusreducering kan göras. Data produceras ordnat i matrisform och denna ordning bör bevaras för att minska beräkningstider. I ett första steg måste alla avståndsvärden sparas,

förslagsvis i en voxelgrid, men där varje cell innehåller alla mätvärden (inte bara medelvärde och varians). Storleken på cellerna kan motsvara den som sensorn var inställd på under mätningen. Därefter kan brusreducering göras. Eftersom man har många mätvärden i varje cell har man möjlighet att ändra upplösning i voxelgriden, till både mindre och större cellstorlek.

Tabell 7 visar de datamängder som erhålls från ett skann med sensorn (350×6,4 meter), där vi antar att vi mäter från marknivån och upp till höjden 20 meter över marken. Vi antar att råa mätvärden kan sparas på 4 bytes/mätvärde⁷.

Tabell 6. Datamängder för rådata från ett skann.

Flyghastighet (km/h)	Cellstorlek (m)	Antal mätvärden per mätposition	Antal celler i ett skann	Antal mätvärden i ett skann	Minnesåtgång (byte)	Datatakt (bps)
100	0,2×0,2×0,2	387	56.000	21,8*10 ⁶	87,2*10 ⁶	3*10 ⁹
150	0,2×0,2×0,2	259	56.000	14,5*10 ⁶	58*10 ⁶	3*10 ⁹
100	0,1×0,1×0,1	97	112.000	10,9*10 ⁶	43,6*10 ⁶	3*10 ⁹
150	0,1×0,1×0,1	64	112.000	7,2*10 ⁶	28,8*10 ⁶	3*10 ⁹

Om vi tittar på den brusreducerade datamängd som samlas in för kartering av 1 km²×20 m höjd, kommer mängden data att bero på vilken gridstorlek vi har. I Tabell 7 visas de datamängder som blir för två olika gridstorlekar, där vi antar att gridden har data i 20% av alla celler och att informationen i en cell kan sparas på 100 byte (Elseberg et al., 2013).

Tabell 7. Datamängder för brusreducerad data (20% fyllnad av voxelgrid), en cell kan sparas på 100 byte (Elseberg et al., 2013). Kartering av 1 km²×20 m höjd.

Cellstorlek (m)	Minnesåtgång brus-reducerad data, hela mätområdet (Gbyte)
0,2×0,2×0,2	50
0,1×0,1×0,1	400

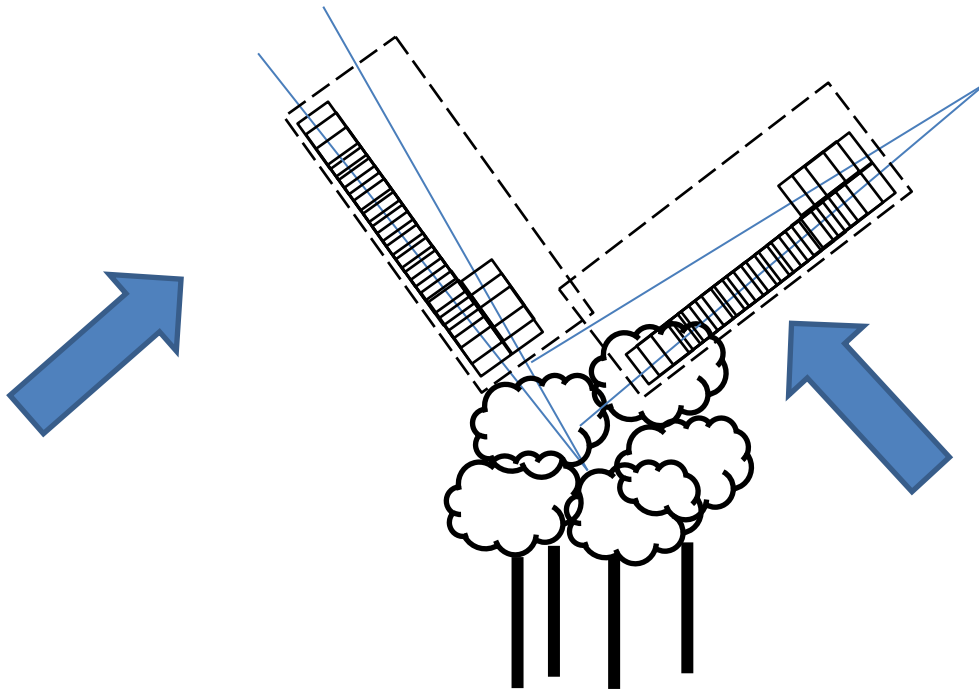
Sista steget i karteringen är att registrera 3d-punktmolnen från de olika skannen. Data i cellerna kommer att vara ganska rätt placerade geometriskt (inom 5 cm) tack vare att vi har ett bra tröghetsnavigeringssystem ombord. För kartering, där man inte är intresserad av att få bra avbildning av objekt under rörelse, ger denna geometriska positionering av data tillsammans med de justeringsmöjligheter som ges i brusreducering (se kapitel 4.3) en tillräckligt bra registrering.

Om man vill mäta in mål som rör sig under karteringen, kan man bara få en avbildning av dem som har en så långsam rörelse att de kan betraktas som stillastående under mätningen. Om målen är så små att de får plats inom en bildruta, är maximal målhastighet för att få bra registrering mycket hög, större än 1 km/s. Om målen får plats inom ett skann, är maximal målhastighet den samma som UAVns flyghastighet. Om man ska mäta in rörliga mål samtidigt som man karterar ställer det extra krav på registreringen eftersom man för varje mätposition måste identifiera de datapunkter som kan tillhöra målet och sedan registrera ihop dem. Den sortens registrering diskuteras nedan.

⁷ Flyttal enkel precision.

4.2.3 Datakvalitet och datamängder vid inmätning av litet område

Här tänker vi oss tillämpningen att vi har fått information om att ett eller fler mål kan vara gömda i en skogsdunge, och målen är förmodligen väl kamouflerade. Området vi vill söka igenom är litet, $25 \times 25 \times 25$ meter. Eftersom vi vill ha stor sannolikhet att hitta mål som är delvis skylda under lager av lövverk och maskeringsnät, kommer vi att mäta in över området från olika håll. Vi kommer att skanna av området med hög noggrannhet (100 punkter/m^2) med två olika skanstråk, se Figur 11. Här väljer vi också att ha skanstråken överlappande i flygriktningen, överlappet är en halv matris. Om man skannar med ± 2 grader vid en flyghöjd på 500 m får man ett 34 meter brett stråk på marken.



Figur 11. Skannmönster vid avsökning av skogsdunge. Mätning från två olika håll för att öka möjligheten att detektera mål under träden.

I Tabell 8 visas hur många mätningar man får per mätposition vid flyghastigheterna 100 km/h (28 m/s) respektive 150 km/h (42 m/s). Tabellen visar att om man flyger med 100 km/h får man 31 samplings per bildruta. Eftersom man kommer att mäta överlappande med matrisdetektorn och dessutom flyga över samma ställe två gånger, kommer man för större delen av mätningen att mäta samma mätposition 128 gånger, vilket ger totalt 3968 mätningar per mätposition. Detta är tillräckligt många mätningar för att få bra data från scener med skyl.

Om man i stället flyger med 150 km/h får man 20 samplings per bildruta. Eftersom man kommer att mäta överlappande får man totalt 2560 mätningar per mätposition. Även det är tillräckligt många mätningar för att få bra data från scener med skyl.

Tabell 8. Data vid noggrann avsökning litet område med upplösning 0,1×0,1 m horisontellt på målet (motsvarar 100 pixlar/m²). Tidsåtgång för att flytta sensorn mellan mätpositionerna har ignorerats.

Flyghastighet (km/h)	Mättid per skanstråk (ms)	Mättid per kolumn (µs)	Antal samplingar per bildruta	Antal samplingar per mätposition och skann	Antal samlingar per mätposition
100	57	167,6	31	1984	3968
150	38	111,8	20	1280	2560

Om man får mätdata från två olika skann över området kommer man att få över tusen samlingar per mätposition, vilket betraktas som tillräckligt många för att få bra data från de flesta (alla?) ytor i scenen.

I detta fall vill man spara all rådata till dess att man mätt färdigt över hela scenen, för att sedan i brusreduceringen kunna detektera också de fragment av målet som kan ha samlats in från vissa mätpositioner. Sensorn samplar med 186 kHz och ungefär varannan sampling genererar data i en pixel. Här sparar man också alla rå mätvärden i en voxelgrid. Den inledande voxelgriden har samma upplösning som man haft vid mätningen, 0,1×0,1×0,1 m, men i efterbearbetningen kan man välja en finare voxelgrid för att spara detaljer i scenen.

Tabell 9 visar de datamängder som erhålls då man flugit över ett område på 25×25×25 m, där vi antar att vi mäter från marknivån och upp till höjden 25 meter över marken. Vi antar att råa mätvärden kan sparas på 4 bytes/mätvärde. Det tar ca två sekunder att göra mätningar vid flyghastighet 100 km/h, och 1,5 sekund vid flyghastighet 150 km/h.

Tabell 9. Datamängder för rådata från mätning 25*25*25 meter, cellstorlek 0,1×0,1×0,1 meter.

Flyghastighet (km/h)	Antal mätvärden per mätposition	Antal celler	Totalt antal mätvärden	Minnesåtgång (byte)	Datatakt (bps)
100	1984	15,6*10 ⁶	31*10 ⁹	124*10 ⁹	496*10 ⁹
150	1280	15,6*10 ⁶	20*10 ⁹	80*10 ⁹	427*10 ⁹

Om vi tittar på den brusreducerade datamängd som samlas in för kartering av 1 km²×20 m höjd, kommer mängden data att bero på vilken gridstorlek vi har. I Tabell 7 visas de datamängder som blir för två olika gridstorlekar, där vi antar att gridden har data i 20% av alla celler och att informationen i en cell kan sparas på 100 byte (Elseberg et al., 2013). Det tar ca två sekunder att göra mätningar vid flyghastighet 100 km/h, och 1,5 sekund vid flyghastighet 150 km/h.

Tabell 10. Datamängder för brusreducerad data. Noggrann inmätning av 25×25×25 meter, med överlapp mellan mätningar både i skanstråk och i flygriktningen.

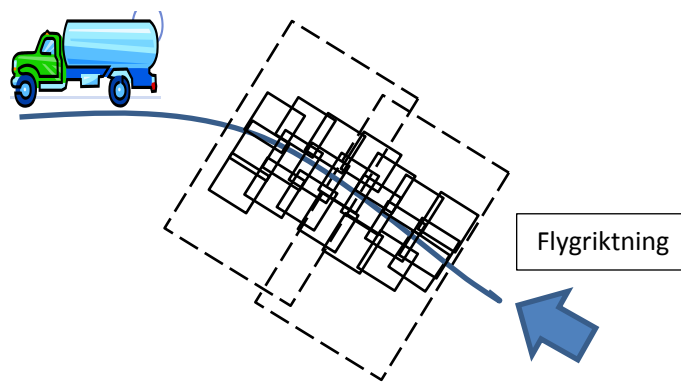
Flyghastighet (km/h)	Cellstorlek (m)	Minnesåtgång brus-reducerad data, hela mätområdet (byte)	Datatakt (bps)
100	0,1×0,1×0,1	312*10 ⁶	1,25*10 ⁹
150	0,1×0,1×0,1	312*10 ⁶	1,7*10 ⁹
100	0,05×0,05×0,05	2,5*10 ⁹	10*10 ⁹
150	0,05×0,05×0,05	2,5*10 ⁹	13*10 ⁹

4.2.4 Datakvalitet och datamängder vid målföljning

Ladarn har ungefär en tiondel så stort synfält som VIS/IR-sensorerna. För att snabba upp måldetektionen, antar vi att ladarn visas in mot målet enligt måldetektioner beräknade på VIS/IR-data. Måldetektionerna från VIS/IR-sensoranalysen kommer att innehålla fel, pga brus, skuggor och andra fluktuationer i bilderna. Många falska måldetektioner sorteras bort i målföljningen efter några mätningar/bildrutor, men inte alla. Måldetektion i VIS/IR-bild kan driva upp till en målstorlek, pga av osäkerheter i måldetektionen. Det kommer alltså att vara så att även om det bara finns ett verkligt mål i bilden kommer man att ha indikationer om några eller många fler och positionen på målen kommer att vara lite osäker. Ladarn kommer alltså att för varje detektion i en VIS/IR-bild skanna i några små områden, se illustration i Figur 12.

Genom att använda en målföljningsalgoritm (t ex någon variant av Kalman-filter) dämpar dessa fluktuationer i måldetektioner från bildsensorerna, men man får ändå vara beredd på att invisningen av ladarn är ungefärlig. Dessutom kommer man att mäta med ladarn baserat på prediktionen av var målet troligen kommer att vara vid nästa mätning. Dessa osäkerheter i målets position motiverar också skanning av ladarn i ett litet område

Det går att göra målföljning och -klassificering i realtid för data från VIS/IR-sensorer. Det vi ska undersöka här är möjligheter till att göra måldetektion, -följning och -igenkänning i realtid baserat på ladardata. Om detta är möjligt kan man basera informationen till målföljningsalgoritmen på data från en kombination av 2D- och 3D-egenskaper från sensorerna (sk sensorfusion). Genom registrering av data från olika mätningar på målet kan vi efter hand bygga upp information om målets geometri under målföljningen.



Figur 12. Skannmönster för ladar vid målföljning. Flygriktning uppåt, till vänster i bilden, linjen visar fordonets väg. Ladarn kommer att pendla i något sidled för att täcka den position där VIS/IR-sensor predikterar att målet är. Varje ruta med streckad linje visar VIS-/IR-sensors footprint, heldragen linje illustrerar en positionsmätning med ladarn.

I räkneexemplet nedan tittar vi på hur lång tid det skulle ta att skanna ett litet område på 25×25 meter med upplösning $0,2 \times 0,2$ meter. Vi undersöker möjligheten med två olika antal samplingar/bildruta och har överlapp mellan ladar-bildrutor på $\frac{1}{2}$ bildruta både i flygriktningen och vinkelrätt mot flygriktningen. UAVn flyger med 150 km/h på 1000 m höjd. Varje bildruta avbildar $6,4 \times 6,4$ meter på marken. Vi skannar i sidled med ± 1 grad för att få ett stråk med 34 meters bredd. Notera att vi har mindre överlapp här jämfört med tidigare räkneexempel.

I Tabell 11 visas hur många mätningar man får per mätposition vid flyghastigheten 150 km/h (42 m/s), och med olika tät sampling/mätposition. Tabellen visar att både när man har 100 och 200 samplingar/bildruta kommer man totalt att få flera hundra samplingar per mätposition, vilket är tillräckligt för att målföljning eftersom de invisande sensorerna har svårt att detektera mål i skyl. Med mer samplingar per mätposition kommer man att ha förmåga att penetrera skyl.

Tabell 11. Data vid målföljning, inmätning av ett mål. Tidsåtgång för att flytta sensorn mellan mätpositionerna har ignorerats. Flyghastighet UAV är 150 km/h.

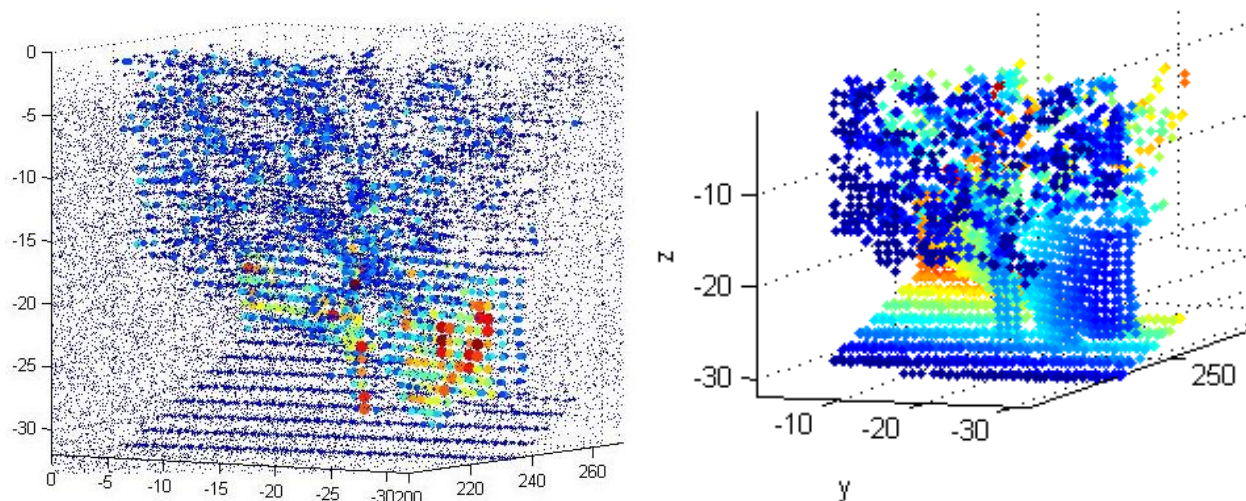
Antal samplingslingar per bildruta	Antal samplingslingor per mätposition	Mättid för området (ms)	Motsvarande målmätningens frekvens (Hz)
100	400	53,2	18
200	800	107	9

I detta fall vill man spara all rådata till dess att man mätt färdigt över hela scenen, för att sedan göra brusredueringen för hela målet på en gång. Sensorn samplar med 186 kHz och ungefär varannan sampling generera data i en pixel. Här sparar man också alla råa mätvärden i en voxelgrid. Den inledande voxelgriden har samma upplösning som man haft vid mätningen, $0,1 \times 0,1 \times 0,1$ m. Tabell 12 visar de datamängder som erhålls då man flugit över ett område på $25 \times 25 \times 25$ m, där vi antar att vi mäter från marknivån och upp till höjden 25 meter över marken. Vi antar att råa mätvärden kan sparas på 4 bytes/mätvärde. Det tar ca 1,5 sekund att göra hela mätningen vid flyghastighet 150 km/h.

Tabell 12. Datamängder för rådata från mätning $25 \times 25 \times 25$ meter, cellstorlek $0,2 \times 0,2 \times 0,2$ meter.

Överlapp i sidled (bildruta)	Antal mätvärden per mätposition	Antal celler	Totalt antal mätvärden	Minnesåtgång (byte)	Datatakt (bps)
1/4	332	$1,9 \times 10^6$	630×10^6	$2,5 \times 10^9$	13×10^9
1/2	166	$1,9 \times 10^6$	315×10^6	$1,2 \times 10^9$	$6,4 \times 10^9$

4.3 Brusreduktion av data



Figur 13. Punktmoln före brusreduering (vänster) och efter brusreduering (höger), från Amselem (2013). Simulering av mätning, scenen består av ett fordon delvis dolt bakom ett träd. I högra bilden är punkternas storlek och färg relaterade till intensiteten.

Data som kommer från mätsystemet innehåller mycket brus och det behöver reduceras innan man kan börja analysera data närmare, se exempel i Figur 13. Eftersom det finns osäkerhet i data och i vilken data som ska sparas, föreslås att man inte analyserar data i varje cell för sig utan att man analyserar flera närliggande celler samtidigt. Två ansatser till brusreducering beskrivs i litteraturen, de baserade på en viktning mellan olika datapunkter och de som har en probabilistisk ansats.

Smith et al (2013) föreslår en viktning där faltning med punktspridningsfunktionen (PSF) ingår. Filtreringen går ut på att vikta med närliggande pixlar/voxlar, där data är projicerade på sensormatrisen (enkelt sätt att hitta grannpunkter). Sedan används filtrering med PSF. Metoden anges vara parallelliserbar och möjlig att implementera i hårdvara. Hu och Zhao (2013) presenterar en voxel-baserad metod för att filtrera och söka i punktmoln. Metoden är enligt författarna bra på att filtrera bort outliers och brus, centroidberäkningar ingår i filtreringen.

Brusfiltreringen kan också ske med en probabilistisk ansats. Exempel från analys av voxelgriddar, som kan utökas för att inkludera en liten omgivning av voxlar presenteras av Hähnel et al. (2002) och Magnusson et al. (2007). Tekniken i Hähnel et al. inkluderar sensorbrus, osäkerheter från skyl och skattar en sensorplacering som maximerar sannolikheten att data var insamlad från denna sensorposition. Formuleringen tillåter att man tar hänsyn till data-dropout och annat som sker i praktiken med en ladar. Tekniken presenterad i Magnusson et al. (2007) baseras på att data kan betraktas som Gaussiskt fördelade och utnyttjar detta för att räkna fram sannolikheten att en punkt är placerad på ett visst ställe i 3D-rymden.

4.4 Sammanfattning

I stora drag föreslår vi att dataanalysen för data från en fotonräknande laser görs i två steg; brusreducering sker ombord på UAVn och bearbetad data länkas ner till en markstation, där man gör vidare analyser av data. Laserdata är då i bra skick, med lite brus och få outliers och kan kompletteras med data från VIS och TIR sensor, genom att matcha respektive bildelement med celler i voxelgriddan. Lantmäteriet har tagit fram en markmodell över Sverige, den innehåller både höjd över havet och information om terräng (mark, vatten, bro och ”annat”). Om man har tillgång till Lantmäteriets markmodell, och kanske även kompletterande information, kan den användas till att

1. justera effekten i lasern och antalet nödvändiga mätningar, för att optimera mätningen (undvika att man bottenar sensorn och bara får mätningar från första ytan vid skyl),
2. användas i samband med brusreduceringen. Om man tar bort mätpunkter från markplanet redan i UAVn minskar den mängd data som behöver sändas till markstationen med en faktor 10-100,
3. effektivisera måldetektionen och annan analys som görs i markstationen (eller senare).

Brusreduceringen och andra beräkningarna som görs ombord på UAVn behöver göras på hårdvara som kan göra miljardtals beräkningar per sekund. En internetsökning visar att det finns företag som idag säljer FPGA som har datatakter på 1-10 Gbps⁸.

För kartering räcker det förmodligen ofta med 25 datapunkter/m² och möjligheten till att penetrera skyl kan styras genom flyghastigheten. Flyger man med 100 km/h får man tillräckligt med mätningar (775 samplingar/mätposition) för att kunna penetrera en del skyl. Datamängderna per skann för rådata är 60-90 Mbyte och datatakten 3 Gbps. Det innebär höga krav på hårdvaran, men det är möjligt att uppfylla realtidskraven. Den färdiga kartan över området kan förmodligen inte produceras i realtid, utan där finns fördröjningar. Preliminära kartor, med större osäkerhet i position än slutresultatet, kan visas med kort fördröjning efter att inmätning skett.

För den noggranna avsökningen av ett litet område, där det antas finnas mål i skyl, behöver data produceras med högre upplösning än i karteringsfallet. Här antar vi att det krävs 100 datapunkter/m². I våra exempel har vi över 2000 samplingar per mätposition, vilket är väl högt om man jämför med tumregeln (<1000 samplingar). Vi kan dock generera dessa mängder med data vid den högre flyghastigheten, vilket medger snabbare total

⁸ www.altera.com och www.synopsis.com.

mättid. Eftersom man vill mäta in hela området innan man påbörjar brusreducering, måste man här hantera datamängder på ca 100 Gbyte. Datamängden kan minskas ner om man väljer ca 1000 samplingar/mätposition. I detta fall är det mindre troligt att brusreducerad data kan skickas ner i realtid, utan nära realtid (sekunder-minuter) är rimligare.

Vid målföljning mäter man glesare än vid kartering och noggrann avsökning, men trots det generas datamängder liknande de för kartering. Eftersom de sensorer som visar in ladarn inte penetrerar skyl, ställer vi inte det kravet på ladarn heller (200-400 samplingar/mätposition). Datamängden för inmätning av ett mål är ca 1 Gbyte och datatakten ca 5 Gbps. Det innebär höga krav på hårdvaran, men det är möjligt att uppfylla realtidskraven. Vid målföljning tillkommer dock ett annat krav: även måldetektion och målföljning måste ske i realtid och i UAVn! För att snabba upp måldetektionen i ladardata kan göra måldetektionerna i avståndsbilder i stället för i 3D-punktmolnet.

5 Slutsatser

I denna rapport diskuteras två möjliga sensor-koncept baserat på känd prestanda för kommersiella ladarsystem och förväntad prestanda efter produktifiering av system. Ladarsystemen är tänkta att placeras i två olika typer av UAV.

Den lilla UAVn har potential att snabbt och effektivt tillföra en lägesbild för förbandet över det operativa området. Det handlar om att dokumentera ett begränsat område. Syftet är att leverera en tydlig, överskådlig lägesbild eller karta till operatören, som man t ex enkelt kan använda för en siktanalys. En annan möjlig tillämpning är förändringsanalys, t ex för att upptäcka så kallade *Improvised Explosive Devices* (IED). Våra beräkningar visar att om man flyger på maximal flyghöjd av 25 m med 18 km/h (5 m/s), eller på maximal flyghöjd 20 m med 64 km/h (18 m/s), får man tillräcklig punkttäthet på marken för att generera en lägesbild. Om man vill titta på detaljer, t ex markplacerade minor eller störd jord för indikationer på nedgrävda objekt, behöver man en högre punkttäthet. Då är några meters flyghöjd mer lämplig. Våra och andras försök med lagringar och analyser av punktmoln visar på datamängder runt 10^5 - 10^6 punkter/s, lagringsutrymme på Mbyte-Gbyte för rådata, och beräkningstider på PC-processorer på sekunder-minuter. Om man har specialanpassad hårdvara, t ex FPGA, kan man minska dessa beräkningstider.

Huvudanvändningen för den stora UAVn är storskalig spaning och inhämtning av underrättelser. I storskalig spaning ingår att ett större område (km^2) ska kunna täckas och inom det området ska mål (fordon, byggnader, broar) kunna detekteras, följas, klassificeras och kännas igen. Resultat av dataanalys ska presenteras i realtid, för att kunna vara underlag för t ex för en vapeninsats. Data bör lagras som en del av dokumentation av underlag inför ett beslut, eller för att kunna användas för vidare underrättelseanalyser. Denna typ av UAV bär ett högpresterande sensorsystem, som medger hög upplösning och mätning under långa tider (timmar). Lasersystemet är av typen fotonräknande med matrisdetektor, vilka precis har blivit kommersiellt tillgängliga. Fördelarna med fotonräknande matrisdetektorer, jämfört med ett traditionellt skannande system, är flera, till exempel låg lasereffekt, lång räckvidd, hög yttäckning och hög avståndsupplösning. Nackdelarna är höga krav på positioneringssystem, stora krav på beräkningskapacitet och krav på långa fokallängder för att nå bra lateral upplösning.

I stora drag föreslår vi att dataanalysen för data från det fotonräknande systemet görs i två steg; brusreducing sker ombord på UAVn och bearbetad data länkas ner till en markstation, där man gör vidare analyser av data. Laserdata är då i bra skick, med lite brus och få outliers och kan kompletteras med data från VIS och TIR sensor, genom att matcha respektive bildelement med celler i voxelgriddens. Lantmäteriet har tagit fram en markmodell över Sverige (Nationell Höjdmodell) som innehåller höjd över havet och som kan kompletteras med andra kartprodukter som tillsammans ger detaljerad information om terräng (bebyggelse, skog, fält etc). Om man har tillgång till markmodell kan den användas till att optimera lasereffekten och snabba upp bearbetning och analys av mätdata. En markmodell kan genereras med detta system, ifall den inte är tillgänglig på förhand. Beroende på vilken sorts datainsamling man gör varierar möjligheterna till realtidspresentation av färdig 3D-presentation av området. I vissa fall, t ex vid storskalig kartering kan den färdiga kartan över området förmodligen inte produceras i realtid, utan där finns fördröjningar. Preliminära kartor, med större osäkerhet i position än slutresultatet, kan visas med kort fördröjning (minuter) efter att inmätning skett.

En annan viktig aspekt är kraven på datalänkar, för att kunna få ner information från UAV till markstation. Enligt (Schwering et al, 2013a) och (Schwering et al, 2013b) finns redan idag militärt anpassade datalänkar, med störskydd och kryptering, som klarar nyttotrafik⁹ på tiotals Mbps vid fri sikt över avstånd på flera kilometer. Om ca 10 år kommer det att finnas militärt anpassade datalänkar som klarar 100-1000 Mbps vid fri sikt och 5-20 Mbps vid andra förhållanden. Vanligtvis har man speciella länkar som används endast för data-kommando-överföring mellan UAV och markstation och låter annan kommunikation, t ex mellan UAV-gruppen och ledningen, gå på andra länkar. Med de förutsättningarna finns redan idag datalänkar som klarar kraven för datatransmission för den lilla UAVn, men inte för den stora. Inom ca tio år kan det finnas länkar som vid bra förhållanden klarar även den stora UAVns krav på datatransmission för realtidsöverföring.

⁹ Nyttotrafik omfattar överföring av data och information. Bandbredd för kodning, störskydd och kryptering hanteras för sig.

Sammantaget bedömer vi att efter produktifiering kan vi för båda UAVerna komma ner i bearbetnings- och transmissionstider som gör att data kan presenteras för en användare i eller nära realtid.

Vi föreslår att FOI arbetar vidare med området, för att på sikt kunna verifiera (eller avfärda) de beräkningar som presenterats här. På FOI har vi en hexakopter med laserskanner av samma typ som vi studerat för den lilla UAVn. Med det systemet kan konceptet för den lilla UAVn undersökas närmare. Här föreslår vi vidare arbete med signalbehandlingskedjan, för att testa och verifiera våra antaganden. Till exempel bör man testa vilka beräkningar som kan ske ombord på UAVn eller om rådata ska länkas ner till markstationen. Den stora UAVn använder en ny generation ladar, med ny mätprincip och krav på brusreducering. Här behöver vi bygga upp mer kunskap inom framförallt brusreducering, vilket kan göras med data från simuleringar och om möjligt mätningar med sensorsystem i kontrollerad miljö.

6 Referenser

- Amselem, E. (2013). Evaluation of SELEX Swallow sensor. Performance and simulation test of a gated viewing system with 3D capability. FOI-D--0541--SE, Linköping.
- Aulinas, J., Petillot, Y. R., Salvi, J., & Lladó, X. (2008). The SLAM problem: a survey. In *CCIA* (pp. 363–371). Citeseer.
- Belshaw, M. S., & Greenspan, M. A. (2009). A high speed iterative closest point tracker on an FPGA platform. In *Computer Vision Workshops (ICCV Workshops), 2009 IEEE 12th International Conference on* (pp. 1449–1456). IEEE.
- Besl, P. J., & McKay, N. D. (1992). Method for registration of 3-D shapes. In *Robotics-DL tentative* (pp. 586–606). International Society for Optics and Photonics.
- Björkert, S., Letalick, D., Eriksson, J., Frörlind, P.-O., Funke, L., Johansson, I., ... Renhorn, I. (2013). Sensorer för upptäckt av IED. FOI-R--3777--SE, Linköping.
- Connolly, C. (1985). The determination of next best views. In *Robotics and Automation. Proceedings. 1985 IEEE International Conference on* (Vol. 2, pp. 432–435). IEEE.
- Elmqvist, M. (2002). Ground surface estimation from airborne laser scanner data using active shape models. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(3/A), 114–118.
- Elseberg, J., Borrmann, D., & Nüchter, A. (2013). One billion points in the cloud—an octree for efficient processing of 3D laser scans. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 76, 76–88.
- Gelfand, N., Ikemoto, L., Rusinkiewicz, S., & Levoy, M. (2003). Geometrically stable sampling for the ICP algorithm. In *3-D Digital Imaging and Modeling, 2003. 3DIM 2003. Proceedings. Fourth International Conference on* (pp. 260–267). IEEE.
- Gelfand, N., Mitra, N. J., Guibas, L. J., & Pottmann, H. (2005). Robust global registration. In *Symposium on geometry processing* (Vol. 2, p. 5).
- Hähnel, D., & Burgard, W. (2002). Probabilistic matching for 3D scan registration. In *Proc. of the VDI-Conference Robotik* (Vol. 2002).
- (a) Henriksson, M. (2014). Fotonräknande 3D-sensor med matrisdetektor. Studie av realiseringsmöjlighet för försökssystem. FOI-D--0614--SE.
- (b) Henriksson, M., Amselem, E., & Larsson, H. (2014). Lasersensorkoncept för UAV. En marknadsgenombgång av befintliga och framtida koncept. FOI-R--3904--SE.
- Henry, P., Krainin, M., Herbst, E., Ren, X., & Fox, D. (2010). RGB-D mapping: Using depth cameras for dense 3D modeling of indoor environments. In *In the 12th International Symposium on Experimental Robotics (ISER)*. Citeseer.
- Hu, F., Zhao, Y., Wang, W., & Huang, X. (2013). Discrete Point Cloud Filtering And Searching Based On VGSO Algorithm. In *ECMS* (pp. 850–856).
- Hu, G., Huang, S., Zhao, L., Alempijevic, A., & Dissanayake, G. (2012). A robust rgb-d slam algorithm. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference on* (pp. 1714–1719).
- Johnson, A. E. (1997). Spin-images: a representation for 3-D surface matching. Citeseer.
- Jost, T., & Hugli, H. (2003). A multi-resolution ICP with heuristic closest point search for fast and robust 3D registration of range images. In *3-D Digital Imaging and Modeling, 2003. 3DIM 2003. Proceedings. Fourth International Conference on* (pp. 427–433).

- Kuhnert, K.-D., & Stommel, M. (2006). Fusion of stereo-camera and pmd-camera data for real-time suited precise 3d environment reconstruction. In *Intelligent Robots and Systems, 2006 IEEE/RSJ International Conference on* (pp. 4780–4785).
- Lee, Y.-J., Song, J.-B., & Choi, J.-H. (2013). Performance improvement of iterative closest point-based outdoor SLAM by rotation invariant descriptors of salient regions. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 71(3-4), 349–360.
- Lemaire, T., & Lacroix, S. (2007). Monocular-vision based SLAM using line segments. In *Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on* (pp. 2791–2796). IEEE. Retrieved from http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4209512
- Magnusson, M., Lilienthal, A., & Duckett, T. (2007). Scan registration for autonomous mining vehicles using 3D-NDT. *Journal of Field Robotics*, 24(10), 803–827.
- Moosmann, F., & Stiller, C. (2011). Velodyne slam. In *Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2011 IEEE* (pp. 393–398). IEEE.
- Nex, F., & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied Geomatics*, 6(1), 1–15.
- Nuchter, A., Lingemann, K., & Hertzberg, J. (2007). Cached kd tree search for ICP algorithms. In *3-D Digital Imaging and Modeling, 2007. 3DIM'07. Sixth International Conference on* (pp. 419–426).
- Nüchter, A., Lingemann, K., Hertzberg, J., & Surmann, H. (2007). 6D SLAM—3D mapping outdoor environments. *Journal of Field Robotics*, 24(8-9), 699–722.
- Puente, I., González-Jorge, H., Martínez-Sánchez, J., & Arias, P. (2013). Review of mobile mapping and surveying technologies. *Measurement*, 46(7), 2127–2145.
- Qiu, D., May, S., & Nüchter, A. (2009). GPU-accelerated nearest neighbor search for 3D registration. In *Computer Vision Systems* (pp. 194–203). Springer.
- Ratches, J. A. (2011). Review of current aided/automatic target acquisition technology for military target acquisition tasks. *Optical Engineering*, 50(7)
- Ratter, A., Sammut, C., & McGill, M. (2013). GPU accelerated graph SLAM and occupancy voxel based ICP for encoder-free mobile robots. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on* (pp. 540–547). IEEE. Retrieved from http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6696404
- Rhee, S.-M., Lee, Y. B., & Lee, H.-E. (2014). Two-pass ICP with Color constraint for noisy RGB-D point cloud registration. In *Consumer Electronics (ICCE), 2014 IEEE International Conference on* (pp. 89–90). IEEE.
- Rusinkiewicz, S., & Levoy, M. (2001). Efficient variants of the ICP algorithm. In *3-D Digital Imaging and Modeling, 2001. Proceedings. Third International Conference on* (pp. 145–152). IEEE.
- Rydell, J., & Emilsson, E. (2012). CHAMELEON: Visual-inertial indoor navigation. In *Position Location and Navigation Symposium (PLANS), 2012 IEEE/ION* (pp. 541–546). IEEE.
- Sinivaara, K. (2014). Simultaneous Localisation and Mapping using Autonomous Target Detection and Recognition.
- Sithole, G., & Vosselman, G. (2004). Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 59(1), 85–101.
- Stark, R., Smith, P., Romain, R. S., Blask, S., & others. (2013). Point Spread Function (PSF) noise filter strategy for geiger mode LiDAR. In *SPIE Defense, Security, and Sensing* (p. 87310A–87310A). International Society for Optics and Photonics.

Steder, B., Rusu, R. B., Konolige, K., & Burgard, W. (2010). NARF: 3D range image features for object recognition. In *Workshop on Defining and Solving Realistic Perception Problems in Personal Robotics at the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (Vol. 44).

Svensson, M. (2014). Accelerated Volumetric Next-Best-View Planning in 3D Mapping.

Tamaki, T., Abe, M., Raychev, B., & Kaneda, K. (2010). Softassign and em-icp on gpu. In *Networking and Computing (ICNC), 2010 First International Conference on* (pp. 179–183). IEEE.

Tolt, G., Wiklund, A., Andersson, P., Chevalier, T., Grönwall, C., Gustafsson, F., & Larsson, Håkan. (2006). Registration and change detection techniques using 3D laser radar data from natural environments. In *Optics/Photonics in Security and Defence* (p. 63960A–63960A). International Society for Optics and Photonics.

Thrun, S., & others. (2002). Robotic mapping: A survey. *Exploring Artificial Intelligence in the New Millennium*, 1–35.

Tulldahl, H. M., & Larsson, Håkan. (2014). Lidar on small UAV for 3D mapping. In *SPIE Security+ Defence* (pp. 925009–925009). International Society for Optics and Photonics.

Wiklund, A. (2006). *Registration approaches for noisy 3D data representing natural scenes*. Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI).

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