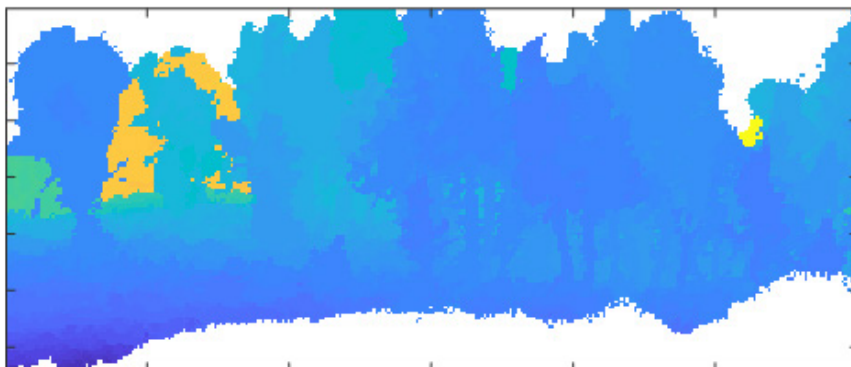
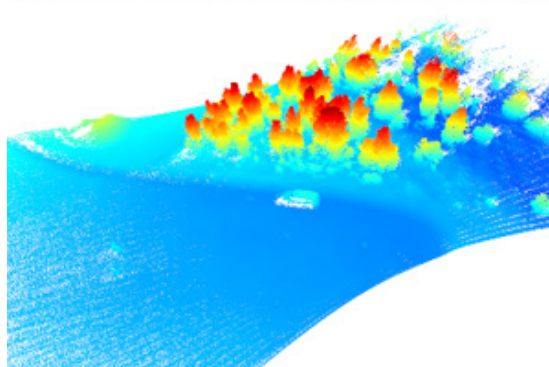


PER JONSSON, MARIA AXELSSON, LARS ALLARD, LINNÉA AXELSSON,
FREDRIK BISSMARCK, CHRISTINA GRÖNWALL, JULIA HEDBORG,
MARKUS HENRIKSSON, MAX HOLMBERG, FREDRIK KULLANDER,
PONTUS KÖHLER, PATRIK LIF, JONAS NORDLÖF, HANNES OVRÉN,
MATTIAS RAHM, LARS SJÖKVIST, DANIEL SVEDBRAND, ULF SÖDERMAN,
GUSTAV TOLT, MICHAEL TULLDAHL



Per Jonsson, Maria Axelsson, Lars Allard, Linnéa
Axelsson, Fredrik Bissmarck, Christina Grönwall,
Julia Hedborg, Markus Henriksson, Max
Holmberg, Fredrik Kullander, Pontus Köhler,
Patrik Lif, Jonas Nordlöf, Hannes Ovrén, Mattias
Rahm, Lars Sjökvist, Daniel Svedbrand, Ulf
Söderman, Gustav Tolt, Michael Tulldahl

Avbildande lasersensorer

Slutrapport för perioden 2017–2019

Titel	Avbildande lasersensorer – Slutrapport för perioden 2017–2019
Title	Imaging laser sensors – Final report for the period 2017–2019
Rapportnr/Report no	FOI-R--4874--SE
Månad/Month	December
Utgivningsår/Year	2019
Antal sidor/Pages	36
ISSN	1650-1942
Kund/Customer	Försvarsmakten
Forskningsområde	Sensorer och signaturanpassning
FoT-område	Sensorer och signaturanpassningsteknik
Projektnr/Project no	E72753
Godkänd av/Approved by	Christian Jönsson
Ansvarig avdelning	Ledningssystem

Bild/Cover: Mätssystem och resultat vid fältförsök, FOI

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk, vilket bl.a. innebär att citering är tillåten i enlighet med vad som anges i 22 § i nämnd lag. För att använda verket på ett sätt som inte medges direkt av svensk lag krävs särskild överenskommelse.

This work is protected by the Swedish Act on Copyright in Literary and Artistic Works (1960:729). Citation is permitted in accordance with article 22 in said act. Any form of use that goes beyond what is permitted by Swedish copyright law, requires the written permission of FOI.

Sammanfattning

Denna rapport sammanfattar och slutrapporterar resultaten från det treåriga FoT-projektet *Avbildande lasersensorer* som har pågått 2017–2019 och som är en del av Försvarmaktens samlingsbeställning till FOI inom området *Sensorer och signaturanpassning*. Projektet har studerat på fotonräknande sensorsystem för längre räckvidder och för undervattensavbildning, samt upplyfta 3D-avbildande lasersensorsystem monterade på UAV (eng. unmanned aerial vehicle). Förutom resultat beskriver rapporten även samverkan med andra aktörer inom området och kunskapsspridningen till Försvarmakten, FMV och andra intressenter.

Avbildande lasersystem med fotonräknande teknik kan göras relativt små och kompakta eftersom man kan utnyttja lasrar med relativt låga pulsenergier. Dessutom kan man mäta scener med stort djup med hög avståndsupplösning. Vi har utvecklat och testat ett fotonräknande sensorsystem med räckvidd över 2 km. Systemet är baserat på en matrisdetektor som är 128×32 pixlar där varje pixel mäter gångtiden för laserpulserna. Även om sensorn är stor i jämfört med andra fotonräknande sensorer så har den ett litet synfält jämfört med bildalstrande sensorer i visuellt och IR. Därför har vi utvecklat en panoramateknik så att systemet kan täcka större scener och testat det vid fältförsök både i solljus och mörker. Vi har utvecklat metoder för att minska brus, detektera ytor på objekt i data, lägga ihop resultat från multipla vyer samt detekterat mål med skillnadsdetektion. Inledande försök med fotonräknande system för undervattensavbildning har också gjorts.

Ett upplyft 3D-avbildande lasersensorsystem har förmåga att se ner genom skyl. Dessutom har man mer information om ett mål i 3D jämfört med 2D. I projektet har vi utvecklat vårt upplyfta system så att mer databehandling kan göras ombord på en UAV. Vi har också visat att sensorsystemet kan detektera fordon under träd som är svåra för passiva sensorer att upptäcka. Data insamlat med systemet har utnyttjats för att göra prov med metoder för scenanalys baserat på maskininlärning med semantisk segmentering, en klassificering av varje punkt i data.

Nyckelord: 3D-avbildning, laserradar, fotonräkning, panoramaavbildning, UAV, undervattensavbildning, måldetektion, skillnadsdetektion, maskininlärning

Summary

This report summarizes and describes the results of the three-year research project *Imaging laser sensors* during the period 2017–2019. This work has been funded by the Swedish Armed Forces R&D programme for Sensors and low observables (FoT SoS, AT.9220419). The project has studied photon-counting sensor systems for long ranges and for underwater imaging, as well as a 3D imaging laser sensor systems mounted on a UAV (unmanned aerial vehicle). In addition to results, the report also describes the collaboration FOI has had with others and the dissemination of knowledge to the Swedish Armed Forces, FMV and other stakeholders.

Imaging laser systems with photon-counting technology can be made relatively small and compact since lasers with relatively low pulse energies can be used. In addition, you can measure scenes with large depth with high range resolution. We have developed a photon counting sensor system and tested it at ranges over 2 km. The system is based on an array detector that has 128×32 pixels where each pixel measures the time-of-flight of the laser pulses. Although the detector is large for photon-counting sensors, it is small compared to image-generating sensors in visual and IR. Therefore, we have developed a panoramic technique so that the system can cover larger scenes and tested it in field trials both in sunlight and in darkness. We have developed methods for reducing noise, detecting surfaces of objects in data, combining image data from multiple views and detecting targets with change detection. We have also performed initial experiments with photon-counting systems for underwater imaging.

A 3D imaging laser sensor system on a UAV has the ability to look down through obscuration. In addition, there is more information about a target in 3D than in 2D. In the project we have been developed our aerial system so that more data can be processed on board the UAV. We have shown that the sensor system can detect vehicles under trees, which are difficult for passive sensors to detect. Data collected with the system has been used to test methods for scene analysis based on machine learning with semantic segmentation, a classification of each point in the data.

Keywords: 3D imaging, laser radar, photon counting, panoramic imaging, UAV, underwater imaging, target detection, change detection, machine learning

Innehåll

1	Inledning	7
1.1	Syfte och frågeställningar	7
1.2	Avbildande lasersensorer	7
1.3	Rapportens upplägg	8
2	Sammanfattade resultat	9
3	Verksamheten.....	11
3.1	Utveckling av fotonräknande kamera	11
3.2	Vidareutveckling av upplyft 3D-UAV	14
3.3	Fotonräkning för undervattensavbildning	15
3.4	Signalbehandling och dataanalys.....	16
3.5	Avskanning av forskningsfronten.....	26
4	Kunskapsspridning och samverkan	27
4.1	Kunskapsspridning	27
4.2	FM och FMV	27
4.3	Universitet, högskolor och forskningsinstitut	27
4.4	Internationella samarbeten	28
5	Utblick mot framtiden	32
	Referenser.....	33
	Bilaga – Samverkande projekt	36

1 Inledning

Denna rapport sammanfattar resultaten för det treåriga FoT-projektet *Avbildande lasersensorer* som har pågått 2017–2019. Arbetet har gjorts inom Försvarmaktens samlingsbeställning för forskning och teknikutveckling inom Sensorer och signaturanpassning (FoT SoS, AT.9220419). Projektet föregicks av ett FoT-projekt med samma namn *Avbildande lasersensorer* som pågick 2014–2016 [1]. Projektet har under den senaste treårsperioden publicerat ett tiotal rapporter, två tidskriftsartiklar och ett tiotal konferensbidrag, varav en tillhör det tidigare projektet [2]. Som del i slutredovisningen har arbetet även presenterats muntligen vid SAMLAS – Samverkansgrupp Laser [3].

1.1 Syfte och frågeställningar

Projektet syftar till att studera utformning av och prestanda hos framtida system för laserbaserad 3D-avbildning för olika militära uppgifter och scenarier. *Målklassificering med fotonräknande sensorsystem*, samt *upplyft 3D-avbildande lasersensor* kommer att vara huvudspår. Fotonräknande sensorsystem kommer företrädesvis att komma till användning för långa avstånd avseende *måldetektion*, *målklassificering*, *måligenkänning*, men kan också komma att användas på mycket korta mätavstånd för exempelvis perimeterskydd. Med upplyft sensor avses att sensorer på plattformar (UAV, mast eller fast monterad på höjd) som opererar från ett par meter till flera hundra meters höjd. Projektet skall också undersöka undervattensavbildning (*bottenkartering i grunda vatten*) för tillämpningar såsom broläggning, båtnavigering (i grunt vatten) och vadning.

Fokus för projektet är frågeställningar som kopplar till militära tillämpningar där 3D-avbildande lasersensorsystem är komplement till annan 2D-avbildande teknik. Verksamheten i projektet inkluderar utveckling, test och utvärdering av försökssystem samt signalbehandlingsmetoder. Internationell samverkan bedöms som viktig för att nå målen.

Frågeställningar som projektet studerat är:

- Hur kan fotonräknande sensorsystem utvecklas för att förbättra olika militära förmågor främst avseende måldetektion, målklassificering och måligenkänning?
- Hur kan upplyfta 3D-avbildande lasersensorsystem utvecklas för att förbättra olika militära förmågor främst spaning och måldetektion av skylda mål?

1.2 Avbildande lasersensorer

3D-avbildning görs traditionellt genom att sända en laserpuls och sedan mäta gångtiden tills man får ett reflekterat svar tillbaka, s.k. *Time-of-Flight* (ToF). Tekniken används bl.a. i laseravståndsmätare. För att konstruera en avbildande sensor behöver man antingen skanna strålen över scenen eller använda en matrisdetektor med många detektorelement för att avbilda en hel scen i 3D med en laserpuls, ett s.k. flash-system. Denna teknik kräver hög pulsenergi för att få tillräckligt hög energi tillbaka för att bestämma avståndet från det optiska pulssvaret.

Ett fotonräknande system använder istället mycket känsliga detektorer som kan registrera enstaka fotoner där ett antal laserpulser behövs för att bestämma avståndet med en statistisk metod. Tekniken kallas TCSPC (Time-correlated single-photon counting). Laserpulser skickas ut med hög repetitionsfrekvens och därefter mäts tiden tills detektorn registrerar en foton. Eftersom systemet endast kan registrera en fotondetektion per laserpuls vet man inte om detektionen kommer från fotoner som reflekterats på målet, från bakgrundsljus eller är termiskt brus. Upprepar man mätningarna så byggs ett histogram upp där signal från bakgrund och brus blir jämt fördelat i tiden, medan fotoner reflekterade från mål kommer vid samma tidsintervall och ger lokala maxima i histogrammet.

Inom detta projekt har vi främst använt fotonräknande system, men i vårt upplyfta 3D-avbildande lasersensorsystem har vi använt ett skannande system som ger ett avstånd för varje laserpuls.

Ett upplyft system kan vara en 3D-sensor monterad i mast, fast monterad på höjd eller på en UAV, men under denna period har vi framförallt studerat sensorn monterad på en UAV och kommer därför kalla systemet för 3D-UAV i rapporten. Detta är det svåraste fallet av upplyft sensor men också det fallet som har störst potential att ge nya förmågor.

1.3 Rapportens upplägg

I Kapitel 2 sammanfattas resultatet från projektet utifrån frågeställningarna beskrivna ovan. Kapitel 3 ger sedan mer detaljerade beskrivningar av verksamheten som har bedrivits i projektet. Kapitel 4 beskriver samverkan FOI har haft med andra aktörer inom området och kapitel 5 beskriver kort kunskapsspridningen till Försvarsmakten, FMV och andra intressenter. Rapporten avslutas med en kort utblick mot kommande projekt och framtiden för avbildande lasersensorer.

För att ge en mer fullständig bild av området *Avbildande lasersensorer* presenteras även verksamhet och resultat från andra närliggande projekt. I Bilaga 1 finns en lista på projekt som har bidragit med kunskap inom området och som har utnyttjat det här projektets resultat för att göra nytta inom försvar och säkerhet. För att tydliggöra FoT-projektets bidrag har de publikationer som gjorts helt eller delvis inom projektet markerats med fet stil i referenslistan. Även de projekt som Avbildande lasersensorer varit med och delfinansierat med lån av utrustning, arbetstid eller pengar har markerats med fet stil i Bilaga 1.

2 Sammanfattade resultat

Projektet har två frågeställningar som varit vägledande för inriktningen och kunskapsuppbbyggnaden i projektet. Den ena frågeställningen handlar om fotonräknande sensor-system och den andra om upplyfta 3D-avbildande lasersensorsystem. I uppdraget ingår även att bygga upp generell kunskap om avbildande lasersystem för tillämpningar inom försvar och säkerhet.

Hur kan fotonräknande sensorsystem utvecklas för att förbättra olika militära förmågor främst avseende *måldetektion, målklassificering, måligenkänning*?

Projektet har stegvis utvecklat ett fotonräknande sensorsystem som vi har döpt till 3D-FALKen. Systemet är baserat på en matrisdetektor som är 128×32 pixlar där varje pixel mäter gångtiden för laserpulserna. Även om matrisdetektorn är stor för fotonräknande sensorer så har den ett litet synfält jämfört med bildalstrande sensorer i visuellt och IR. Därför har vi utvecklat en panoramateknik så att systemet kan täcka större scener. Huvudscenariot för sensorn är att detektera mål bakom ett skogsbryn eller bakom något annat skyl.

Fotonräknande sensorer har en begränsning att maximalt en detektion per pixel och laserpuls kan registreras. För att detektera signaler från mål som är delvis skymda bakom ett främre objekt kan man inte bara öka uteffekten, för då ökar sannolikheten för detektion av det främre objektet och det blir lägre sannolikhet att detektioner från det bakre målet registreras. Vi har visat experimentellt och teoretiskt att som en enkel tumregel har man störst sannolikhet att detektera ett andra objekt då den totala sannolikheten för detektion per pixel och laserpuls ligger mellan 0,65 och 0,75. Detta är ett högre värde än det som ofta nämns i annan vetenskaplig litteratur. Tumregeln kan användas för att automatiskt reglera laserenergin under en mätning för att ha optimal penetration i en scen.

Det fotonräknande sensorsystems kapacitet har utvärderats i ett antal mätningar under projektet. Eftersom det är ett aktivt system så har det nattkapacitet och fungerar till och med bättre på natten än på dagen. Ett starkt dagsljus registreras som brus i sensorn och försämrar prestandan. Det nuvarande systemet har testats vid fältförsök och har en räckvidd på över 2 km och fungerar utmärkt nattetid och har en sämre, men användbar, prestanda dagtid.

Vi har utvecklat sensornära signalbehandling för att detektera ytor i fotondata, minska bruset, utvecklat metoder att lägga ihop resultat från multipla vyer och detekterat mål med skillnadsdetektion. Vi jobbar med utveckling av automatiska metoder för detektion, klassificering och igenkänning av mål, men mer arbete krävs innan vi når dit.

Inledande försök med fotonräknande system för undervattensavbildning har också gjorts med lovande resultat. De ingående komponenterna som användes vid försöken har inte tillräcklig prestanda för att göra ett försökssystem för fältmätningar. Vi har fortsatt med grundläggande mätningar för att få bättre en bättre kunskapsbas för att kunna designa ett försökssystem.

Den fotonräknande tekniken har en stor potential för att vara grunden för relativt små och kompakta avbildande lasersystem.

Hur kan upplyfta 3D-avbildande lasersensorsystem utvecklas för att förbättra olika militära förmågor främst *spaning och måldetektion av skylda mål*?

Under projektet har vi utvecklat ett system som vi kallar 3D-UAV, som består av UAV försedd med en lidar, en positioneringsenhet, en visuell kamera och en termisk kamera. Systemet medger insamling av sensordata från upplyft position och bearbetning av data i realtid. Sensordata samlas in och bearbetas i en dator som har byggts in i systemet. En

första realtidsfunktion har implementerats som skapar georefererade punktmoln av lidardata och sänder dem till marken för visning på en surfplatta.

I projektet har metoder för att registrera lidardata från vår 3D-UAV också vidareutvecklats. Metoderna kombinerar tröghetssenor och 3D-data för att registrera data till ett gemensamt punktmoln. Vi har även visat med data från fältförsök att 3D-UAV:n kan användas för detektion av fordon i skyl. En slutsats i rapporten är att en lidarsensor kan ge ökad förmåga att upptäcka objekt i skyl och därmed skulle kunna fungera som en kompletterande teknik till termiska sensorer. En annan slutsats var att lidardata behöver bearbetas för att bli användbara för operatörer och ge intressanta nya förmågor. Ett exempel på sådan bearbetning är operatörsstöd för objekt-detektion. Därför har projektet gjort inledande prov med maskininlärningsmetoder och djupinlärning för scenanalys med så kallad semantisk segmentering, en klassificering av varje punkt i data. Våra inledande analyser med denna metodik har gett lovande resultat och maskininläringstekniker för analys av punktmoln kommer i framtida verksamhet vara en viktig ingång för analys av punktmoln.

Generellt

Vi har inom projektet även ökat vår kunskap om 3D-avbildning med lasersensorer generellt. Detta har främst skett genom att vi har följt den vetenskapliga litteraturen och deltagit i viktiga vetenskapliga konferenser på området, men också genom våra nationella och internationella samarbeten. Genom ömsesidig samverkan får FOI tillgång till kunskap och erfarenheter som vi inte kan skaffa på egen hand.

3 Verksamheten

Projektverksamheten har bedrivits i olika arbetspaket som har varierat över de tre åren, Här har vi valt dela upp beskrivningen på annat sätt. Först beskrivs utvecklingen av de två huvudsakliga experimentella systemen, den fotonräknande kameran och den upplyfta 3D-lidarn monterad på UAV. Därefter beskrivs verksamheten med undervattensavbildning med fotonräkning. I följande avsnitt beskrivs signalbehandling och dataanalys samt de metoder och verktyg som vi har utvecklat för de olika systemen. Kapitlet avslutas med en kort genomgång av vad som händer internationellt inom 3D-avbildande lasersensorer.

3.1 Utveckling av fotonräknande kamera

Under 2016 köptes en fotonräknande kamera in från Princeton Lightwave inom ett teknikuppdrag från FMV. Kameran har 128×32 pixlar där varje pixel kan mäta tiden för en fotondetektion i våglängdsbandet kring 1550 nm med hög noggrannhet. Som mest kan bildtakten vara 90kHz för kameran. Inom projektet gjordes även initiala tester och utvärdering som delvis finansierades av en tilläggsbeställning till Forsvarsmaktens FoT-beställning till FOI (AF.9220416 Sensor) [4, 5].

Efter de inledande testerna uppgraderades systemet med befintliga komponenter, framför allt en starkare laser, så att utomhustester i dagsljus för avstånd upp till ca 400 m kunde genomföras. Under 2018 byggdes systemet om från grunden med hjälp av ytterligare ett teknikuppdrag från FMV där i princip allt utom den fotonräknande kameran byttes ut [6]. Det nya systemet har en räckvidd upp till 2 km.

Vi har valt att kalla systemet med den fotonräknande kameran *3D-FALKen* där FALK är en akronym av Fotonräknande Avbildande Lidar-Kamera. Figur 1 visar de tre versionerna av 3D-FALKen och Tabell 1 några grundläggande parametrar för systemen.



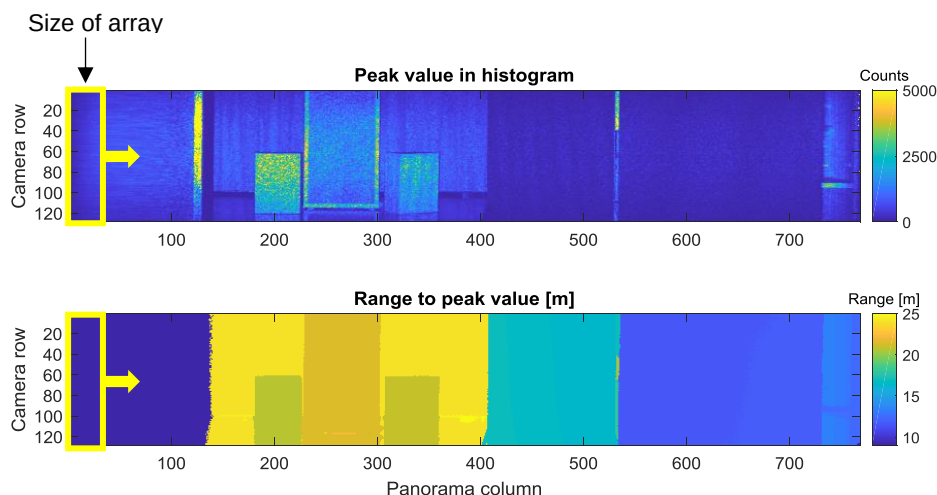
Figur 1. De tre versionerna av 3D-FALKen vid olika prov (Foton: FOI).

Matrisstorleken på den fotonräknande kameran är den största som finns på marknaden. Jämfört med 2D-avbildande kameror i visuellt eller till och med IR är den dock väldigt liten. Mäter man med 3D-FALKen vers. 3.0 på avståndet 1 km så motsvarar det en yta på $2,1 \times 8,5 \text{ m}^2$ med en transversell upplösning på strax under 7 cm. För att kunna täcka större scener har vi utvecklat en panoramateknik. I stället för att mäta med ett stillastående mät-huvud för att sedan flytta synfältet stegvis och mäta nya områden, s.k. *step-and-stare*, mäter vi kontinuerligt samtidigt som systemet roterar med jämn hastighet i sidled. 3D-bilden skapas i signalbehandlingen efter mätningen genom att signalerna från ett vinkelområde utgör signalen i en virtuell pixel, en s.k. panoramapixel. Samtliga pixlar i en rad kommer ge bidrag till en panoramapixel och hastigheten i sidled och det valda vinkelområdet bestämmer integrationstiden för varje fysisk pixels bidrag till en panoramapixeln. I varje panoramapixel bildas ett histogram över de olika avstånd där fotoner registrerats i panoramapixeln. Detta kan sedan analyseras för att avgöra vad som är verkliga

reflekterande ytor och vad som är bakgrundsljus. Lokala maxima i histogrammet motsvarar ytor i scenen. Panoramatekniken har visat sig fungera bra och den är mer tids-effektiv jämfört med *step-and-stare* eftersom den senare endast mäter när det står stilla och inte mellan start och stopp. Detaljerna för panoramatekniken finns bäst beskrivet i en tidskriftsartikel [7]. Ett exempel på panoramabilder visas i Figur 2 där storleken på matrisen är utritad. Normalt har vi monterat kameramatrisen på högkant som bilden visar.

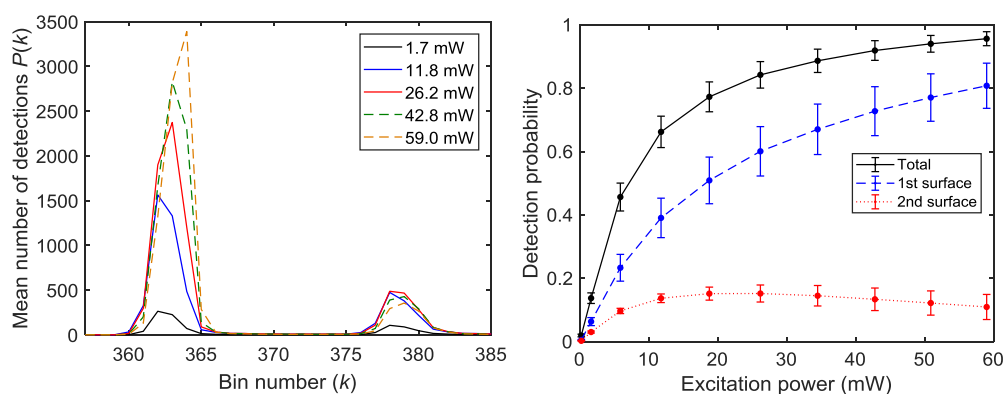
Tabell 1. Olika versioner av 3D-FALKen. (IFOV – instantaneous field-of-view, enskild pixels synfält)

Version	1	2	3
Laservåglängd	1550 nm	1542 nm	1557 nm
Laserpulsenergi	8 nJ	1,6 μ J	14 μ J
Laserpulslängd	22 ps	0,6 ns	0,9 ns
Fokallängd optik	f = 100 mm	f = 100/200 mm	f = 20-750 mm
IFOV	500 μ rad	250 μ rad	67 μ rad
Vridbord	-	rotation	Rotation/elevation
Räckvidd	50 m (inomhus)	500 m	2 km



Figur 2. Exempel på panoramabilder från en inomhusmätning. Den övre bilden visar intensiteten för det pulssvar som har högst amplitud för respektive panoramapixel (flest fotoner från en position i histogrammet). Den undre bilden visar avståndet till motsvarande maximum. Den gula ramen till vänster visar detektormatrisens storlek.

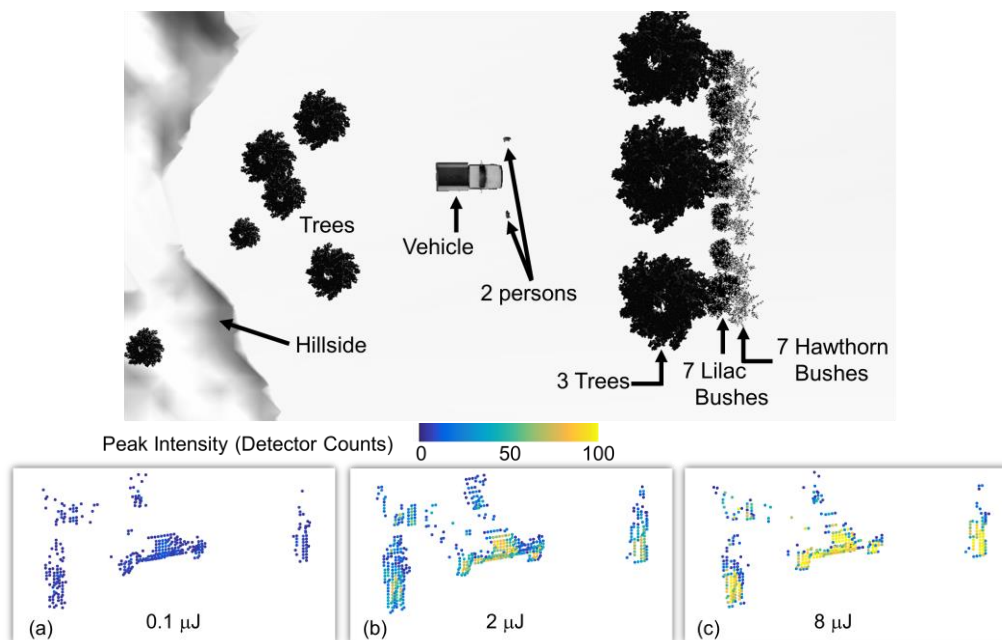
Ett problem med den fotonräknande tekniken är möjligheten att få svar från flera mål eller reflexer i en enskild pixels synfält. Eftersom en fotonräknande detektor endast kan registrera en detektion per utskickad laserpuls kan en stark reflex i början av tidsluckan göra att sannolikheten för att detektera ytterligare reflexer blir lägre. Ökas laserenergin tillräckligt mycket kommer sannolikheten för en andra detektion minska, till skillnad från för ett system med en linjär detektor, t.ex. flash. Vi har undersökt optimal pulsenergi för att detektera signaler från mål som är delvis skymd bakom ett främre objekt. Figur 3 visar exempel på mättnadseffekten där vi mäter mot en skärm med ett finmaskigt nät drygt en meter framför. Vid höga pulsenergier minskar signalen från det andra maximumet (skärmen). Vi har visat experimentellt och teoretiskt att som en enkel tumregel kan man säga att man har störst sannolikhet att detektera ett andra objekt (objektet i skyl) då den totala sannolikheten för detektion per pixel och laserpuls (svart kurva i den högra grafen i Figur 3) ligger mellan 0,65 och 0,75 [8]. Detta är ett högre värde än det som ofta nämns i annan vetenskaplig litteratur. Tumregeln kan användas för att automatiskt reglera laserenergin under en mätning för att ha optimal penetration.



Figur 3. Exempel på mättnad med fotonräknande system.

I samma publikation undersökte vi även fenomenet med hjälp av vår egenutvecklade fysikaliska simuleringsmodell LadarSIM. Scenen visas överst i Figur 4. Även simuleringarna visar att det finns en optimal excitation för att se genom lövverk, i detta fall var det 2 μJ . För lägre eller högre excitation försvinner punkter i punkmolnen som visas i underst i Figur 4. Dessutom kunde vi visa ett samband mellan hur stor andel av en pixels synfält som blockeras av förgrundens växtlighet, s.k. fill factor, och excitationsnivån.

LadarSIM kan simulera system med både linjära och fotonräknade detektorer. En scen byggs upp med olika 3D-modeller. Simuleringen görs sedan i tre steg. Först görs strålpropagering genom scenen, därefter beräknas systemresponsen utifrån ingående komponenter och slutligen beräknas detektionen med antingen en linjär eller fotonräknande modell. Programmet LadarSIM har också använts i ett NATO-samarbete, se avsnitt 4.4.2.



Figur 4. Exempel på fysikaliska simuleringar av mättnadseffekter.

3D-FALKen har använts vid flera försök och delar av resultaten har presenterats vid ett antal konferenser där även äldre mätningar med ett skannande fotonräknande enpixel-system presenterats [8–15]. Följande mätningar har genomförts där huvudsyftet står i parentes:

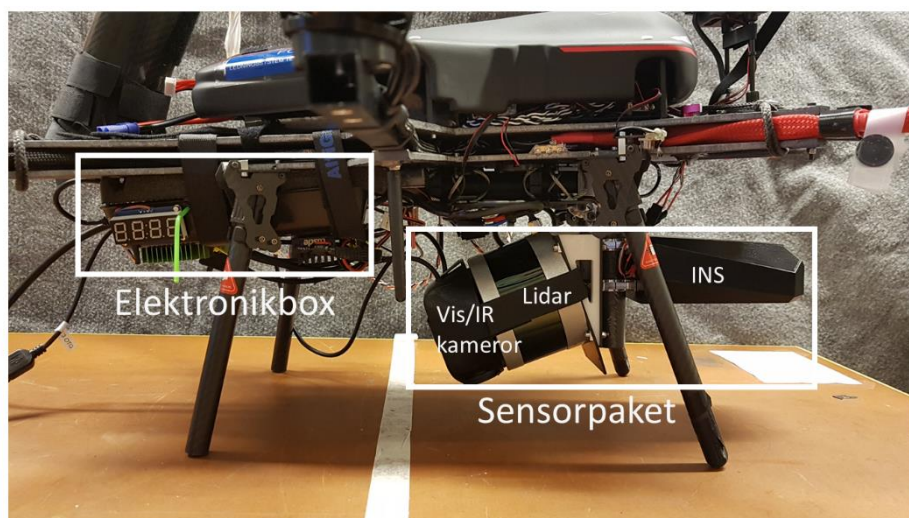
- Inomhusmätningar 2017 (grundläggande tester)
- Takmätningar 2017 (objekt i skogsbyn på 300–400 m)
- Mätningar från horisontlabb 2018–2019 (atmosfärsmätning vid dåligt väder)
- Kvarn 2018 (fordon i skogsbyn på ca 1 km)
- Karlsborg 2019 (rökmätningar)
- Skövde 2019 (fordon i skogsbyn på 1–1,5 km)
- Karlskrona 2019 (aktiviteter i marin miljö på 1–2 km)

I avsnitt 3.4 behandlas signalbehandling och dataanalys från ovanstående mätningar. Mätningarna under 2019 har endast analyserats preliminärt och kommer behandlats mer djupgående inom det kommande FoT-projekt *Avbildande fotonräknande lasersystem*.

3.2 Vidareutveckling av upplyft 3D-UAV

Exempel på tillämpningar för lidar på upplyft plattform är stöd vid rekognosering, detektion av objekt i skyl och siktfältsanalys. Målet med verksamheten har varit att föra lidar-tekniken närmare praktisk tillämpning och att kunna utvärdera nya förmågor som tekniken skulle kunna bidra med. Inom ett teknikuppdrag från FMV utreddes under 2017 möjligheten att vidareutveckla det tidigare framtagna systemet 3D-UAV för att genomföra synkronisering och sensornära bearbetning av data i ett *inbyggt system* (ombord i sensorbäraren) och att även att göra dessa uppgifter i *realtid* [16]. I systemkonceptet lades även en termisk kamera till (FLIR Boson 640) för att kunna jämföra egenskaper i laserdata och termiska data.

I nästa fas 2018 byggdes detta system, benämnt *Upplyft elektrooptiskt (EO) system* [17], ihop. Det vidareutvecklade systemet medger insamling av sensordata från upplyft position och bearbetning av data i realtid. Sensorerna består av en lidar, en positioneringsenhet, en visuell kamera och en termisk kamera, se Figur 5. Sensordata insamlas och bearbetas i en dator som har byggts in i systemet. En första realtidsfunktion har implementerats som skapar georefererade punktmoln av lidardata och sänder dem till marken för visning på en surfplatta.



Figur 5. Nya versionen av det 3D-avbildande lasersensorsystemet monterat på en UAV.

Ett antal mätningar har genomförts med systemet (se exempel i Figur 6):

- Kvarn 2018 (fordon i skog)
- Nära Lilla Gåra 2019 (datainsamling för maskininlärning)
- Skövde 2019 (fordon i skog)
- Västervik 2019 (datainsamling för datafusion med andra sensorer)

Under 2019 har projektet också bidragit till en rapport om UAS (eng. unmanned aerial systems) ur ett sensorperspektiv [18] som sammanfattar erfarenheter och kunskaper från flera projekt inom FoT-området. Vidare analys, resultat och möjligheter till bearbetning av data från 3D-UAV:n redovisas avsnitt 3.4.



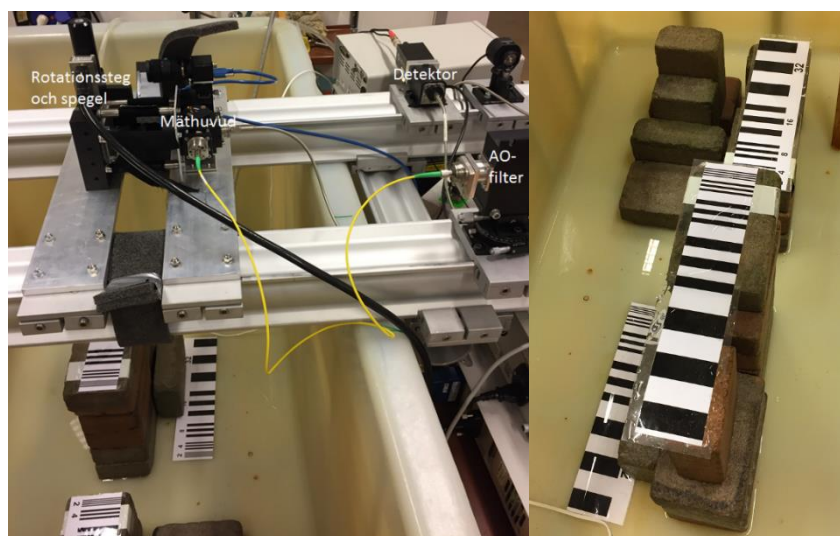
Figur 6. Exempel på scener där 3D-UAV:n använts för insamling av data. Till vänster ett skogsbryn vid Kvarn och till höger en scen nära Lilla Gåra.

3.3 Fotonräkning för undervattensavbildning

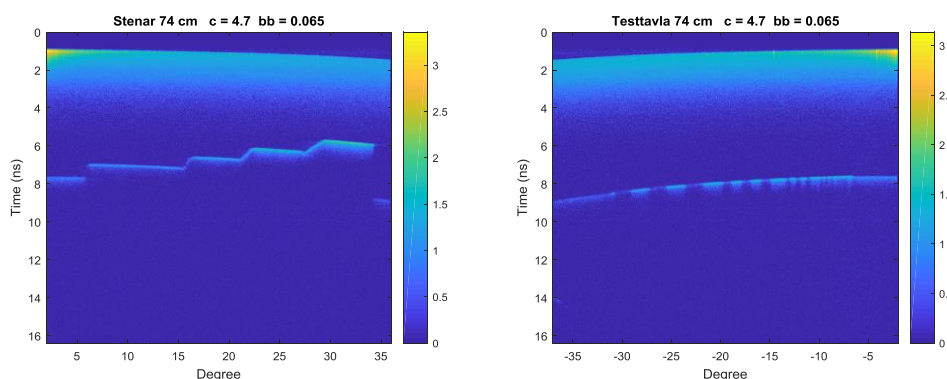
Under 2017 genomfördes en studie för att undersöka potentialen hos fotonräkning för undervattensavbildning [19]. Behovet av bättre kartering av grunda och grumliga vatten har kommit upp i samtal med Ing2 där de önskar sig en ny förmåga i samband vid broläggning. Små föremål (t.ex. armeringsjärn, stockar och stenar) nära ytan (0–2 m) kan ha förödande konsekvenser då de kan förstöra bärkraften i broarna. Idag finns ingen tillförlitlig sensorlösning utan dykare måste fastställa att vattenvolymen just under ytan är fri från föremål och detta är mycket tidskrävande. Det finns även andra tillämpningar där fotonräknande system kan tillföra förmågor t.ex. undervattensnavigering och bottenundersökning från en undervattensfarkost.

I studien genomfördes tester i en vattentank där partiklar tillfördes för att öka grumligheten. Bilder av testsystemet och tanken med olika mål visas i Figur 7. Laserstrålen skannades i en riktning och det fotonräknande systemet mätte djupinformationen för den linjen. Exempel på resultat visas i Figur 8.

Vid sidan av mätningarna gjordes även simuleringar av inverkan på infallsvinkeln mot vattenytan, effekten av grumligheten på strålprofilen och dämningen samt prestanda-beräkningar för system baserade på enpixel- respektive matrisdetektorer.



Figur 7. Vänster: mätupställningen ovanför vattentanken. Höger: närbild på målen.



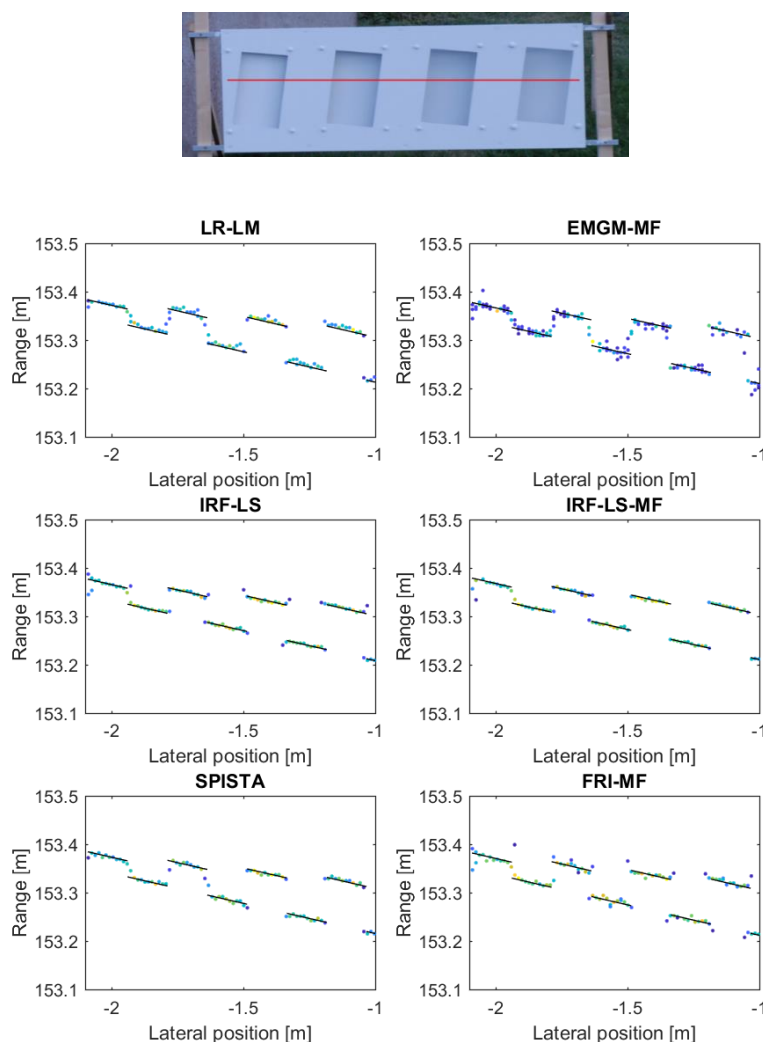
Figur 8. Exempel på resultat med det fotonräknande systemet i vattentanken på markstenar i en trappa (vänster) och en referenstavla på botten av tanken (höger) med en dämpning på $4,7 \text{ m}^{-1}$. Färgskalan är logaritmisk. Tillbakaspridningen syns tydligt i skiktet nära ytan i bilderna.

Studien visade att komponenterna som användes vid försöken inte hade tillräcklig prestanda för att göra försökssystem för fältmätningar. Lasern behöver ha högre pulsenergi, detektorn behöver mer avancerade grindningsmöjligheter och skanningstekniken behöver förbättras. Vi har införskaffat en ny detektor med bättre grindningsprestanda men inte haft möjligheter att införskaffa en ny laser eller skanner. Mätningar i vattentanken har fortsatt efter studien med den nya detektorn och en ny fiberoptisk cirkulator för att få ett enklare optiskt system. Dessutom har vi även genomfört mätningar för att förstå spridningen i framåtriktningen samtidigt som vi mäter bakåtspridningen. Resultaten från dessa mätningar kommer att redovisas i en rapport i det kommande FoT-projekt *Avbildande fotonräknande lasersystem*.

3.4 Signalbehandling och dataanalys

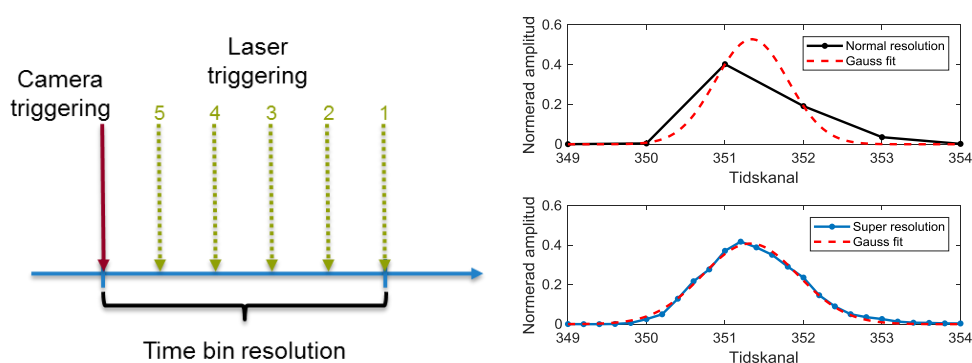
Inom sensornära signalbehandling av histogramdata från våra fotonräknande system har vi bland annat undersökt olika metoder från litteraturen för att kunna upptäcka och särskilja två ytor som befinner sig inom en pixels synfält [20]. Data samlades in med vårt äldre en-pixelsystem som skannade en linje över en plåttavla med öppningar och bakre plåtar med olika avstånd till den främre plåten, se fotografi i Figur 9. Sex olika metoder undersöktes med avseende på förmågan att hitta dubbla maxima, avståndsnoggrannhet och falsklarms-sannolikhet. Jämförelsen gjordes även med olika delmängder av rådata, vilket motsvarar

olika integrationstider. Bäst var metoden som i Figur 9 kallas IRF-LS-MF. En nackdel är att den är relativt beräkningskrävande och därmed ganska långsam. En snabbare metod som var relativt bra är SPISTA.



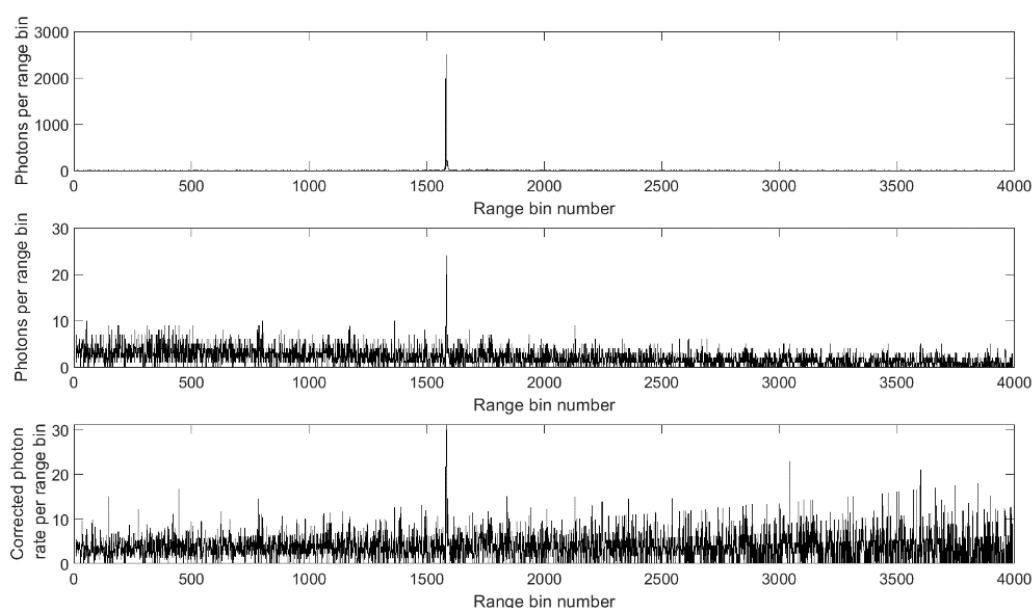
Figur 9. Detektion av multipla ytor i en pixels synfält med olika signalbehandlingsmetoder Överst ett fotografi av plåttavlan och under resultaten för de olika metoderna.

Flera av metoderna i analysen för att särskilja två ytor utnyttjar att man har god kännedom om systemets pulssvar, (IRF – Instrumental Response Function). Med 3D-FALKen har vi inte denna goda kännedom om dess IRF och därför är ovanstående metoder inte överförbara på det nya systemet. Orsaken till detta är att matrisdetektorns inbyggda elektronik har en indelning i tidskanaler som är 500 ps som kortast. Med så långa tidskanaler hamnar systemets pulssvar i ett fåtal tidskanaler, se övre grafen till höger i Figur 10. För att få en bättre uppfattning av IRF tog vi fram en metod som vi kallar *super-range resolution* [10]. Genom att förskjuta laserpulsen i förhållande till kamerainsamlingen med steg som är kortare än indelningen i tidskanaler, typiskt 100 ps, kan vi subsampla tidskanalerna och få en bättre tidsupplösning, se undre grafen i Figur 10. Denna upplösning är dock inte tillräcklig för ovanstående signalbehandlingsmetoder för enpixelsystemet, men det bättre uppmätta pulssvaret kan användas i signalbehandlingsmetoderna vi utvecklat för 3D-FALKen. Super-range resolution kan även användas för att bättre särskilja ytor som ligger nära, men det är hittills bara testat i labbmiljö.



Figur 10. Super-range resolution. Till vänster visas tekniken där vi förskjuter laserpulsen i förhållande kamerainsamlingen om steg som är kortare än tidskanalen och kan därmed subsampla pulssvaret. Uppe till höger visas resultaten för normal insamling och nedanför visas resultatet med super-range resolution.

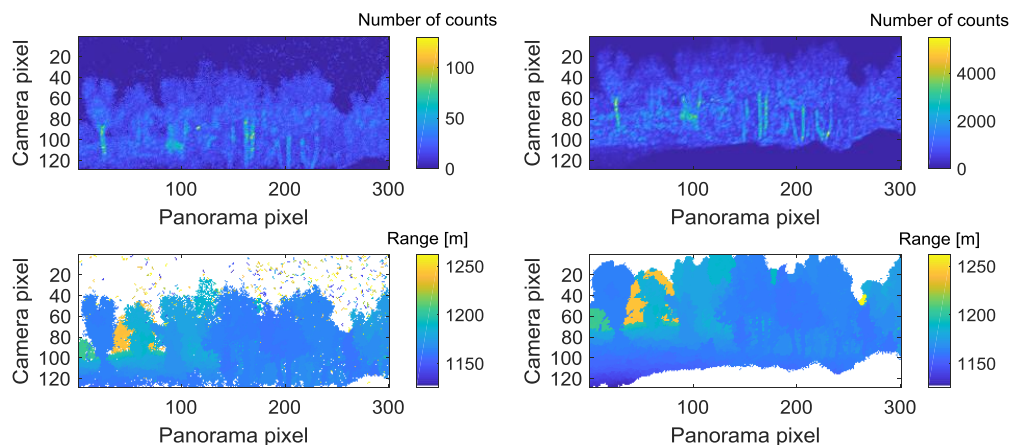
Med 3D-FALKen samlas data oftast in med den panoramateknik som beskrivits ovan där en voxelgrid med fotondata skapas när sensorn sveper fram och tillbaka och varje panoramapixel motsvarar insamlade fotoner från ett litet vinkelintervall i höjddled och sidled. Det samlade pulssvaret i en panoramapixel kan justeras för att kompensera för att det samlas in fler fotoner från objekt nära sensorn på grund av att sensorn mätas [8, 14]. Mättnadskompensation görs på varje histogram för sig så att medelvärdet av bakgrunds-signalen blir konstant i hela tidsintervallet. Detta gör även att intensiteten blir mer likt och jämförbart med det linjära pulssvaret. Korrektionen gör dock att standardavvikelsen ökar för bakgrunden i senare delen av histogrammet. Figur 11 visar ett exempel före och efter mättnadskompensation för en dagsljusmätning mot en högre reflekterande yta. Kompensationen är bara meningsfull att göra när man har samlat in tillräckligt mycket data i ett histogram för att kunna beräkna bakgrunden. I ett rörligt scenario där fotoner samlas in samtidigt som sensorn flyttar sig finns fenomenet med mättnad kvar men blir svårare att kompensera för. Detta beror på att kompensationen är beroende av vad som finns framför längs siktlinjen i panoramapixeln fram till ytan där fotonen reflekterats, men i en scen där sensorn flyttas och skannar samtidigt blir det lätt mättsituationer där underlag för kompensation saknas.



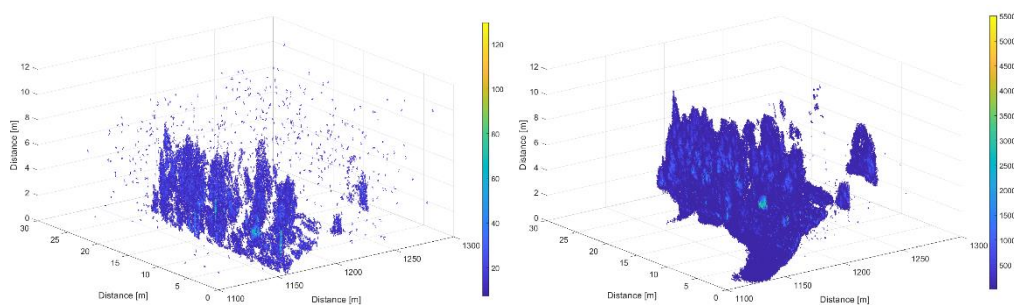
Figur 11. Histogram från en högre reflekterande yta i mörker (överst) och i dagsljus (mitten). Nederst visas histogrammet i dagsljus efter kompensation för mättnad.

I ett insamlat panorama från en mätning kan vi detektera lokala maximum av fotoner i varje panoramapixel som motsvarar ytor på objekt för att få ett punktmoln. Lokala maxima kan detekteras på olika sätt i data. Enklast är att tröskla på en konstant brusnivå och detektera maxima över denna nivå. Vi har i projektet även analyserat anpassad tröskelsättning som justeras efter bakgrunden [14].

Den fotonräknande kamerans kapacitet har utvärderats i ett antal mätningar under projektet. Eftersom det är ett aktivt system så har det nattkapacitet och fungerar till och med bättre i mörker än i dagsljus. Ett starkt dagsljus registreras som brus i sensorn och försämrar prestandan. Exempel på panorama från samma scen avbildad på natten och på dagen visas i Figur 12. Det är tydligt att bilden som samlats in i mörker (till höger) har mindre brus i histogrammen över insamlade fotoner vilket leder till att fler ytor kan detekteras korrekt. Notera skillnaden i antal detektioner på de övre bilderna som beror på att systemets apertur har minskats i dagfallet för att sensorn inte helt ska mättas av dagsljuset. Notera även att systemet kan mäta ytor ca 100 m bakom främre delen av skogsbrynet. Figur 13 visar motsvarande punktmoln för mätningarna.



Figur 12. Exempel på insamlat panorama från fotonräknaren. Maximum i varje panoramapixel (överst) och avståndet till pixeln (nederst). Värden under en viss brusnivå har filtrerats bort. Till vänster visas data insamlat i dagsljus och till höger i mörker. (I bilden till vänster är sensorn riktad något högre än i bilden till höger.)

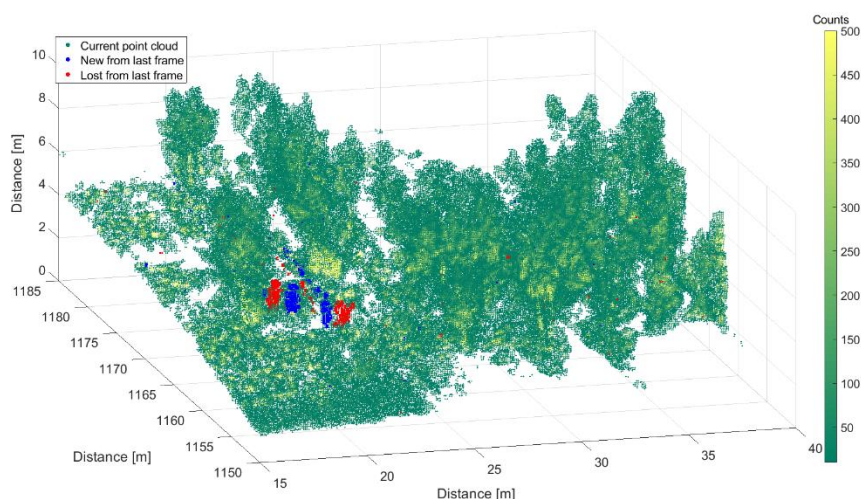


Figur 13. Punktmoln från två mätningar. Dagsljus (vänster) och i mörker (till höger). Färgskalan visar summan av antalet fotoner i detektionen av lokala maxima. (I bilden till vänster är sensorn riktad något högre än i bilden till höger.)

I dagsljusbilder behövs metoder för att filtrera bort fotoner som hör till bakgrunden för att kunna detektera maxima i histogrammen och kunna detektera korrekta ytor. Under projektet har vi undersökt metoder för filtrering av brus både i det detekterade punktmolnet och i voxeldata från panoramabilderna. En metod för filtrering i punktmolnet är att först extrahera ett punktmoln med en relativt låg tröskel. Detta ger en del brus men får fram den större delen av alla ytor i en panoramapixels synfält. Sedan kan varje punkt

analyseras och punkter som inte har tillräckligt många grannar inom en given radie klassificeras som bruspunkter och tas bort. En metod för filtrering av histogramdata har också provats som tittar på sammanhängande områden i histogramdata över en viss tröskel så att maxima i varje panoramapixel bara kan detekteras där det finns tillräckligt stöd från närliggande panoramapixlar på samma avstånd. Parametrar för dessa algoritmer baseras på kunskap om hur fotoner från en yta registreras i systemet.

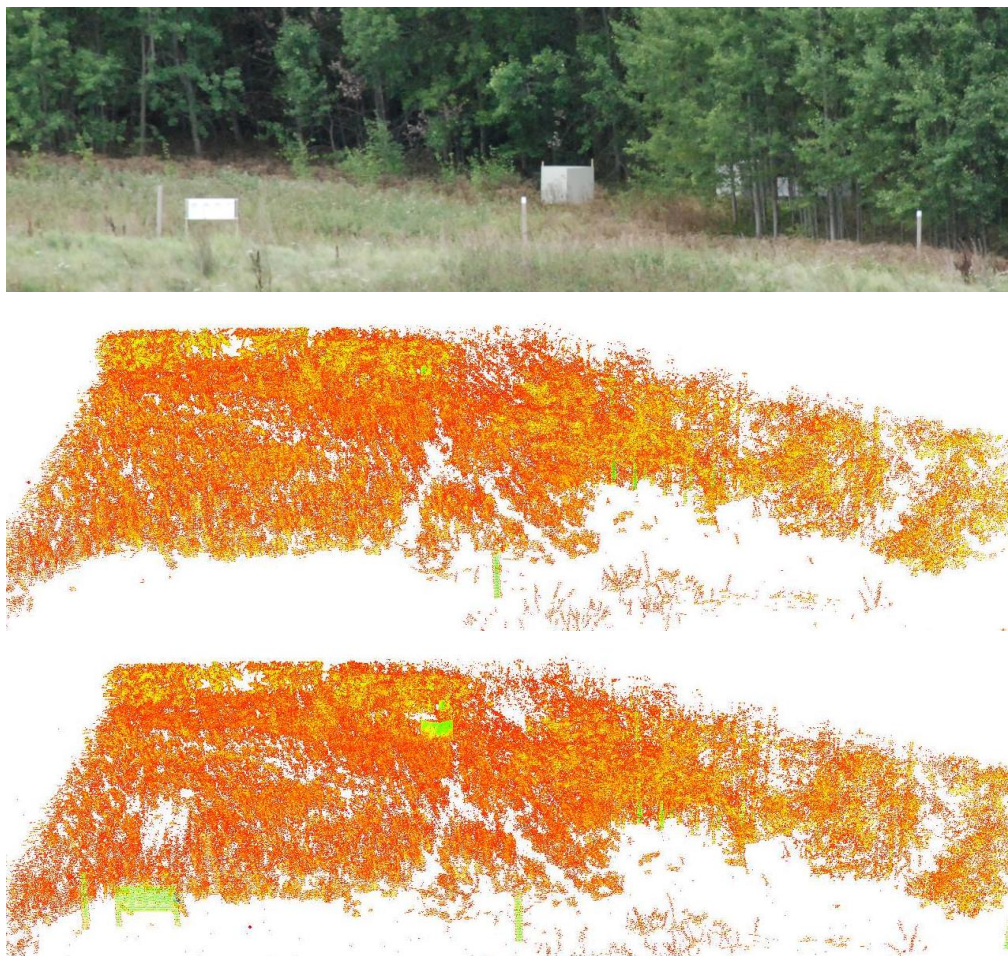
I mörker kan sensorns svephastighet ökas och ändå behålla ett signal-till-brusförhållande som är tillräckligt för att detektera maxima i data. Detta ger en möjlighet att mäta upp en dynamisk scen när sensorn står och sveper fram och tillbaka och skapa en 3D-video av data [14]. Som ett operatörsstöd kan man då göra skillnadsdetektion mellan två på varandra följande punktmoln, se Figur 14. I denna scen går två personer fram och tillbaka. Både punkter på personerna och i skuggan av dem dyker upp som skillnader. Skillnadsdetektion kan också göras i registrerade data uppmätta vid olika tillfällen [11]. Exempel på hur scenen ser ut (med mål) och hur punktmolnen ser ut med och utan mål visas i Figur 15 och resultatet av skillnadsdetektionen visas i Figur 16.



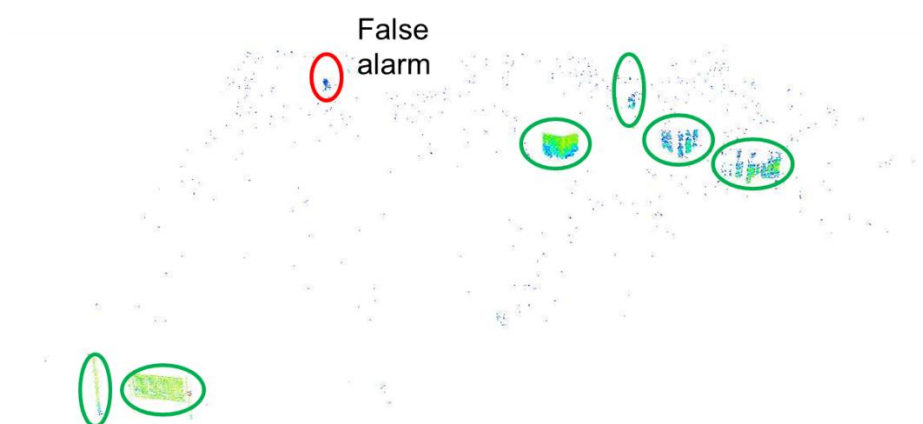
Figur 14. Exempel på skillnadsdetektion i en dynamisk scen där sensorn står i en fast position och sveper fram och tillbaka.

Både 3D-FALKen och 3D-UAV:n samlar in data från ett begränsat område vid varje tidpunkt. För att få en fullständig bild av scenen behöver därför data kombineras från olika delmätningar. Detta kan göras genom att registrera data, d.v.s. lägga samman data i ett gemensamt koordinatsystem så att ytor på samma objekt från olika delmätningar överensstämmer så bra som möjligt.

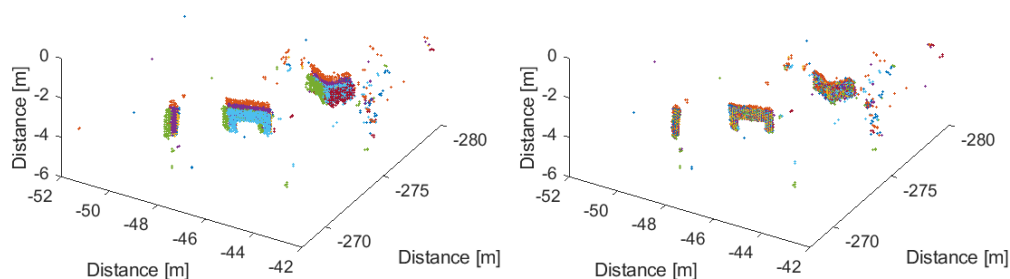
Den inledande registreringen i fotonräknaren baseras på att sensorn står stilla och sveper fram och tillbaka och samlar in data i ett panorama. Har vi mätningar från flera positioner så kan punktmoln eller voxelgriddar med fotondata också kombineras med registrering. Vi har undersökt en metod för att registrera panoraman från fotonräknaren från flera positioner som använder registrering av punktmolnet från varje position. Här använder vi data från tio olika positioner längs en räls. I panoramabilden från varje position detekteras lokala maxima i histogrammen för att få fram ett punktmoln. I nästa steg registreras punktmolnen från varje position, se Figur 17. De geometriska transformationerna från registreringen används sedan för att lägga samman fotondata i voxelgriddarna från de olika positionerna och detektera ytor från objekt i en sammanlagd voxelgrid, se Figur 18. I den sammanlagda fotondatamängden kan data från flera mätningar från olika riktningar bidra med information om verkliga ytor som liknar brus i enskilda mätningar. Metoden beskrivs också i [14].



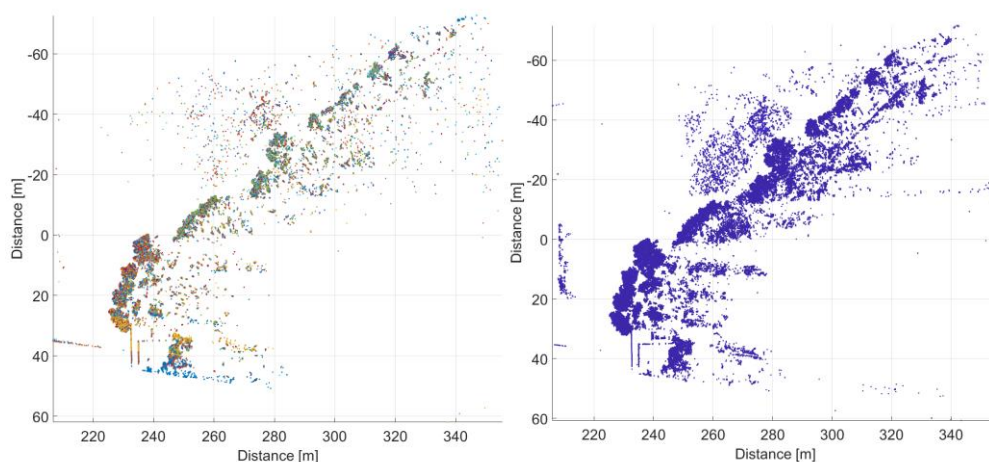
Figur 15. En scen avbildad med och utan mål. Kamerabild av scenen (överst), punktmoln utan mål (mitten), och punktmoln med mål (nederst).



Figur 16. Resultat av skillnadsdetektion baserat på data i Figur 15.



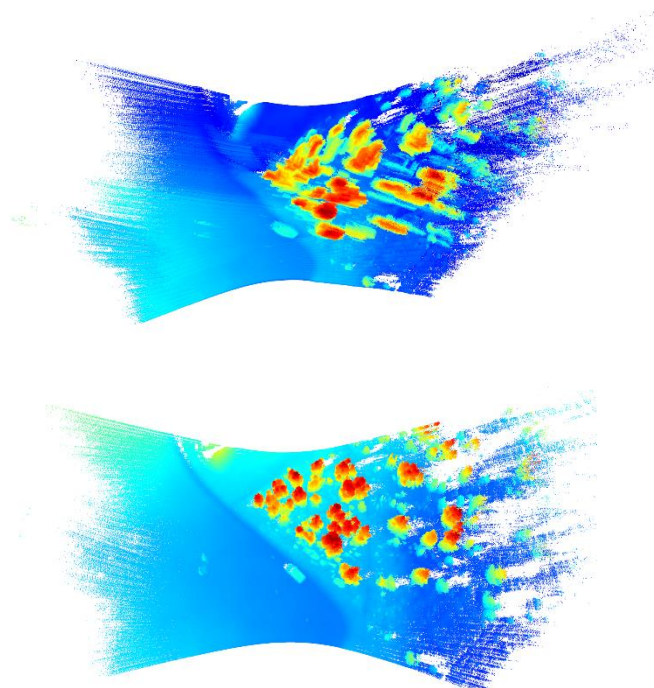
Figur 17. Detalj i punktmolnen från tio positioner. Före registrering när positionerna endast baseras på ungefärliga sensorpositioner (vänster). Efter registrering (höger).



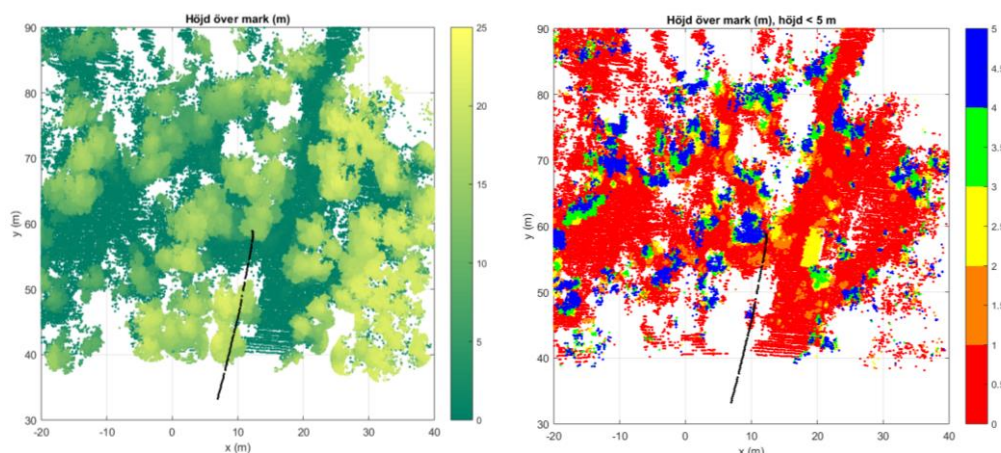
Figur 18. Punktmoln från tio positioner har registrerats till samma koordinatsystem (vänster). Ett punktmoln där registreringen av de tio dataseten även använts för att lägga samman fotodata och detektera nya maxima som motsvarar ytor i den sammanlagda datamängden (höger).

I projektet har metoder för att registrera lidardata från 3D-UAV:n också vidareutvecklats. Metoderna kombinerar tröghetssensor och 3D-data för att registrera data till ett gemensamt punktmoln. I ett konferensbidrag beskrivs en utvärdering av två olika metoder, s.k. dynamisk kalibrering och en algoritm baserad på GICP (Generalized Iterative Closest Point) [21]. Dynamisk kalibrering ger bra resultat, men är ganska beräkningsintensivt och därmed långsamt. GICP har större potential att kunna göras i realtid, men mer forskning behövs för att göra metoden robust för en vy uppifrån. Exempel på registrering med dynamisk kalibrering av punktmoln insamlat under en mätkampanj vid flygplatsen i Västervik inom det medfinansierade projektet *N-dimensional modeling* visas i Figur 19.

I en rapport visar vi med experimentella data hur 3D-UAV:n kan användas för detektion av fordon i skyl (Figur 20) [17]. En slutsats är att en lidarsensor kan ge ökad förmåga att upptäcka objekt i skyl och skulle därmed kunna komplettera termiska sensorer. En annan slutsats är att lidardata behöver bearbetas för att bli användbara för operatörer och ge intressanta förmågor. Ett exempel på sådan bearbetning är operatörsstöd för objekt-detektion.

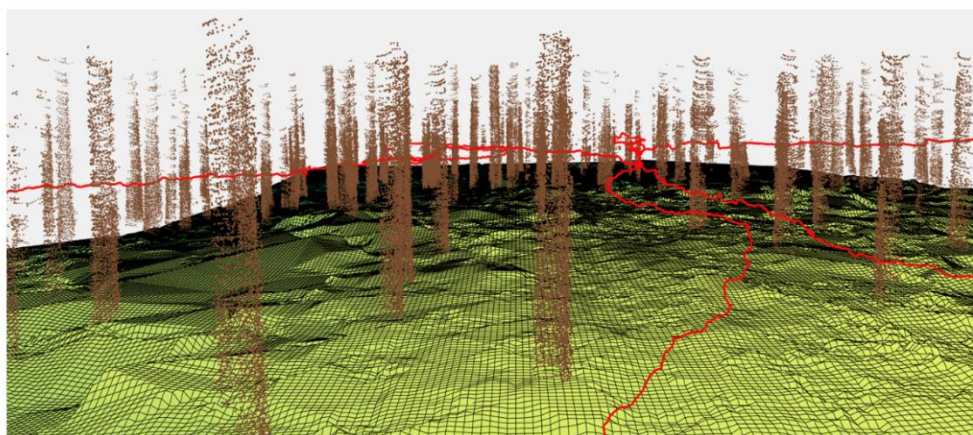


Figur 19. Punktmoln från 3D-UAV där punkternas position baseras endast på tröghetsnavigering från sensorn (överst). Punktmoln registrerat baserat på förbättrad positionering offline (nederst).



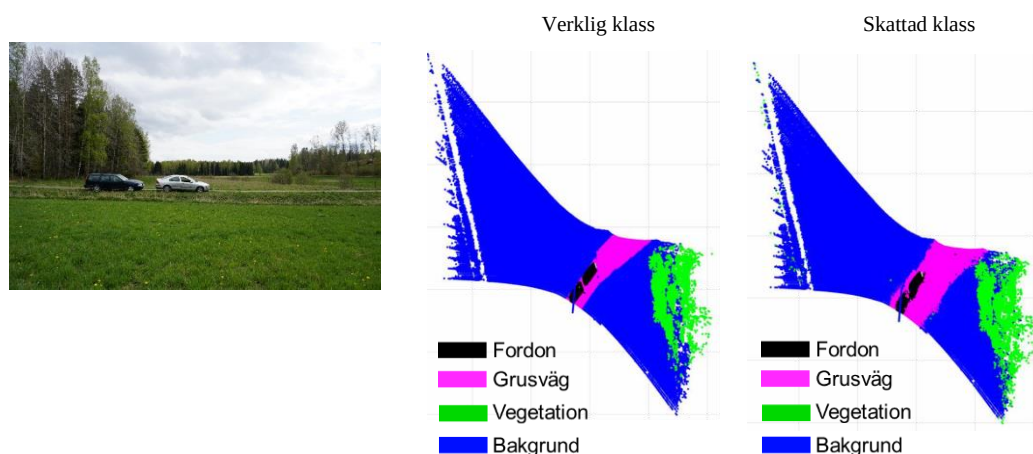
Figur 20. Exempel på 3D-punkter från mätsystemet 3D-UAV (vänster bild). Data har vidare analyserats i två steg, först genom att ta fram en höjdmodell för marken och sedan visa punkter i en färgskala som motsvarar lokal höjd över mark. I den högra figuren har punkter högre än 5 m över mark filtrerats bort och kvarvarande punkter visualiserats med en färgskala som motsvarar 0 m till 5 m över marknivån. En terrängbil dold under trädskronorna framträder då som en gul rektangel. Den svarta linjen visar hur sensorn rört sig. Sensorns höjd över mark var ca 45 m.

FOI har deltagit i ett projekt tillsammans med Sveriges Lantbruksuniversitet (SLU) som syftade till att kartera träd med position och stamdiameter [22, 23]. I ett konferensbidrag [24] redovisar vi en metod för att filtrera ut särdrag (i detta fall träd och mark) ur data från en personburen 3D-lasersensor och att nyttja dessa särdrag för noggrann positionering, se Figur 21. Resultatet gav positionsnoggrannhet bättre än 15 cm på en tillryggalagd sträcka av 300 m. Metoden är helt oberoende av satellitnavigeringsdata. Genom att nyttja ett begränsat antal särdrag, istället för den stora mängd punktdata som lasersensorn genererar, har metoden goda förutsättningar att kunna användas i realtid. Metoden kan dels användas för navigering, dels för registrering av data från en rörlig sensor i skogsmiljö. Arbetet som genomfördes med sensorn i skogsmiljö har även potential att tillämpas i mer generella miljöer för en upplyft högupplösande lasersensor.



Figur 21. Exempel på bearbetat sensordata från personburen 3D-lidar (Velodyne VLP-16) med detekterade trädstammar (bruna punkter), skattad markyta (grön) och sensorbana (röd kurva).

En litteraturstudie med särskilt fokus på måligenkänning i data från ett fotonräknande system genomfördes under 2017 [25]. En av slutsatserna i denna studie var att algoritmer för måligenkänning i data från fotonräknande lasersystem bör baseras på lokala egenskaper och maskininläring. Som en fortsättning på denna analys har även en litteraturstudie genomförts under våren 2018 för att gå igenom forskningsfronten generellt för detektion och segmentering i 3D-punktmoln från olika punktmolnsalstrande sensorer. En översikt av forskningen fram till mitten av 2018 presenteras i rapport [26]. Mycket sker just nu i området så forskningsfronten bevakas därför kontinuerligt. De flesta nya metoder inom detektion och segmentering i punktmoln baseras idag på maskininläring med så kallad djupinläring (eng. deep learning). Det finns flera olika ansatser för hur man angriper problemet med att 3D-punktmoln inte behöver ha spatiellt sorterade data som vanliga bildalstrande sensorer. Nya tekniker för analys av punktmoln med djupinläring publiceras ofta och det är en snabb utveckling på detta område. Under våren 2019 gjordes inledande prov med djupinläring för scenanalys med så kallad semantisk segmentering, en klassificering av varje punkt i data, se Figur 22. Våra inledande analyser med denna metodik har gett lovande resultat och maskininläringstekniker för analys av punktmoln kommer i framtida verksamhet vara en viktig ingång för analys av punktmoln.



Figur 22. Exempel på resultat från inledande prov med djupinläring för semantisk segmentering av punktmoln. Till vänster visas en kamerabild från scenen. I mitten visas varje pixels sanna klass och till höger klassificeringsresultatet för en del av scenen.

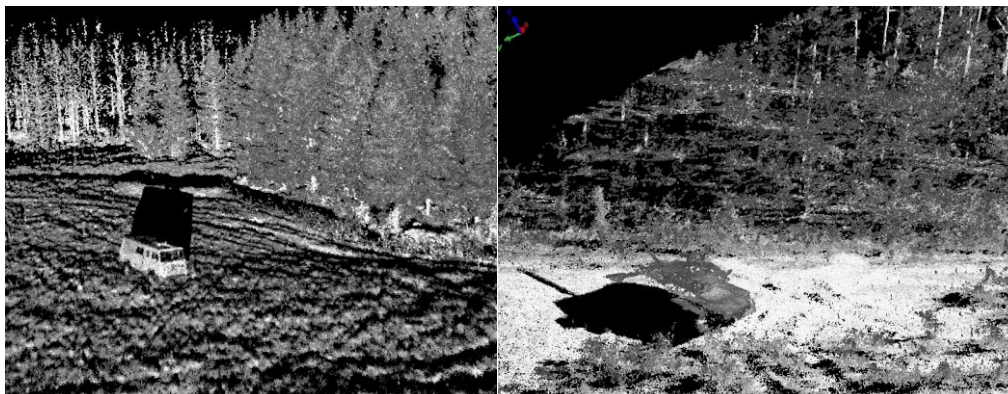
De flesta mätningar med den fotonräknande kameran har gjorts från fasta positioner där sensorn står och sveper fram och tillbaka för att samla in ett panorama. Mycket av signalbehandlingen och punktmolnsextraktionen är anpassad för denna mätsituation, men analys

av hur man kan signalbehandla data från en rörlig sensor har påbörjats. Två examensarbeten har också gjort inledande arbeten på rörlig plattform [27, 28]. I början av projektet samlades data in från sensorn under rörelse längs med en räls och under 2019 gjordes anpassningar av systemet med förändringar i insamlingstekniken för att kunna mäta från taket på en bil, se Figur 23. Data har också synkroniserats med data från ett tröghets-sensorsystem eftersom sensorns position och orientering måste bestämmas i 3D för att kunna generera ett korrekt punktmoln vid fri generell rörelse. Att sensorn kan mäta från ett biltak har också möjliggjort smidigare mätning även från fasta positioner. Vidare forskning på rörlig plattform kommer att genomföras inom det kommande FoT-projekt *Avbildande fotonräknande lasersystem*.



Figur 23. Fotonräknaren har under 2019 anpassats så att mätning kan göras från taket på en bil.

I en studie beställd av FMV undersöktes möjligheten att utnyttja skuggan för detektion och identifiering vid aktiv avbildning [29, 30]. Ibland kan avsaknaden av reflektioner bakom ett mål vara tydligare än reflektionerna från själva målet. Figur 24 visar två exempel på skuggor från fordon. I siluetterna framträder ofta tunna strukturer tydligare än från den aktiva bilden, t.ex. som eldröret i den högra bilden.



Figur 24. Skuggor uppstår bakom solida objekt. Vrider man ett punktmoln framträder skuggan tydligt och kan användas för detektion och ibland för klassificering eller till och med identifiering.

3.5 Avskanning av forskningsfronten

Projektet har följt forskningsfronten kontinuerligt under perioden. Detta har främst skett genom att följa den vetenskapliga litteraturen och delta på viktiga konferenser. Våra internationella samarbeten (avsnitt 4.4) är också en viktig källa till information som inte alltid går att få tillgång till på andra sätt. En förutsättning för att bli inbjuden till dessa samarbeten är att vårt eget arbete håller hög internationell kvalitet. Genom samarbeten får vi en bredare kunskap om 3D-avbildande tekniker, även sådana tekniker som vi inte har resurser att undersöka själva. Deltagande i två av NATO:s von Kármán Horizon Scanning-studier (avsnitt 4.4.5) har också varit värdefullt för att få andra länders syn på vilka aktivt avbildade system de ser kommer vara viktiga inom säkerhet och militära sammanhang i framtiden.

Den tydligaste trenden inom 3D-avbildning är bilindustrins intresse för lidarsystem som en möjlig sensor för att använda i självkörande bilar. Ett antal nya sensorer har tagits fram och testas. Dessa system har räckvidder på upp till några hundra meter och kan vara av intresse för vår 3D-UAV. Även satellitfri navigering med denna typ av sensorer rörer stort intresse.

En annan tydlig trend är maskininlärning med så kallad djupinlärning (eng. deep learning) på 3D-data. Metoden har visat sig vara framgångsrik för 2D-bilder för att detektera och identifiera objekt i bilderna och mycket forskning pågår inom ämnet. Det finns ett stort intresse för att utnyttja maskininlärning även för 3D-data och algoritmutveckling för 3D-data är ett område där mycket händer just nu. Vi genomförde en litteraturstudie 2018 [26] och följer utvecklingen kontinuerligt.

Storskalig kartering både på land och i strandnära områden är idag en viktig tillämpning för avbildande lasersystem både civilt och militärt.

Takten på forskningsfronten är högst där sensorerna kan användas inom konsumentsegmentet, men det sker även forskning för militära tillämpningar. Hittills har få system blivit operativa, men utveckling sker kontinuerligt. Vi följer den militärt inriktade forskningen genom ett flertal internationella samarbeten.

4 Kunskapsspridning och samverkan

4.1 Kunskapsspridning

Mycket av kunskapsspridningen har skett genom den samverkan som beskrivs nedan. Kunskapsspridningen till Försvarsmakten och FMV finns översiktligt beskrivet i avsnitt 4.2. Projektet har även bidragit till två översiktsrapporter riktade till Försvarsmakten. Den ena behandlade hot och möjligheter med UAS [18] och den andra positionering och navigering med hjälp av sensordata [31].

Projektet har publicerat flera resultat i den vetenskapliga litteraturen i form av konferensbidrag och tidskriftsartiklar. Flera av konferensbidragen var inbjudna bidrag. Publikationerna från 2017 och stora delar av 2018 sammanfattades populärvetenskapligt i en kort rapport i slutet av 2018 riktad till Försvarsmakten och FMV för att ge en överblick av vad projektet har publicerat [32].

4.2 FM och FMV

Samverkan mellan forsknings- och teknikdelarna inom FoT har varit en förutsättning för den experimentella verksamheten inom projekten och har gett en god utväxling på investeringarna. Både 3D-FALKen och 3D-UAV:n har tagits fram i teknikuppdrag beställda av FMV. Inom Avbildande lasersensorer har utrustningen utnyttjats för att forska på möjligheter och begränsningar för tekniken vilket har gett ökad förståelse för vilka nya förmågor tekniken kan tillföra Försvarsmakten i framtiden.

Samverkansgruppen för laserfrågor (SAMLAS) är ett forum där representanter för Försvarsmakten, FMV och FOI möts en gång per kvartal för att sprida kunskap om behov och teknik inom laserområdet. Ett möte per år sker för att nå en bredare krets på förband. Under perioden har K3 i Karlsborg, Helikopterflottiljen på Malmen, FMTS i Halmstad och P7 i Revingehed besökts. Projektet har vid ett flertal tillfällen bidragit med presentationer.

Projektet har även samverkat med till exempel, Ing2 i Eksjö, MSS i Kvarn, MSS i Skövde, SSS i Karlskrona, för att diskutera och demonstrera förmågan som 3D avbildning med lidar ger i operativa tillämpningar. Flera av försöken i projektet har gjorts i samverkan med skolor och förband.

Kunskap från projektet har utnyttjats för expertstöd avseende möjligheterna till att använda aktiv avbildning med laser för långräckviddig spaning och övervakning. Ett antal presentationer om generella möjligheter med 3D-lidar har genomförts för olika grupper.

4.3 Universitet, högskolor och forskningsinstitut

Tillsammans med Sveriges Lantbruksuniversitet (SLU) i Umeå och Skogforsk har vi under perioden haft projektet *Personburen skogslidar* som påbörjades 2016 och pågick till 2019. FOI:s del har varit att utveckla teknik och signalbehandling för att kunna positionera och kartera träd i skogen [22–24]. Resultat finns redovisade i avsnitt 3.4.

Inom det strategiska forskningscentret Security Link har FOI ett samarbetsprojekt med Linköpings Universitet som direkt kopplar till Avbildande lasersystem. *Rörlig fotonräknande lidar för avbildning i 3D (RÖRLIG-3D)* undersökte hur data från fotonräknande lidar samtidigt kan utnyttjas för att skapa 3D-punktmoln och korrigera rörelsemodellen för plattformen, och därmed sänka kraven på plattformens positions- och vinkelsensorer när fotondetektioner från olika positioner ska läggas samman till ett punktmoln. Resultaten finns redovisade i avsnitt 3.4. Inom projektet genomfördes även två examensarbeten [27, 28]. Projektet pågick 2016–2019.

Projektet delfinansierar verksamhet inom samarbetsprojektet *Intelligent n-dimensional modeling by multidimensional sensor informatics for computer vision and visualization* som är ett så kallat plattformsprojekt inom innovationsinitiativet Visual Sweden, finansierat av Vinnova. Projektet som helhet undersöker hur data från flera sensorer kan kombineras för att få en bättre sammanlagd analys. FOI har bidragit med mätningar med 3D-UAV:n samt fältförsökskompetens. Projektet pågår 2019–2020.

Ytterligare ett examensarbete har påbörjats inom maskininlärning med så kallad djupinlärning (eng. deep learning) men detta är ännu inte slutfört.

4.4 Internationella samarbeten

4.4.1 NATO SET-RTG-205

Active EO Sensing for Target Identification and Tactical Applications NATO SET-RTG-205 pågick mellan 2014 och 2017. I gruppen ingick som aktiva parter USA (NVESD), Tyskland (Fraunhofer IOSB), Frankrike (ISL), Kanada (DRDC), UK (DSTL), Norge (FFI), Turkiet (TÜBİTAK) och Sverige (FOI). Portugal och Spanien var med i gruppen men deltog inte p.g.a. problem med finansiering. Gruppens målsättning var att utvärdera och jämföra olika system för aktiv avbildning och analysera deras förmåga att klara militärt satta krav på avbildning. Exempel på tillämpningar var målidentifiering av personer och fordon, spaning och övervakning, kartering och avbildning i dåliga ljusförhållanden. I gruppen delades också information om senaste utveckling av sensorer och de verktyg (programvara) som finns för att analysera sensordata. USA ledde gruppen och bidrog med verksamhet inom 3D-avbildande flash-sensorer. Tyskland och Kanada bidrog med grindad avbildning (GV) för aktiv 2D-avbildning och Tyskland även med vibrometri. Frankrike, UK, och Sverige bidrog med fotonräknande teknik. Norge och Kanada bidrog också med snabba, skannade lasersystem för 3D-avbildning. Alla nationer bidrog med metoder för sensordataanalys. Turkiet håller på att bygga upp sin verksamhet. Under maj 2016 genomfördes ett gemensamt fältförsök och under 2016 och 2017 delades sensordata mellan parterna och analyser genomfördes. Gruppens slutrapport publicerades för hösten 2019 [33].

Som en fortsättning på det avslutade projektet har ett nytt projekt förslagits med titeln *Active and Passive 3D EO/IR Sensing for Urban Operations* och det bereds för närvarande i ett s.k. Exploratory Team med numret SET-ET-108 där FOI är med. Beslut om en ny grupp ska startas kommer att tas under 2020.

4.4.2 NATO SET-RTG-219

Simulation of Active Imaging Systems NATO SET-RTG-219 pågick mellan 2014 och 2017. I gruppen ingår USA (NRL, NVESD), Tyskland (Fraunhofer IOSB), Frankrike (DGA), Kanada (DRDC), och Sverige (FOI). Gruppen behandlade och utvärderade olika typer av fysikaliska simuleringsmodeller för aktiv avbildning inkluderat 1D, 2D och 3D. Inriktningen var sensorernas prestanda i olika miljöer och för olika (typ)mål. Några teman var avbildning genom vegetation och turbulens. Genom NRL berördes turbulenseffekter för avbildning genom vatten. NRL är ett av få forskningsinstitut som utvecklat turbulensmodeller för undervattensavbildning och även experimentellt undersökt dessa turbulenseffekter. Både Tyskland och Frankrike har modeller (programvaror) som arbetar med fasskärms teknik. Båda har realiserat dessa med beräkningshjälp från grafikkort (CUDA NVIDIA), demonstrationer av den franska modellen har visat på mycket bra prestanda beräkningsmässigt. FOI bidrog i gruppen med vår egen simuleringsmodell LadarSIM, både med tillämpningar för linjär lidar och fotonräknande lidar (matrisdetektor respektive profilering). Gruppen utvärderade simuleringsmodellerna under olika förhållanden och arbetet utmynnade i en slutrapport som publicerades i slutet av 2018 [34].

Som en fortsättning på det avslutade projektet har ett nytt projekt förslagits med titeln *Simulation of Low Photon Lidar in Complex Environments* och det bereds för närvarande i ett s.k. Exploratory Team med numret SET-ET-112 där FOI är med. Beslut om en ny grupp ska startas kommer att tas under 2020.

4.4.3 INACHUS (EU)

Projektet har medfinansierat EU FP7-projektet *INACHUS – Fast rescue of disaster surviving victims: Simulation of and situation awareness during structural collapses including detection of survivors and survival spaces*. INACHUS (2015–2018) syftade till att hjälpa sök- och räddningspersonal hitta och lokalisera offer instängda i rasmassor t.ex. efter en jordbävning. Detta åstadkoms genom en kombination av kompletterande teknik för alltifrån övergripande lägesbild för att avgöra var insatser borde sättas in, nya kommunikations- och rapporteringssystem, till olika typer av kompletterande sensorer för detektion av livstecken från människor instängda i raserade byggnader.

En stor del av FOI:s forskning inom INACHUS handlade om utveckling av analysmetoder för data från 3D-avbildande lasersensorer, närmare bestämt tekniker och metoder för att robust och noggrant automatiskt kombinera data från flera olika 3D-mätningar över ett visst område, s.k. 3D-registrering. En svårighet, som var själva utgångspunkten i arbetet, är att det inte finns någon algoritm som presterar väl i alla typer av scener, och att det är väldigt svårt att på förhand veta vilken metod som ger bäst resultat i en given miljö. Därför utvecklade FOI en 3D-fusionsmotor som automatiskt provar olika algoritmer, värderar kvaliteten på resultatet och sedan registrerar ihop data med den kombination av tekniker som sammantaget bedömdes ge bäst resultat [35].

Scenarierna i INACHUS var typiskt anpassade för sök och räddning och innehöll därför huvudsakligen rasmassor eller halvt raserade byggnader, men de framtagna analysmetoderna är direkt tillämpbara även på data från militärt relevanta scenarion. Exempel på en sådan situation är ett antal lasersensorer som samtidigt avbildar ett terrängparti från olika håll för att tillsammans ge bästa möjliga sammantagna bild av området. Eftersom varje sensor på grund av skyl och hinder inte kan antas kunna observera hela scenen måste data från de olika sensorerna kunna registreras för att ge maximala förutsättningar för detektion och klassificering av eventuella mål i området.

Mätningar mot ett visst område ur olika betraktningssvinklar är en av nycklarna till att kunna upptäcka svårupptäckta, skydda mål och utvecklingen i INACHUS har således bidragit till att adressera frågeställningarna i *Avbildande lasersensorer*.

4.4.4 Bilateralt samarbete med dstl (Storbritannien)

2018 startade ett bilateralt samarbete med dstl i Storbritannien med titeln *Passive and active imaging under poor weather conditions, collaborative project no 63*. Verksamheten har finansierats via FMV-uppdraget ”Mätningar inom elop-området avseende väderprestanda”, beställning 416057-LB936582 och Avbildande lasersensorer.

Hittills inom projektet har ett fältförsök utförts vid FOI i Linköping (långtidsmätningar) avseende elektro-optiska (EO) sensorers prestanda i dåligt väder där även två fotonräkande system ingick. Ett gemensamt fältförsök mellan FOI och dstl har genomförts vid Malmens flygplats, Linköping, där en högupplösande IR-kamera och ett laserprofilometer-system användes för att upptäcka och klassificera/identifiera flygande mål. FOI har även varit inbjudna som observatörer till ett fältförsök i Porton Down i Storbritannien arrangerat av dstl där avbildning genom rök studerades med olika laserradarsensorer. Ett antal projektmöten med dstl genomförts inom det bilaterala samarbetsavtalet både i Storbritannien och i Sverige. Vid ett tillfälle anordnades en workshop inom området fotonräkning i anslutning till projektmötet samt studiebesök på Heriot-Watt University och Leonardo. Delar av verksamheten finns redovisade i en rapport [36]. I mars 2020 planeras ett vinterförsök i Sverige inom projektet där 3D-FALKen ska användas tillsammans med andra sensorer.

4.4.5 NATO von Kármán Horizon Scanning

Inom NATO har man skapat en ny typ av aktivitet som kallas *von Kármán Horizon Scanning* där grupper ska värdera olika typer kommande teknik utifrån NATO:s perspektiv och bedöma utvecklingstakten. Grupperna består av forskare, militärer och industri och jobbar under en relativt kort period. Resultatet och kvaliteten av dessa studier beror mycket på bakgrundskunskapen hos medlemmarna i studien. Det är svårt att få en fullständigt heltäckande studie med dessa begränsade resurser, men det är ett intressant sätt att snabbt få en överblick av ett forskningsområde och dess möjliga inverkan på militära förmågor i framtiden. Resultaten från studierna är en PowerPoint-presentation som tas fram med konsensus inom gruppen och som gruppmedlemmarna därefter kan presentera nationellt eller inom NATO. FOI har suttit med i två grupper som har koppling till Avbildande lasersensorer. Per Jonsson var med i gruppen som behandlade kvanttekniker (*Quantum Capability*) under 2018 och Markus Henriksson i gruppen om 3D-avbildning i det optiska området (*Optronic 3D Imaging Systems*) under 2018–2019.

Inom Quantum Capability behandlades fyra områden; PNT (positionering, navigering och tidreferens), kommunikation, sensorer och avbildning, där kvanttekniker kan förändra förutsättningarna i framtiden. Utvecklingen av kvantdatorer ingick inte i studien, men däremot deras möjliga inverkan på dagens teknik, t.ex. kryptering. När det gäller avbildning såg gruppen inga direkta hot eller möjligheter i närtid med helt nya tekniker utan främst diskuterades fotonräknande system liknande det vi använder i projektet. Studien har presenterats flera gånger för bl.a. FOI, FMV och den svenska försvarsindustrin under 2018 och 2019.

Inom Optronic 3D Imaging Systems började diskussionerna brett men smalnade sedan av till att endast behandla lidarsystem baserade på gångtidsmätningar (time-of-flight) med laserpulser. Gruppen identifierade fem exempel på tillämpningar där militär utveckling av lidarsystem behövs och kan tillföra stort mervärde: kartering, hinderdetektion, måligenkänning, 3D-avbildning för vapenstyrning samt eldledning. Studien har ännu inte presenterats nationellt men planen är att detta ska ske i början av 2020.

Inom det kommande FoT-projektet *Avbildande fotonräknande lasersystem* planerar vi att i början av 2020 summera lärdomarna inom området avbildande lasersensorer från dessa två von Kármán Horizon Scanning-studierna i en rapport riktad till Försvarsmakten och FMV.

4.4.6 cFLOW (EU)

Projektet *Coherent Ultrafast Long Wave Infrared Communication (cFLOW)* inom EU H2020 startade 2019 och planeras att pågå till 2022. cFLOW syftar till att utveckla nya elektro-optiska komponenter, specifikt kvantkaskadlasrar (QCL) och fotoniskt integrerade detektorer (QCD), för långvågs-IR-området (LWIR 8–12µm) med huvudsaklig tillämpning inom fri optisk kommunikation (FSO) [37].

Signalering i LWIR-bandet kan innebära en relativt stor fördel i termer av länkprestanda, till exempel tillgänglighet vid dålig sikt och dataöverföringskapacitet. Projektet utvecklar komponenter på en relativt grundläggande nivå. Framtagandet av unika komponenter med funktion vid rumstemperatur planeras dock leda till en demonstration av höghastighetskommunikation (20–100 Gbps) vilket skulle vara ett helt unikt resultat. Komponenterna som tas fram i cFLOW kan även tänkas bli användbara i andra tillämpningar av militärt intresse.

FOI deltar i projektet med följande ansvarsområden:

- systemutvärdering för LWIR FSO baserat på QCD och QCL komponenter som utvecklas i projektet
- studie av atmosfärskanalen i LWIR-bandet med jämförelser med andra våglängdsband
- rekommendera kommunikationslösningar baserat på tekniken

Under 2019 har arbetet med en systemutvärdering och studie av atmosfärskanalen påbörjats. FOI har också deltagit i två projektmöten. Motivet för FOI att delta i projektet är att kunskap om en ny komponentteknologi som på sikt kan medföra nya funktioner och förmågor i olika försvars- och säkerhetstillämpningar kan byggas upp. Deltagande ska betraktas som strategisk kunskapsuppbyggnad eftersom medverkande parter i cFLOW har mycket hög kompetens inom sina respektive områden.

5 Utblick mot framtiden

Det kommande projektet *Avbildande fotonräknande lasersensorer 2020–2022* planeras att innehålla fortsatt utveckling av det fotonräknade systemet och signalbehandlingen för att möjliggöra mätning med rörlig plattform samt utveckling för undervattensavbildning. Vi kommer också arbeta med utveckling av algoritmer för automatisk detektion i punktmoln.

Flera av fältförsöken genomförda under 2019 har ännu inte analyserats i detalj och data från dem kommer att utnyttjas för att ta fram bättre automatiska detektionsalgoritmer. Nya mätningar i nationellt intressanta miljöer, t.ex. under vinterförhållande, i dåligt väder etc., kommer att genomföras. Mer realistiska mätningar med systemet för undervattensavbildning planeras också.

Det är svårt att snabbt tolka 3D-data. Därför kommer det kommande projektet att utveckla signalbehandlingsmetoder som kan ge en operatör stöd och hjälp med tolkningen. Det långsiktiga målet är att ta fram automatiska metoder för måldetektion, målklassificering och måligenkänning, t.ex. baserade på maskininläring, som kan vara stöd för en operatör.

Kunskaperna från det upplyfta 3D-avbildande lasersensorsystemet kommer att utnyttjas och vidareutvecklas i andra projekt, t.ex. EU-projektet *INGENIOUS*.

Slutligen tror vi att 3D-avbildande lasersensorer kommer göra militär nytta inom kartering, måligenkänning och satellitfri navigering, för obemannade och autonoma system samt för övervakning av begränsade områden. Inget enskilt system kan lösa alla dessa uppgifter, utan olika systemtyper kommer krävas för olika uppgifter och olika typer av plattformar. För system med korta räckvidder går den civila utvecklingen idag mycket snabbt, vilket leder till miniatyrisering och sjunkande priser på komponenter och tillämpningar finns redan idag. För andra system krävs mer långsiktig forskning för att driva teknikutvecklingen framåt mot användbara tillämpningar. Ofta hamnar militära tillämpningar i den senare kategorin.

Referenser

Referenser markerade med **fet stil** har producerats helt eller delvis inom projektet *Avbildande lasersensorer*. Övriga referenser har producerats inom angränsande projekt på FOI och anses vara av intresse för området. De flesta referenserna finns på CD-bilagan till den tryckta rapporten.

1. Per Jonsson, Markus Henriksson, Gustav Tolt, Christina Grönwall, Michael Tulldahl, Fredrik Bissmarck, Patrik Lif, Lars Sjöqvist, Håkan Larsson, "Avbildande lasersensorer - Slutrapport för perioden 2014-2016", FOI-R--4346--SE, 2016.
2. **Patrik Lif, Fredrik Bissmarck, Gustav Tolt, Per Jonsson, "User performance for vehicle recognition in three-dimensional Point clouds," in D. de Waard, F. Di Nocera, D. Coelho, J. Edworthy, K. Brookhuis, F. Ferlazzo, T. Franke, and A. Toffetti (Eds.) *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Europe Chapter 2017 Annual Conference, Rome, Italy 2017*, pp. 127-140. FOI-S--5790--SE.**
3. **Per Jonsson, "Redovisning av milstolpe Slutseminarium 2019 för projektet Avbildande lasersensorer", FOI MEMO 6901, 2019.**
4. Lars Sjöqvist, Julia Hedborg, Markus Henriksson, Per Jonsson, "Fotonräknande 3D-laserkamera", FOI MEMO 5974, 2016.
5. Julia Hedborg, Markus Henriksson, Per Jonsson, "Utvärdering av fotonräknande matrisdetektor - handhavande och inledande mätningar", FOI-D--0753--SE, 2016.
6. Lars Sjöqvist, Lars Allard, Markus Henriksson, Per Jonsson, "Fotonräknande 3D laserkamera. Etapp II", FOI-D--0846--SE, 2018.
7. **Markus Henriksson, Per Jonsson, "Photon-counting panoramic three-dimensional imaging using a Geiger-mode avalanche photodiode array," *Optical Engineering*, vol. 57, p. 093104, 2018. FOI-S--5871--SE.**
8. **Per Jonsson, Michael Tulldahl, Julia Hedborg, Markus Henriksson, Lars Sjöqvist, "Experimental evaluation of penetration capabilities of a Geiger mode APD array laser radar system," *Proceedings of the SPIE*, vol. 10434, p. 1043405, 2017. FOI-S--5793--SE.**
9. **Markus Henriksson, Julia Hedborg, Per Jonsson, Lars Sjöqvist, "Panoramic 3D-Imaging Using Single-Photon Counting Laser Radar," in SET-241 9th Military Sensing Symposium, Quebec City, Canada, p. 11A-3-1-12, 2017. FOI-S--5683--SE.**
10. **Per Jonsson, Markus Henriksson, Lars Allard, Lars Sjöqvist, "Photon counting 3D camera range super-resolution," presented at the 6th workshop on Active Imaging at the French-German Research Institute of Saint-Louis (ISL), Saint-Louis, France, 2017. FOI-S--5794--SE.**
11. **Markus Henriksson, Lars Allard, Per Jonsson, "Photon Counting Panoramic 3D imaging," in *Imaging and Applied Optics 2018*, Orlando, Florida, 2018, p. SM3H.4 FOI-S--5858--SE.**
12. **Lars Sjöqvist, Markus Henriksson, Per Jonsson, "Single-photon counting 3D Geiger-mode laser radar imaging," in *Northern Optics & Photonics 2018*, Lund, Sweden, 2018, p. 54. FOI-S--5878--SE.**
13. **Markus Henriksson, Lars Allard, Per Jonsson, "Panoramic single-photon counting 3D lidar," *Proceeding of the SPIE*, vol. 10796, p. 1079606, 2018. FOI-S--5889--SE.**

14. Markus Henriksson, Lars Allard, Maria Axelsson, Gustav Tolt, Per Jonsson, Lars Sjöqvist, "Outdoor single-photon counting panoramic 3D imaging," *Proceeding of SPIE*, vol. 10978, p. 1097807, 2019, FOI-S--6042--SE.
15. Per Jonsson, Lars Allard, Maria Axelsson, Fredrik Bissmarck, Markus Henriksson, Mattias Rahm, Lars Sjöqvist, Gustav Tolt, "Outdoor 3D imaging with a photon counting system," presented at the *7th workshop on Active Imaging at the French-German Research Institute of Saint-Louis (ISL)*, Saint-Louis, France, 2019. FOI-S--6116--SE.
16. Michael Tulldahl, Jonas Nordlöf, Joakim Rydell, Linnéa Axelsson, Roland Lindell, Gustav Tolt, Christina Grönwall "Upplyft elektrooptiskt system - Realiserbarhetsstudie", FOI-D--0798--SE, 2017.
17. Michael Tulldahl, Joakim Rydell, Linnéa Axelsson, Roland Lindell, Pontus Köhler, Jonas Nordlöf, Ulf Söderman, "Upplyft elektrooptiskt system", FOI-D--0861--SE, 2019.
18. Christina Grönwall, Stefan Nilsson, David Bergström, Markus Henriksson, Per Jonsson, Dietmar Letalick, Fredrik Näsström, Joakim Rydell, Jan Svedin, Michael Tulldahl, "UAS ur ett sensorperspektiv", FOI Memo 6845, 2019.
19. Markus Henriksson, Per Jonsson, Lars Sjöqvist, Michael Tulldahl, "Laserbaserad 3D-avbildning under vatten - En studie om små fotonräknande lidarsystem för grunda vatten", FOI-R--4483--SE, 2017.
20. Gustav Tolt, Christina Grönwall, Markus Henriksson, "Peak detection approaches for time-correlated single-photon counting three-dimensional lidar systems," *Optical Engineering*, vol. 57(3), 031306, 2018. FOI-S--5829--SE.
21. Christina Grönwall, Joakim Rydell, Michael Tulldahl, Erik Zhang, Fredrik Bissmarck, Erika Bilock, "Two Imaging Systems for Positioning and Navigation", in *2017 Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems (RED-UAS)*, 2017, pp. 120-125. FOI-S--5755--SE.
22. Johan Holmgren, Michael Tulldahl, Jonas Nordlöf, Mattias Nyström, Kenneth Olofsson, Joakim Rydell, Erik Willén, "Estimation of Tree Position and Stem Diameter using Simultaneous Localization and Mapping with Data from a Backpack-Mounted Laser," presented at *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, p. 42, 2017. FOI-S--5819--SE.
23. Erik Willén, Jon Söderberg, Johan Holmgren, Michael Tulldahl, Jonas Nordlöf, Joakim Rydell, Johan Öhgren, "Demonstration av mobilt mätsystem för insamling av träddata – Arbetsrapport för Norrskogs- och Södras forskningsstiftelse", Arbetsrapport 992-2018, Skogforsk, 2018. FOI-S--5936--SE.
24. Michael Tulldahl, Joakim Rydell, Johan Holmgren, Jonas Nordlöf, Erik Willén, "Lidar-based positioning in forest environments," *Proceedings of the SPIE*, vol. 11160, p. 1116005, 2019. FOI-S--6109--SE.
25. Gustav Tolt, Christina Grönwall, Michael Tulldahl, Markus Henriksson, "Måligenkänning i data från fotonräknande lasersystem. Genomgång av litteratur och förslag på fortsatt arbete", FOI-R--4479--SE, 2018.
26. Maria Axelsson, "Literature survey of Deep Learning for 3D point clouds, Q2 2018," FOI MEMO 6672, 2019.
27. Mattias Mejerfalk, "Automatic Registration of Point Clouds Acquired by a Sweeping Single-Pixel TCSPC Lidar System," M.Sc. thesis, Teknisk- naturvetenskaplig fakultet, UPTec F 17028, Uppsala University, 2017. FOI-S--5728--SE.

28. Joakim Ekström, "3D Imaging Using Photon Counting Lidar on a Moving Platform," M.Sc. thesis s in Electrical Engineering, LiTH-ISY-EX--18/5182--SE, Linköping University, 2018. FOI-S--6020--SE.
29. Ove Steinvall, Per Jonsson, Lars Sjökvist, "Studie skugga", FOI-D--0828--SE, 2018.
30. Ove Steinvall, Lars Sjökvist, Per Jonsson, "Shadows in laser imaging and mapping," *Proceedings of the SPIE*, vol. 10796, p. 1079609, 2018. FOI-S--5872--SE.
31. **Karl-Göran Stenborg, Michael Tulldahl, Joakim Rydell, Jonas Nygårds, Fredrik Näsström, Jonas Nordlöf, "Positionering och navigering med sensordata", FOI MEMO 6917, 2019.**
32. **Per Jonsson, "Avbildande lasersensorer - FOI i den vetenskapliga litteraturen", FOI MEMO 6565, 2018.**
33. **Bradley W. Schilling Ed., "Active Electro-Optic Sensing for Target Identification and Tactical Applications," STO-TR-SET-205, NATO, 2019. FOI-SH--0258--SE.**
34. **Richard Espinola, Weilin Hou, Kimberly Erin Manser, Peter Lutzmann, Olivier Meyer, Guy Potvin, Endre Repasi, Ove Steinvall, Michael Tulldahl, Jose Perez, "Simulation of Active Imaging Systems," STO-TR-SET-219, NATO, 2019. FOI-S--6088--SE.**
35. **Report on performance for 3D data fusion process and WP4 trials" (Restricted). Leverabel inom projektet INACHUS, Grant Agreement FP7-SEC-2013-1 N. 607522, 2018.**
36. **Lars Sjökvist, Lars Allard, Markus Henriksson, Per Jonsson, Daniel Svedbrand, Thomas Svensson, Ove Steinvall, "Mätningar i det elektro-optiska området avseende väderprestanda", FOI MEMO H2016, 2018.**
37. <https://cflow-project.eu/>

Bilaga – Samverkande projekt

Tabell B1. Sammanställning av de projekt som projektet *Avbildande lasersensorer* har samverkat med. Projekten markerade med **fet stil** har *Avbildande lasersensorer* varit med och delfinansierat med lån av utrustning, arbetstid eller pengar.

Projektnamn	Period	Beställare
Laser i telekrigstillämpningar	2017–2019	Försvarmaktens samlingsbeställning
Avancerade spaningssensorer	2015–2017	Försvarmaktens samlingsbeställning
Avancerade spaningssensorer	2018–2020	Försvarmaktens samlingsbeställning
Intelligenta spaningsfunktioner	2016–2018	Försvarmaktens samlingsbeställning
AI för spaningssensorer	2019–2021	Försvarmaktens samlingsbeställning
Multisensorsystem för övervakning	2015–2017	Försvarmaktens samlingsbeställning
Autonom övervakning med samverkande sensorer	2018–2020	Försvarmaktens samlingsbeställning
Sensorer för fjärrspaning mot sjö- och luftmål	2015–2017	Försvarmaktens samlingsbeställning
Fotonräknande 3D-laserkamera	2016	FMV
Fotonräknande 3D-laserkamera etapp 2	2017–2018	FMV
Studie skugga	2018	FMV
Rörlig fotonräknande lidar för avbildning i 3D	2016–2019	Security Link
Personburen skogslidar	2016–2019	Skogforsk
Intelligent n-dimensional modeling by multidimensional sensor informatics for computer vision and visualization	2019–2020	Visual Sweden, Vinnova
INACHUS – Fast rescue of disaster surviving victims: Simulation ...	2015–2019	EU FP7
INGENIOUS - The First Responder (FR) of the Future ...	2019–2022	EU Horizon 2020
NATO SET-RTG-205 Active EO Sensing for Target identification and Tactical Applications	2014–2017	
NATO SET-RTG-219 Simulation of Active Imaging Systems	2014–2017	
cFLOW (EU)	2019–2022	EU Horizon 2020
NATO von Kármán Horizon Scanning on - Quantum Capability - Optronic 3D Imaging Systems	2018–2019	Internfinansierat/Anslag

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