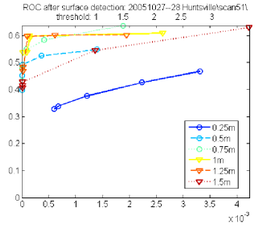
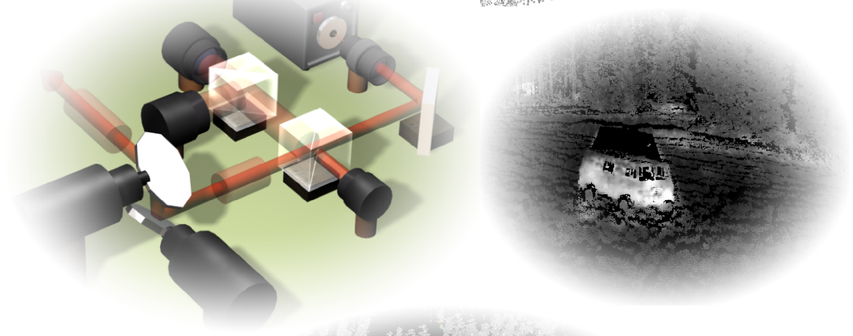
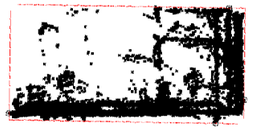
3D-avbildande laserradar i statiska miljöer

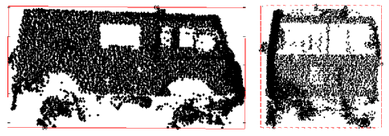
Slutrapport 2005-2007

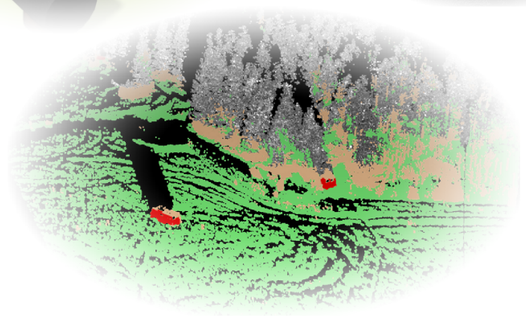
TOMAS CHEVALIER, CHRISTINA GRÖNWALL, FRANK GUSTAFSSON,
HÅKAN LARSSON, DIETMAR LETALICK, OVE STEINVALL, GUSTAV TOLT











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
Sensorsystem
Box 1165
581 11 Linköping

Tel: 013-37 80 00
Fax: 013-37 81 00

www.foi.se

FOI-R--2364--SE Användarrapport **Sensorsystem**
ISSN 1650-1942 December 2007

Tomas Chevalier, Christina Grönwall, Frank Gustafsson, Håkan Larsson, Dietmar Letalick, Ove Steinvall, Gustav Tolt

3D-avbildande laserradar i statiska miljöer

Slutrapport 2005-2007

Rapportnr/Report no	FOI-R--2364--SE
Rapporttyp Report Type	Användarrapport User report
Utgivningsår/Year	2007
Antal sidor/Pages	107 p
ISSN	ISSN 1650-1942
Kund/Customer	FM
Forskningsområde Programme area	4. Sensorer och signaturanpassning 4. Sensors and Low Observables
Delområde Subcategory	42 Sensorer 42 Above surface Surveillance, Target acquisition and Reconnaissance
Projektnr/Project no	E3080
Godkänd av/Approved by	Lena Klasén

Totalförsvarets Forskningsinstitut FOI

Avdelningen för Sensorsystem

Box 1165

581 11 Linköping

Innehållsförteckning

Sammanfattning 4

Summary 5

1 Inledning 6

1.1 Projektbeskrivning 6
1.2 Projektmål 7
1.3 Tillämpningar 7
1.4 Samverkan 9
1.5 Rapportöversikt 10
1.6 Förkortningar 11

2 Internationell utblick 12

2.1 Tillämpningar 12
2.2 System och teknologi 13
2.3 Signalbehandling 34

3 Marknaden 36

3.1 Kommersiellt tillgängliga system 37
3.2 Utvecklingen i Sverige, tillverkare, distributörer och användare 49
3.3 Framtida utveckling av laserradarsystem 49
3.4 FOIs nya laserskanner – High Performance 3-D Laser scanner 50

4 Mätningar och signalbehandling 51

4.1 Lasersystem 51
4.2 Mätningar 52
4.3 Signalbehandling 54

5 Fysikaliska och instrumentella gränser 60

6 Prestandautvärdering i militära tillämpningar 69

6.1 Scenariobeskrivning 69
6.2 Värderingsmetodik 70
6.3 Värderingsresultat 71
6.4 Aspekter på urban miljö 75
6.5 Typsystem/spelkort 76

7 Prestandabedömning i civila säkerhetstillämpningar 79

7.1 Stöd vid säkerhetsanalys 80
7.2 Avsökande sensorer 81
7.3 Spaningssensorer 82

8 Diskussion 84

8.1 Prestandavärdering 84
8.2 Marknadens utveckling 84

9 Publikationer 86

10 Referenser 88

Bilaga A. Mätningar 93

Sammanfattning

Denna rapport utgör slutrapporten för Försvarsmaktprojektet *Måligenkänning med högupplösande 3D-avbildande laserradar*, som pågått 2005-2007. Målet med projektet har varit att stödja försvarsmakten med kunskap inom området 3D-avbildande laserradar. Detta har gjorts genom att följa den internationella utvecklingen, delta i internationella samarbeten, samt genom att utveckla sådan kunskap att FOI fortsätter vara en intressant partner inom området.

I rapporten beskrivs olika tänkbara tillämpningarna för 3D-avbildande laserradar i statiska miljöer, med andra ord miljöer där inga snabba förändringar sker. Det internationella läget inom området beskrivs, såväl gällande teknik och system som signalbehandling. En bild av den kommersiella marknaden ges. Som en central del av projektet beskrivs även FOIs mätaktiviteter 2005-2007.

Ett mål med projektet har varit att genomföra en prestandavärdering av sensortypen för några tillämpningar. Fokus har varit att ta fram en värderingsmetodik som kan tillämpas även för kommande frågeställningar. Denna redovisas tillsammans med några exempel.

Som rapporten visar finns en stor potential för sensorn, för såväl militära som civila tillämpningar. Om man utnyttjar sensorns kapacitet finns möjligheter till förmågor som avståndsdiskriminering, robust måligenkänning, dygnsoberoende och högupplöst spaning på långa avstånd.

Nyckelord: 3D-laser, laserradar, aktiva sensorer, prestandavärdering, teknikutveckling, signalbehandling, måligenkänning

Summary

This report is the final report for the project *Target recognition with high resolution 3-D imaging laser radar*, that has been active 2005-2007. The aim has been to support the Swedish Armed Forces with knowledge in the field of 3-D laser radar. The work has included following the international development status, participate in international co-operations, and by developing knowledge for FOI to continue to be an internationally interesting partner in the field.

This report contains descriptions of many interesting 3-D laser radar applications. It gives a picture of the international status, as well the technology and system status as the signal processing status. A picture of the commercial market is given as well. As a central part of the project, the measurements activities 2005-2007 is also described.

One goal with the project has been to perform a performance evaluation for some applications. Focus has been to reach a methodology that can be applied for other applications even after this project. This is reported together with some examples.

The result from the project shows great potential for the sensor, as well for military applications as for civilian security applications. If you can exploit the sensor capacity, there are possibilities for range discrimination, robust recognition, daylight independence and high resolution surveillance, at long ranges. As well for military applications as for civilian security applications.

Keyword: 3-D laser, laser radar, active sensors, performance evaluation, technology status, signal processing, target recognition

1 Inledning

3D-avbildande laserradar är en aktiv optisk sensor som består av en laser som belysare och en mottagare som utöver reflektans även kan mäta avstånd i varje bildpunkt. Systemen kan vara skannande såväl som direkt bildalstrande.

Från början var de laserbaserade 3D-avbildande systemen både klumpiga och långsamma. Systemen var endast lämpade för labmiljö och det krävdes experter för att hantera dem. På senare år har storleken krympt, prestandan skjutit i höjden och det har blivit så enkelt att hantera systemen att man i många tillämpningar nu ser det som självklart att använda dessa system. De senaste åren har olika system baserade på 3D-avbildande laserradar även blivit allt mer kommersiellt tillgängliga. Detta gör området mycket viktigt att bevaka, eftersom vi härigenom står inför en snabb komponentutveckling samtidigt som priserna sjunker. Visserligen är prestandakraven på militära system mycket höga och precisionen en av de viktigaste parametrarna, men det anses allt viktigare att dra nytta av den civila utvecklingen även för militära tillämp-ningar. På så sätt hålls kostnaderna så låga som möjligt och produkterna hänger med i omvärldens teknikutveckling. Då blir det istället allt viktigare att prestandan analyseras, så att det blir känt var begränsningarna finns. Eftersom systemen kan användas till så känsliga ändamål som att identifiera främmande fordon får inte fel svar ges.

Denna rapport ger en bedömning av hur användbara 3D-avbildande laserbaserade system är för några olika tillämpningar. När arbetet startade fanns i princip ingen lösning på måligenkännings- och klassificeringsproblemet. Detta ledde till att en stor del av det bakomliggande arbetet har varit att ta fram måligenkännings- och klassificeringsalgoritmer som är tillräckligt robusta för att göra en bedömning av prestandan hos de kompletta systemen. Målet har dock varit att, för ett antal tillämpningar, värdera dessa system.

Arbetet har bedrivits inom försvarsmaktsprojektet *Måligenkänning med högupplösande 3D-avbildande laserradar* (2005-2007), vilket beskrivs mer i detalj nedan.

1.1 Projektbeskrivning

Försvarsmaktsprojektet *Måligenkänning med högupplösande 3D-avbildande laserradar* (inom FoT Sensorer och Signaturanpassning) startade 2005 och har under sina tre år undersökt prestandan hos de nu tillgängliga laserradarsystemen och hur väl man kan utnyttja data från systemen för bland annat klassificering och identifiering. Dessutom har prognoser av framtida systems prestanda och användningsområden gjorts.

Även om sensortypen med fördel kan användas i en rad olika tillämpningar så har projektets fokus varit avgränsat. De tillämpningarna som i störst omfattning har undersökts har varit *måligenkänning* i *högupplösta 3D-data*, främst av fordon, dels placerade bakom *kamouflage* och *vegetation*, och i viss omfattning även placerade i *urban miljö*.

Utöver detta har kunskap från detta projekt använts i en lång rad angränsande, i många fall mer tillämpade projekt, såsom SEMARK (Sensorsystem för markläge), MOMS (Multi-optisk minspaning), SUPREM (Svårupptäckt precisionsmålsökare), IVS (Intelligenta verkanssystem), Sensorsystem för urban miljö, Omvärldsmodellering och IS-MS (Informationssystem - markspaning).

Följande aktivitetslista visar bredden på verksamheten inom projektet:

- Analysera och dra slutsatser om systemprestanda ur de stora datamängder som har samlats in under flera fältförsök
- Utvärdera metoder för signalanalys på 3D-data. Fokus ligger på segmentering och måligenkänning.
- Förfina sensormodeller för värdering av laserradarsystem, bland annat i internationellt samverkan.
- Bevaka sensorutvecklingen i omvärlden, genom deltagande i flera NATO-grupper, internationella samarbeten och vetenskapliga konferenser.
- Delta i och arrangera fältförsök, bland annat genom projektsamarbete med SEMARK och MOMS samt internationella samarbeten.
- Vidmakthålla och utveckla kunskap inom koherent laserradarteknik och Grindad Avbildning, bl.a. i samarbete med FGAN (Tyskland) och NATO.
- Värdera teknik för måligenkänning på långa håll genom avståndsprofilering. Arbetet sker inom ramen för avtalsbunden samverkan med TNO (Holland) och DRDC (Kanada)

1.2 Projektmål

Den huvudsakliga målsättningen med projektet är att värdera 3D-avbildande lasersystem för spaning och måligenkänning.

Det direkta målet med projektet har varit att bygga upp kunskap och verktyg vid FOI för värdering av förmåga och prestanda hos 3D-avbildande laserradar, samt att i internationell samverkan öka kompetensen vid FOI beträffande främst upptäckt och identifiering av skylda, kamouflerade mål i terräng och urban miljö från högupplösta 3D-data. Inom området koherent laserradar ska FOI vidmakthålla och utveckla kunskap genom internationellt samarbete.

Som ett långsiktigt mål med verksamheten ska FOI stödja FM med att undersöka styrkan med 3-dimensionell laserradaravbildning för detektion, klassificering, måligenkänning, identifiering och visualisering. Detta uppnås främst genom utveckling av signalbehandling samt genom experimentella försök och modellering. Avsikten är att på sikt värdera tekniken för spaning, måligenkänning och precisionsinmätning för något materielsystem, t.ex. UAV.

1.3 Tillämpningar

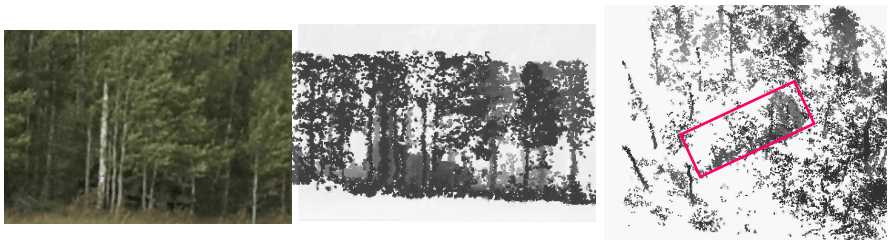
Här ges en sammanställning som beskriver de 3D-laserradartillämpningar som hittills studerats; spaning och måligenkänning, målsökning, kartering, navigering samt hinderindikering. Detta avsnitt beskrivs djupare i kapitel 2.

Spaning
Inom spaningsområdet finns en stor och bara delvis utnyttjad potential. Den nya förmågan som 3D-laser erbjuder är främst att erbjuda ”optisk” 3D-avbildning av mål som är delvis dolda, i kamouflage, bakom eld, i moln eller i vegetation. Sedan länge har även förmågan att se bättre under vatten utnyttjats både för flygburna system samt system på

AUV:er (autonoma obemannade undervattensfarkoster). Inom spaningsområdet är det naturligtvis önskvärt att kombinera laser med passiva elektrooptiska system t.ex. 3-5 eller 8-12 µm alternativt hyper- eller multispektrala sensorer. En annan intressant kombination är radar och laserradar där endast lite har gjorts hittills. Det finns även en stor delvis outnyttjad potential att förena aktiv spektral avbildning, 3D samt polarisation. Optikspaning kan ske för att upptäcka retroreflexer mm. Dopplereffekten kan eventuellt även utnyttjas för spaning. Flygburen minspaning över vatten används redan operativt. Yttäckningsförmågan vid spaning begränsas av lasereffekt och detektorkänslighet.

Måligenkänning

Inom området måligenkänning har laserradar en styrka som dokumenterats bl.a. för målsökartillämpningar. 3D-avbildning med hög upplösning för 100-200 pixlar på målet har visats ge god måligenkänning. Styrkan ligger bl.a. i att 3D-data kan vridas och matchas mot ett antal målmodeller i givna men inte alltför många vinklar, se Figur 1. Detta blir uppenbart även för en operatör, se bildexemplet i figuren. Om upplösningen är hög kan måligenkänningen ske på basis av en del av målet, t.ex. en motorhuv etc. Grindad avbildning, 2D eller 3D, är nära operativt införande i attackpodar, eldledningsinstrument samt på UGVer. System för full 3D-avbildning studeras på bredd för UAV, flygplan, UGV mm. Framtida intresse inkluderar mm-upplösning bl.a. för kropps- och ansiktsigenkänning.



Figur 1. Måligenkänning av mål efter vridning av 3D-punktmolnet. Bild FOI.

Målsökning

För målsökning har laserradar en stor fördel, nämligen robust måligenkänning och följning. 3D-data har visat sig ha en förstärkt förmåga till detta jämfört med data från motsvar-ande 2-dimensionella optiska sensorer. Ett stort antal projekt (främst i USA) studerar eller har studerat laserradar (LOCAAS, LAM, CMRTD m.fl.)

Taktisk kartering

För taktisk kartering har laserradar etablerats som en primär sensor. Förmågan att ge mycket hög upplösning i x,y,z (cm nivå) medför att mycket realistiska syntetiska omgivningar kan skapas över ett område. Fusion mellan passiva optiska sensorer samt syntetiskt aperturradar (SAR) från satellit eller flyg blir viktig för att få ökad realism. Viktiga aspekter för taktisk användning är hög yttäckningshastighet kombinerad med hög samplingstäthet samt att i kritiska fall ha förmåga att flyga på hög höjd (1-6 km) för att undgå bekämpning. Den civila karteringsmarknaden är stor och på den militära sidan studeras området intensivt. Målet är att öka yttäckningshastigheten med bibehållande av den höga upplösningen. Sensorerna blir sannolikt mindre och kan så småningom bäras även av mindre UAV:er. Taktisk kartering är direkt länkad till navigeringsmöjligheten.

Navigering

Laserradar kan användas på flera sätt, t.ex. för terrängnavigering via 3D-kartbild, för omvärldsnavigering, där laserradar tillsammans med andra sensorer ser och tolkar omgivningen samt orienterar sig därefter, och för yttre inmätning av plattformen. Terrängnavigering är etablerat med användning av radarhöjdmätare. Tekniken har även

använts med laserprofilometer. En avbildande 3D-laserradar ger naturligtvis bättre prestanda p.g.a. högre upplösning. Omvärldsnavigering börjar bli alltmer populärt och 3D-avbildande laserradar prövas bl.a. för inomhusbruk. Yttre inmätning kräver målföljning och torde vara av mindre intresse.

Hinderindikering
Hinderindikering för flygande plattformar, speciellt UAVer, blir viktigt, såväl för att undvika kollisioner med andra plattformar som för att undvika högspänningsledningar etc.. På detta område tillför lasern förmågan till avståndsdiskriminering samt ofta goda förmåga att detektera hinder (vajrar, diken etc.). Operativa laserbaserade system för hinderindikering finns på helikoptrar (det tyska Hellas m.fl.). Även system för UGV och UAV finns utvecklade. Liksom för kartering är utmaningen stor täckning, tät sampling och snabb uppdatering.

1.4 Samverkan

I detta avsnitt beskrivs vilka kontakter projektet har haft inom FOI, med universitet och högskolor samt internationellt.

En viktig avsikt med projektet har varit att stödja mer tillämpade projekt med kunskap om och erfarenhet av 3D-avbildande lasersystem. Därför har en tät kontakt med en rad projekt upprätthållits, se listan nedan:

- SEMARK (Sensorsystem för markläge). En sensorsimuleringsmodell som tagits fram inom 3D-laser har vidareutvecklats och anpassats för SEMARKs scenario-verktyg.
- MOMS (Multi-optisk minspaning). Många gemensamma metoder för att analysera 3D-data har utbytts mellan projekten. Frågeställningarna liknar varandra även om skalan är helt olika.
- SUPREM (Svårupptäckt precisionsmålsökare). En enkel prestandaprediktions-modell har tagits fram inom SUPREM.
- IVS (Intelligenta verkanssystem). Sensorsimuleringsmodellen inom 3D-laser har anpassats för att stödja IVS med simulerade laserdata.
- Sensorsystem för urban miljö. Vid spel inom andra projekt har kunskap och erfarenheter från 3D-laser-projektet kunna användas vid framtagande och utvärdering av olika spelkort.
- Omvärldsmodellering. Metoder för kartering ligger nära metoder för måligen-känning, så stor symbios har uppstått.
- MuHS (Multi- och Hyperspektral Spaning). Eftersom intresset att kombinera sensorinformation är stort pågår gemensamma försök inom detta område. Delar av arbetet är redovisas i [6, 9, 12, 37].

På universitetssidan har kontakterna bland annat bestått i att en projektmedarbetare doktorerat, ansluten till reglerteknikgruppen inom ISY vid Linköpings universitet [1]. Ett antal rapporter, tidskrifter och konferensbidrag har universitets-medarbetare som medförfattare [4, 5, 11, 14, 15, 23]. Dessutom har viss informell kontakt skett med bildkodningsgruppen vid ISY inom 3D-signalbehandling och sensorutveckling. Även internationellt har utbytet varit omfattande genom de goda kontakter som utvecklats mellan svenska och utländska forskare inom området.

Följande avtalsbundna internationella samarbeten har på olika sätt berört projektet:

- NATO SET-077 RTG-45; *N-Dimensional Eye Safe LADAR Imaging (N-DELI).* Gruppen undersöker olika 3D-avbildande ladar-(laserradar)-system. Gruppen pågår 2005-2007.
- NATO SET-132/RTG-72; *Imaging LADAR Technology and Algorithms for Tactical Applications*. Gruppen undersöker algoritmer och metoder som en fortsättning på SET-077/RTG-45. Pågår 2007-2010.
- NATO SET-072/RTG-40; *Modelling of Active EO-Imaging Systems.* Gruppen undersöker modellering av aktiva optiska system. Gruppen pågår 2005-2007. Fortsättning 2007-2010 följer med beteckning NATO SET-055/RTG-40.
- Trilateralt samarbete Kanada/Nederländerna/Sverige; *Automatic Target Recognition Using High Range Resolution Laser Radar.* Gruppen undersöker hur man kan använda avståndsprofiler för måligenkänning. Hela kedjan täcks med allt emellan mätningar, simuleringar och ATR-metoder.
- Bilateralt samarbete med AFRL, Sensors Directorate, Dayton, Ohio. Inom 3D-avbildande lasersystem har FOI Sensorsystem mycket goda kontakter med Wright Patterson Research Laboratory på AFRL. Under 2007 uppgraderades informationsutbytesavtalet till ett projektavtal. AFRL har ett mycket intressant state-of-the-art mätsystem och FOI bidrar med stor kompetens inom modellering och signalbehandling.
- Bilateralt samarbetsavtal med FGAN/FOM. Samarbetet handlar om grindad avbildning och kartering, och berör endast till liten del detta projekt.

1.5 Rapportöversikt

Först, i kapitel 2, kommer en översikt över olika *tillämpningar* och aspekter på användbarheten i dessa, och en diskussion om prestandagränser. I kapitel 3 ges en *internationell utblick*, en bild av forskningsläget i världen, genom att beskriva ett antal beskrivningar av system och projekt som presenterats på konferenser och möten. Detta följs av kapitel 4 som beskriver *marknaden*, genom att visa tillgängliga produkter inom många olika nischer. I kapitel 5 beskrivs alla *mätningar* som genomförts under projektets tre år. Även ett urval av signalbehandlingsmetoder som testats under åren presenteras. I kapitel 6 presenteras en *prestandavärdering för militära tillämpningar*. Avsnittet fokuserar på metodiken för värderingen och denna exemplifieras för några scenarier. Sedan följer kapitel 7 som innehåller en *prestandabedömning av civila säkerhetstillämpningar*. I resonemangsform beskrivs ett antal tillämpningar där 3D-avbildande lasersystem skulle tillföra marknaden ökad prestanda. Rapporten avslutas med kapitel 8, som innehåller en sammanfattande *diskussion*, och kapitel 9, som redovisar de *publikationer*; rapporter, artiklar och konferensbidrag, samt den doktorsavhandling, som tillkommit genom projektet.

1.6 Förkortningar

3D	3-dimensionell
Ladar/lidar/laserradar	Avståndsmätande lasersystem
ms / μs / ns / ps / fs	10^{-3}, 10^{-6}, 10^{-9}, 10^{-12}, 10^{-15} sek
ATR	Automatic Target Recognition
CW	Continuous Wave; Fas- eller frekvensbaserad mätning
CMM	Coordinate Measuring Machine
DEM	Digital Elevation Maps
DMI	Distance Meter Indicator
EBAPS	Electron Bombarded Active Pixel Sensor
EDA	European Defence Agency
EO	Electro Optical; Elektrooptisk
FMCW	Frequency Modulated Continuous Wave
FPA	Focal Plane Array; Fokalplansmatriser
GAPD	Geigermode Avalanche Photodiodes
GV	Gated Viewing; Grindad Avbildning
INS	Inertial Navigation System; Tröghetsnavigeringssystem
IRST	InfraRed Search and Track
JIGSAW / ALIRT / PILAR / LOCAAS / LAM / CMRTD /	
/ RAIDER / SALTI	Exempel på amerikanska laserradar-program
LO	Local Oscillator
MCP	Micro-Channel Plate
NIR / SWIR / MWIR	Near/ShortWave/MidWave InfraRed
OPO	Optical Parametric Oscillator
prf	Pulsrepetitionsfrekvens
ROIC	Read Out Integrated Circuit
SAR / SAL	Synthetic Aperture Radar / Lidar
SPAD	Single Photon Avalanche Detector
TCSPC	Time Correlated Single Photon Counting
TLS	Terrestrial Laser Scanning; Markbunden laserskanning
TOF	Time Of Flight
UAV / UGV / AUV	Obemannade luft-/mark-/undervattensfarkoster

2 Internationell utblick

I detta kapitel redovisas först en sammanställning av tänkbara tillämpningar och kommentarer om lämpligheten att använda 3D-avbildande laserradar för dessa. Informationen är hämtad från projektets internationella kontakter och samarbeten, genom deltagande i konferenser, arbetsmöten, workshops, och gemensamma fältförsök. Därefter ges en mer detaljerad bild av utvecklingsläget ur ett internationellt perspektiv.

2.1 Tillämpningar

De 3D-laserradartillämpningar som hittills studerats har varit spaning och måligenkänning, målsökning, kartering, hinderindikering samt navigering. I tabellen ges en översikt och sammanfattning av laserradarns egenskaper/förmågor och potential visavi status för dessa tillämpningar.

Tillämpning	Speciell förmåga	Kommentar
Spaning	”Se igenom” via tids-(avstånds)-diskriminering. Upptäcka speciella signaturer via aktiv spektral avbildning, polarisation. Optikspaning via retroreflex mm. Dopplereffekten kan ev. även utnyttjas för spaning.	Se igenom tät vegetation, moln, rök, vatten och eld har demonstrerats. Bl.a. finns operativa system för undervattensbruk. Yttäckningsförmågan vid spaning begränsas av lasereffekt och detektorkänslighet. Med enkelfotonkänsliga system bedöms 10-100 MPixel/sek som full realistiskt idag. För ett pixelavstånd/fotavtryck på 10×10 cm^2 ger detta minst 360 km^2/h. Flygburen minspaning över vatten används redan operativt.
Mål-igenkänning	3D-avbildning med hög upplösning för 100-200 pixlar på målet har visat sig ge god måligenkänning.	Grindad avbildning, 2D eller 3D, är nära operativt införande i attackpodar, eldledningsinstrument samt på UGVer. System för fulla 3D-avbildning studeras på bredd för UAV, flygplan, UGV mm. Framtida intresse inkluderar mm-upplösning bl.a. för kropps- och ansiktsigenkänning.
Målsökning	Laserradarns förmåga att ge robust måligenkänning och följning.	Ett stort antal projekt (främst i USA) studerar eller har studerat laserradar (LOCAAS, LAM, CMRTD m.fl.)
Kartering	Laserradar ger mycket hög upplösning / noggrannhet (< 10 cm) i x,y,z.	Stor civil marknad. På den militära sidan studeras detta intensivt. Målet att öka yttäcknings-hastigheten med bibehållande av den höga upplösningen. Sensorerna blir sannolikt mindre och kunna bäras även av mindre UAV:er.
Hinder-indikering	Laserns förmåga till avståndsdiskriminering samt ofta goda förmåga att detektera hinder (vajrar, diken etc.).	System för UGV och UAV finns utvecklade liksom system för helikopter.
Navigering	Laserradar kan användas på flera sätt: 1) Terrängnavigering via 3D-kartbild. 2) Omvärldsnavigering, laserradar tillsammans med andra sensorer ser och tolkar omgivningen samt orienterar sig därefter. 3) Yttre inmätning av plattformen.	Terrängnavigering är etablerat med användning av radarhöjdmätare. Tekniken har även använts med laserprofilometer. En avbildande 3D-laserradar ger naturligtvis bättre prestanda p.g.a. högre upplösning. Omvärldsnavigering börjar bli alltmer populärt och 3D-avbildande laserradar prövas b.la. för inomhusbruk. Yttre inmätning kräver målföljning och torde vara av mindre intresse.

Inom spaningsområdet finns en stor och bara delvis utnyttjad potential. Den nya förmågan som 3D-laser erbjuder är främst att erbjuda ”optisk” 3D-avbildning av mål som är delvis dolda, i kamouflage, bakom eld, i moln eller i vegetation. Sedan länge har även förmågan att se bättre under vatten utnyttjats både för flygburna system samt system på AUV:er (obemannade undervattensfarkoster). Inom spaningsområdet är det naturligtvis önskvärt att kombinera laser med passiva elektrooptiska system t.ex. 3-5 eller 8-12 µm alternativt hyper- eller multispektrala lösningar. En annan intressant kombination är radar och laserradar där lite har gjorts hittills. Det finns även en stor delvis outnyttjad potential att förena aktiv spektral avbildning, 3D samt polarisation.

Inom området måligenkänning har laserradar en styrka som dokumenterats bl.a. för målsökartillämpningar. Styrkan ligger bl.a. i att 3D-data kan vridas och matchas mot ett antal målmodeller i givna men inte alltför många vinklar, se Figur 2. Detta blir uppenbart även för en operatör, se bildexemplet i figuren. Om upplösningen är hög kan måligenkänningen ske på basis av en del av målet, t.ex. en motorhuv etc.

Figur 2. Måligenkänning av mål efter vridning av 3D-punktmolnet. Bild FOI.

För målsökning har laserradar en stor fördel, nämligen robust måligenkänning och följning. 3D-data har visat sig ha en förstärkt förmåga till detta jämfört med data från motsvarande 2-dimensionella optiska sensorer. För målsökning kan ladar med fördel användas för terräng- eller omvärldsnavigering.

För taktisk kartering har laserradar etablerats som en primär sensor. Förmågan att ge mycket hög upplösning i x,y,z (cm nivå) medför att mycket realistiska syntetiska omgivningar kan skapas över ett område. Fusion mellan passiva optiska sensorer samt syntetiskt aperturradar (SAR) från satellit eller flyg blir viktig för att få ökad realism. Viktiga aspekter för taktisk användning är hög yttäcknings-hastighet parad med hög samplingstäthet samt att i kritiska fall ha förmåga att flyga på hög höjd (1-6 km) för att undgå bekämpning. Taktisk kartering är direkt länkad till navigeringsmöjligheten.

Hinderindikering för flygande plattformar, speciellt UAVer blir viktigt, såväl för att undvika kollisioner med andra plattformar som för att undvika högspänningsledningar etc.. Operativa system för hinderindikering finns på helikoptrar (det tyska Hellas m.fl.). Liksom för kartering är utmaningen stor täckning, tät sampling och snabb uppdatering. För detta kommer matrisdetektorer att vara nödvändiga. Idag har 3D-matriser med storlek 320×256 tillverkats. Med en utenergi av 0,1 µJ per pixel kommer en total pulsenergi av endast 8 mJ att behövas för att få ekon på km avstånd. Konventionella avståndsmätarlasrar med utenergi kring 10 mJ kan göras kompakta och drivas med hög prf (pulsrepetitionsfrekvens). Fiberlasrar inklusive fiberförstärkare kan drivas i tiotals kHz med utenergier kring 100 µJ.

2.2 System och teknologi

Utvecklingen inom 3D-laserområdet har bevakats och senaste status på utvecklingfronten ges i detta avsnitt. Tidigare lägesrapporter på denna front är exempelvis [8]. Vi

har under 2007 informerat om FOI verksamhet bl.a. genom medverkan i SPIE-konferenser (Florens sept. 2007, Orlando april 2007) samt genom ett inbjudet föredrag [19] vid 14th Bi-Annual Coherent Laser Radar Conference (Snowmass, Colorado, July 8-13, 2007). Vidare har föredrag redovisats i den nationella Flygteknikkonferensen [26] i oktober 2007 samt inom EDA i samband med planering av projektet DUCAS [35] (***D**etection in **U**rban scenario using **C**ombined **A**irborne imaging **S**ensors*). Utvecklingstrender inom ladarområdet har även redovisats vid ett avdelningsseminarium [36].

Några trender inom ladarutvecklingen redovisas nedan. Förutom de tre första avsnitten (2.2.1-2.2.3) där informationen kommer från olika NATO-möten bygger framställningen till stora delar på föredrag vid nämnda konferenser. Inom teknologiområdet märks intressant utveckling inom laser och detektorområdet liksom nya principer for 3D-avbildning utnyttjande våglängdsdiversitet. Inom systemområdet märks stora framsteg inom syntetisk aperturlidar (SAL), multifunktionssystem samt multiaperturssystem.

2.2.1 Fiberoptisk laserradar

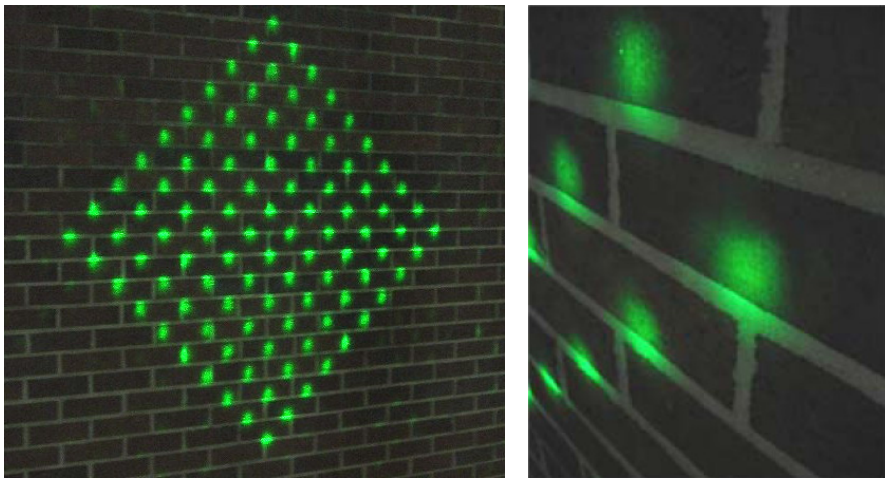
Vid NVESD[1] arbetar man med utveckling av fiberoptiska laserradarsystem. En genomgående trend är ögonsäkerhet och kompakthet. Den tekniska utvecklingen inom laserområdet har lett till laserkällor baserade på fiberoptik med hög pulsrepetitionsfrekvens och hög medeleffekt.

Ett annat koncept man arbetar på vid NVESD är miniatyrisering av korträckviddiga skannande laserradarsystem. Här har man tagit fram ett fiberbaserat system, primärt avsett för styrning av UGV.

2.2.2 Sigma

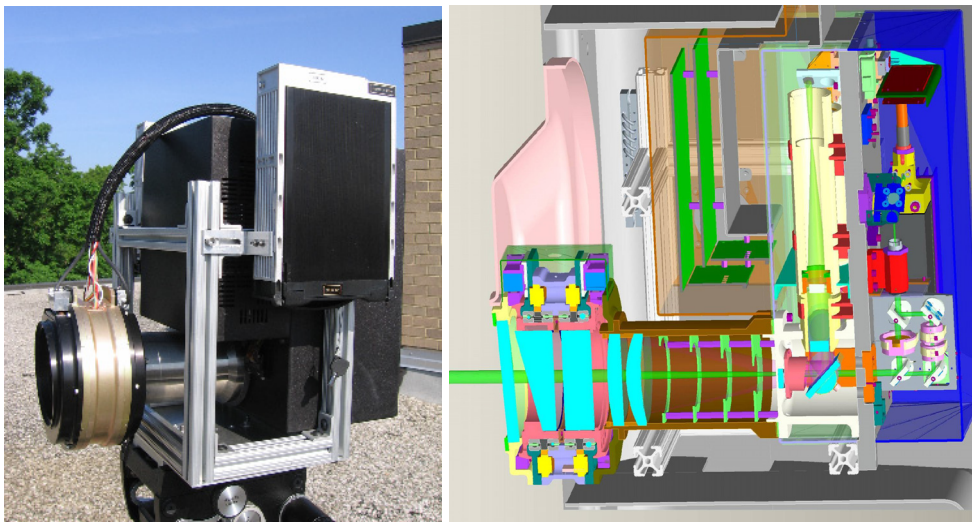
En intressant 3D-avbildande laserradar baserad på fotonräkning har utvecklats inom ett SBIR-projekt som genomförts av Sigma Space Corporation [44]. Tillämpningen är avbildande laserradar monterad på en UAV med ~1 km flyghöjd. Projektet byggde vidare på en tidigare utveckling för NASA av *Microlaser altimeter* samt projektet *Coastal Area Tactical-mapping System* (CATS) vid University of Florida. Sändarlasern är en frekvensdubblad passivt Q-switchad mikrochiplaser med en pulsenergi på 6 μJ vid 20 kHz PRF. Med ett diffraktivt optiskt element (DOE) delas den utgående laserstrålen upp i 10×10 delstrålar, vardera med ~50 nJ pulsenergi, se Figur 3. Mottagaren var en MCP(Micro-channel plate)-fotomultiplikator med segmenterad anod (10×10 segment) från Hamamatsu (typ R4110U-74-M100B) [45]. Fotokatoden i GaAsP har 32-40 % kvant-verkningsgrad. Tidsupplösningen är ±92 ps (stigtid 170 ps), vilket motsvarar en av-ståndsnoggrannhet på ±1,4 cm. Dessutom har PMT:n ingen dödtid, vilket gör att hög avståndsupplösning kan uppnås, ca 30 cm (beroende på dödtid i förstärkare och kom-parator). Mörker anges till ~30 kHz (samtliga anoder).

[1] U.S. Army Research, Development and Engineering Command (RDECOM) Communications and Electronics Research, Development and Engineering Center (CERDEC) Night Vision and Electronic Sensors Directorate (NVESD); Fort Belvoir, VA, USA.

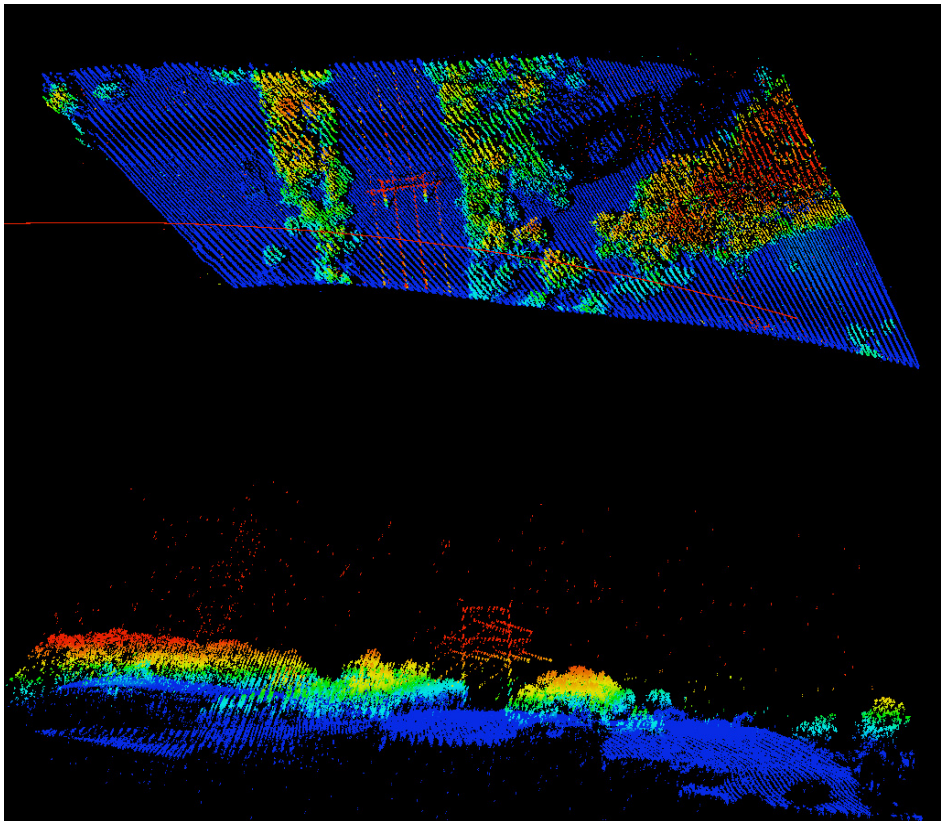


Figur 3. De utsända delstrålarna på 265 m avstånd från laserradarn i ett 10×10-mönster, format med ett diffraktivt optiskt element [46].

Bildfältet (10×10 pixlar) kan dessutom skannas med en Risleyskanner (kilskanner). Pixeltakten är 2 Mpixel/s. Systemet väger ca 25 kg, se Figur 4. Första flygningen genomfördes i augusti 2007. Ett bildexempel visas i Figur 5. Med Risleyskannern erhålls ett linjärt skann 45° mot flygriktningen, d.v.s. diagonala stråk ”målas” upp på marken.



Figur 4. 3D-avbildande fotonräknande laserradar från Sigma Space Corporation, här på ett markstativ.



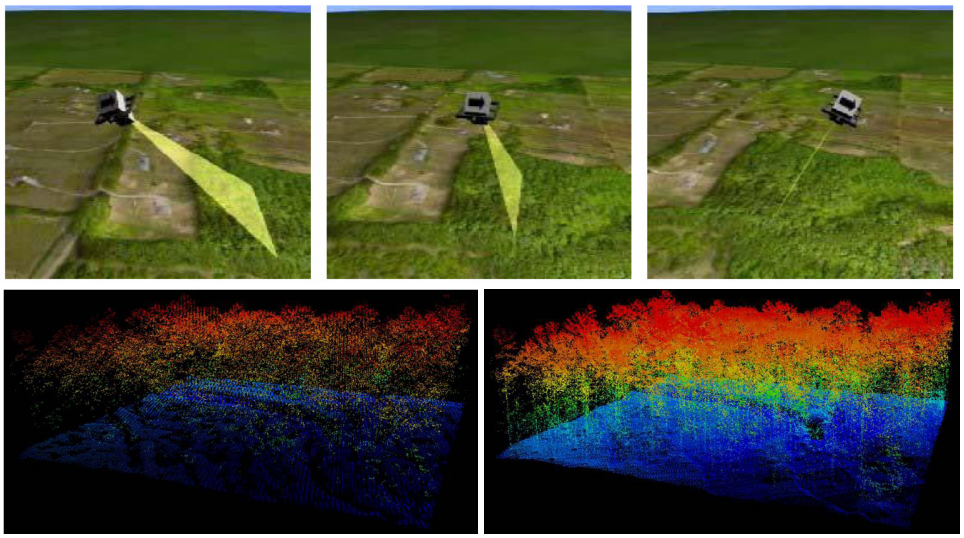
Figur 5. Bildexempel från en testflygning med den fotonräknande laserradarn från Sigma Space Corp. [44].

2.2.3 Koherent 3-frekvenslaserradar

En intressant teknik för att med koherent laserradar möjliggöra vibrometri på snabba objekt (flygplan) Utvecklas vid FGAN i Tyskland. Syftet är att kunna följa snabba mål och filtrera bort Dopplerskiftet för att kunna studera vibrationsspektrum för klassificering. Den valda lösningen är ett heterodynsystem med tre frekvenser (två utsända och en mottagen). De utsända frekvenserna (40 MHz resp. 41 MHz) genereras med en akusto-optisk modulator. Tack vare den finurliga lösningen i mottagaren kan man enkelt få tre signaler ut från systemet; målföljning, makro-Doppler (hastighet) och mikro-Doppler (vibration) efter FM-demodulering. Genom att bättre anpassa den elektriska bandbredden på mottagaren kan räckviddsprestanda förbättras jämfört med ett konventionellt heterodynsystem (för i övrigt samma optiska systemparametrar). Förbättringen i räckvidd kan ligga på omkring 20 %.

2.2.4 SPIE Defense and Security, Orlando

Michael Roth från John Hopkins University presenterade ett intressant föredrag [47] om vegetationspenetration med konventionell lidar (Optech) och multipla vyer. Detta åstadkoms genom att placera transceivern i en gimbal. Figur 6 visar konceptet. Genom att betrakta ett delområde under flygplanet, som flög på 6000 ft höjd kan exempelvis 100×100 m^2 skannas 22 ggr för att ge multipla vyer, se Figur 6.



Figur 6. Illustration av 3 multipla vyer över samma område som erhålls genom att lidarsändaren / mottagaren placeras i en gimbal. Under visas skillnad i marktäckning mellan ett skann och multipla (ca 7 ggr tätare t.h.).

Stann et al. [48] från ARL (Army Research Labs USA) har under ett flertal år utvecklat avstånds- och Dopplerkännande ladarsystem baserade på ”chirpad” amplitudmodulation. Man använder optisk direktdetektion med blandning och koherent detektion i den modulerande mikrovågssignalen. Genom att använda sig av Intevacs (SWIR) Electron Bombarded Active Pixel Sensor (EBAPS) kan man förena avstånds- och Dopplertracking på långt avstånd (10 km) och avbildning på närmare håll (2-3 km). Tillämpningen uppgavs vara att skydda fartyg mot kryssningsrobotar samt andra hot som sprängämnesfyllda småbåtar etc. Systemet var inte utprövat ännu. Man byggde även ett system för FOPEN tillämpningar (Foliage penetration).

Ball Aerospace & Technologies Corporation (BATC) [49] rapporterade om en flash lidar baserad på Advanced Scientific’s detektor, se Avsnitt 4.1. Systemet ingick i studier av en lidar för månlandning. Räckvidden skulle vara 20 km. Matrisstorleken var 128×128 element.

Heidelmeyer et al. [50] jämförde SAR och lidar för skapande av DEM för flygsäkerhet (DEM=Digital Elevation Maps). Ananth K.Vadlamani et al. [51] jämförde enkelpixel lidar med flash lidar för terräng-navigering. Systemet skulle kunna ersätta eller komplettera GPS. Meternoggrannhet eller bättre kan uppnås. Analysen baserades delvis på syntetiska data. Maarten Uijt de Haag et al. [52] analyserade användning av flash 3D-ladar för navigering i städer samt inomhus. Man anser att mm-precision i position och mrad-precision i attityd kan uppnås med dagens 3D-FPA-teknologi.

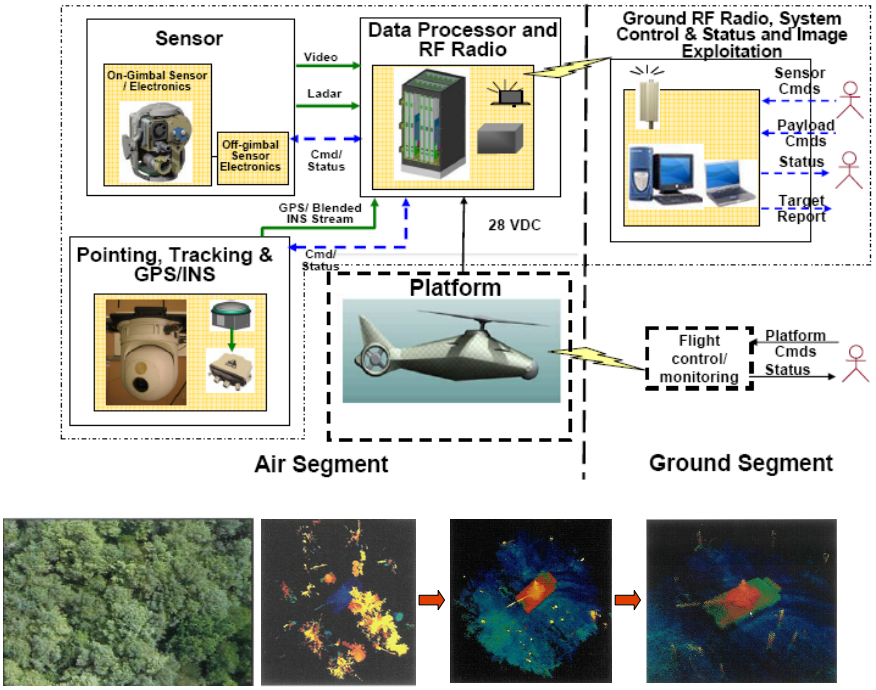
NIST (US National Institute of Standards) har bildat en kommitté [53] för att standardisera 3D-avbildande system eftersom dessa alltmer finner användning i industrin och fjärranalys.

The Advanced Measurements Optical Range (AMOR) [54] har en nästan 30-årig historia av att mäta och prova ladarsystem för BMDO (Ballsitic Missile Defence Office). Vid AMOR har mätts ladarsignaturer hos robotar, skenmål och satelliter.

Geigermode Avalanche Photodiodes (GAPDs) blir alltmer intressanta för 3D-avbildning på grund av deras känslighet (fotonräkning) samt deras goda avståndsupplösning och noggrannhet. GAPD’s används bl.a. i JIGSAW och ALIRT, två intressanta

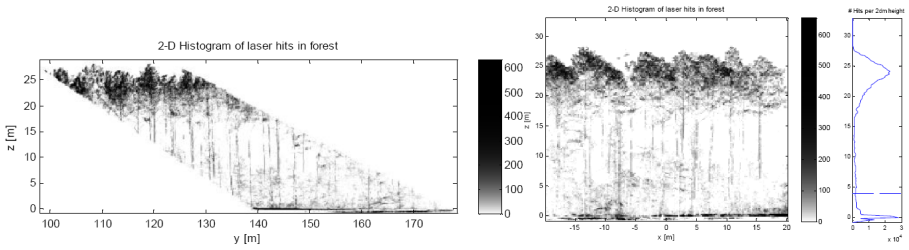
amerikanska ladarprojekt. Phil Gatt [55] från CTI (numera Lockheed Martin Coherent Technologies) har analyserat den så kallade dödtidens inverkan på SNR och detektionsstatistik. Dödtiden uppstår eftersom detektorn är blind en bråkdel av en µsek innan den på nytt kan registrera en foton.

M. Vaidyanathan et al. [56] beskrev utvecklingsläget för JIGSAW, se Figur 7. Detta system är avsett för en UAV för att detektera och känna igen mål i vegetation genom att processera flera 3D-punktmoln tagna från olika vyer. Hela systemet inklusive gimbal (12 tum) väger 45 kg. JIGSAW tillåter ett autonomt arbetssätt efter det att den invisats till ett intressant område (t.ex. via FOPEN SAR typ Carabas). Större delen av processeringen sker ombord och en länk sänder ned bearbetade bilder till operatören.



Figur 7. Överst JIGSAW arkitekturen som den tett sig under fas 3 av projektet. Under visas detektion och identifiering av en stridsvagn under tät vegetation.

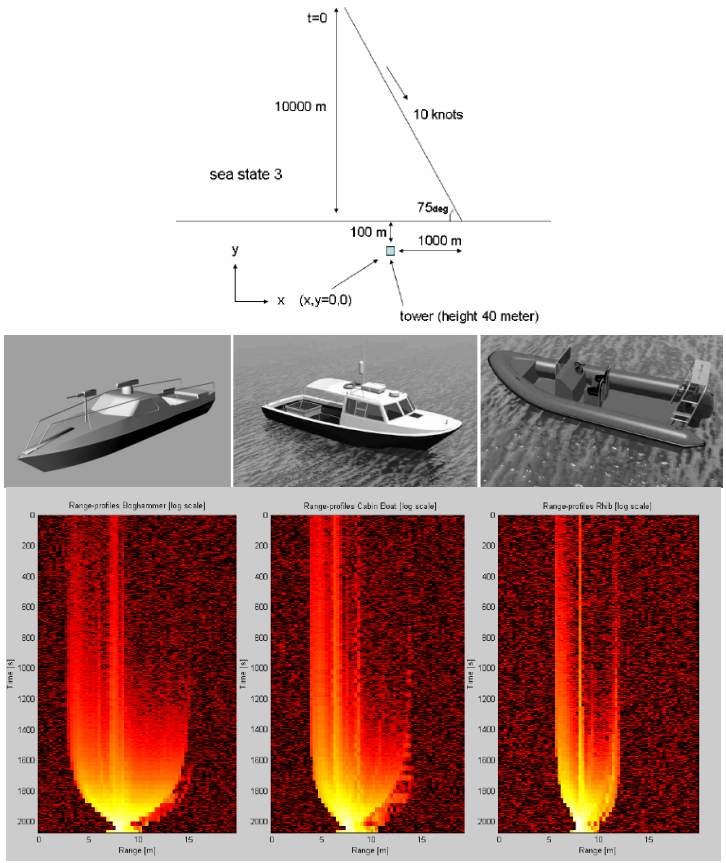
Andra föredrag som behandlade problemet att detektera mark eller mål i vegetation redovisades av Ullrich [57] för skannande lidar (DEM produktion) och av FOI [21] (Chevalier et al.) som analyserade resultat från våra flygburna och markbundna mätningar för att erhålla penetrationsstatistik. Figur 8 illustrerar problemet.



Figur 8. Olika projektioner från lidardata för att uppskatta vegetationspenetration under olika aspektvinklar. Antalet laserträffar inom varje avståndscell (=0,2 m) visas som gråskala samt t.h. även som histogram. (Chevalier et al. [21]).

Van den Heuvel [58] från TNO, Holland redovisade måligenkänning av marina mål, främst mindre fartyg med laseravståndsprofilering. Ämnet är bekant eftersom vi samarbetar inom detta område i det trilaterala samarbetet (Avsnitt 1.3) med Kanada och Holland. Avståndsprofilering erhålles genom att analysera den mottagna vågformen och är intressant för att extrahera reflektions och 3D-struktur inom varje ”pixel”. På långt håll kanske målet inte är vinkelupplöst och då ger avståndsprofilering en första måligenkänning/klassificering innan full bildinformation (2D eller 3D) blir tillgänglig när målet närmat sig. Van den Heuvel et al. visar att Bayseansk klassificering ger goda resultat. Metoden har stor relevans för skydd av fartyg och lasersystemet arbetar med fördel ihop med radar och/eller IRST.

För små mål kan en söklidar t.o.m. vara bättre än radar och IRST på grund av det låga sjöklottret för laser, speciellt vid 1,5 µm våglängd. Som små mål kan nämnas periskop, folk i vattnet, jet skies och små snabba båtar. Detta visas och diskuterades i ett annat konferensbidrag av van den Heuvel [59], se Figur 9. Även FOI har erfarenhet av detta genom mätningar med ett grindat 1,5 µm system.



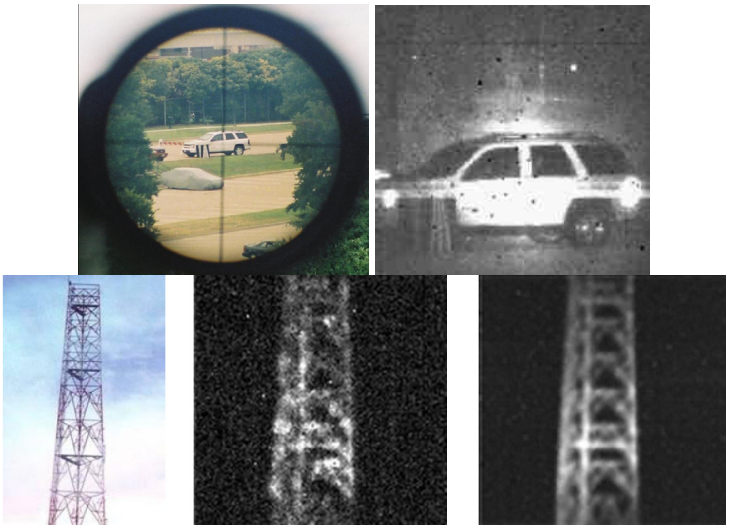
Figur 9. Simulerade 1D-avståndsprofiler för närmande båtar med kurs och fart enligt diagrammet längst upp. Lasersystemet är placerat vid tornet, markerat med en turkos fyrkant. Antagen avståndsupplösning 30 cm (state-of-the-art). God klassificeringsförmåga redovisades baserat på dessa vågformer.

Bushboom et al. [60] visade på en intressant tillämpning där lasertriangulering kunde användas för att verifiera att ingen öppnat eller tagit sig in i containrar. En skannande laser kan mäta in en yta med sub-mm-noggrannhet över stora ytor det torde vara mycket svårt att dölja små förändringar om någon försökt rubba eller ta sig in i en container.

Wang et al. [61] beskrev ett intressant koncept för volymövervakning i en 3D-struktur med 3D-ladar. Genom att bilda ett nätverk med ett fåtal lasersändare och många billiga mottagare samt utnyttja gångvägsskillnader mellan de olika mottagarna och målet kunde målet positioneras med stor noggrannhet. Genom att nyttja CDMA-teknik erhålles en flexibel arkitektur som kan användas för ett godtyckligt övervaknings-område med tillhörande topologi. Genom att bilda nätverk mellan sändare och mottagare skalar informationen från systemet som N×M där N antalet sändare och M antalet mottagare; att jämföra med ett icke nätverksbaserat system som skalar som N. Vidare ger nätverket mycket större positioneringsnoggrannhet.

Ovanstående konferensbidrag presenterades i Laser Radar sessionen. Även andra sessioner innehåller 3D-ladar och tillhörande teknologi t.ex. inom *Infrared Technology and Applications* presenterade några intressanta detektorkonferensbidrag. FOI presenterade på inbjudan två konferensbidrag [30, 62] om grindad avbildning vid denna session.

Hittills har Selex [63] redovisat en kombinerad detektor för passiv MWIR och aktiv 1,5 µm avbildning. Sensorn har prövats vid FOI. Nu har även DRS Technology Inc [64] i USA visat på en liknande detektor, se Figur 10, baserad på MCT APD-matriser [65]. Man talar om ”gated FLIR” d.v.s. att i samma sensor kombinera passiv avsökning och måligenkänning med aktiv 3D-avbildning vid 1,5 µm. Man har uppnått sub-foton-känslighet med förstärkning > 300 (kyld i detta fall). Detta är så vitt vi vet bättre än Selex-detektor som exciterar 10 fotoelektroner inom 1 µs gatetid.



Figur 10. Aktiv avbildning vid 1,5 µm med DRS CMT matris. Matrisstorlek 128×128 pixlar.

MCT APD-matriser utvecklas även vid Leti i Frankrike. Johan Rothman [66] (f.d. KTH) beskrev detektorer med så höga gain som 5300, låga brusfaktorer (< 1,3) och låg mörkerström (DCR=2,6*10^6/sek).

2.2.5 SPIE Europe Remote Sensing, Florens

Ett antal intressanta detektorkonferensbidrag, t.ex. [67, 68], om GAPD-sensormatriser som visar att antalet laboratorier som utvecklar dessa ökar. Det fanns t.o.m. ett konferensbidrag från Irak [69] om en linjär sensormatris för laseravbildning.

Rosenbuch från Univiersity of Maryland [70] talade om superupplösning av Flash ladar genom att analysera flera bilder. Michael Strand [71] från US Naval Warfare Ctr. beskrev hur 3D-avbildning är nödvändigt för ett effektivt minspaningssystem. Bob Grasso from BEA i USA hade ett konferensbidrag med titeln ”A high resolution 3D imaging flash LADAR using image segmentation”, som tyvärr drogs tillbaka. FOI [18] hade ett konferensbidrag om vågformsanalys som visade att invers faltning med utgående puls kunde öka upplösningen med en faktor 2,5 eller mer.

Keith Lewis är ordförande för “Electromagnetic Remote Sensing Defence Technology Ctr” i UK. Detta är en forskningscentrumbildning som MoD kontrakterat till Selex och där alla forskningsutövare (inkl utländska) får i princip söka pengar inom för industrin och MoD strategiska områden. Keith presenterade RSDTC’s strategi [72] som bl.a. innefattade följande problemställningar som relevans för 3D-ladar. Det första nedan behandlar terrorhotet.

- Förena övervakning över stora områden med en händelsestyrd (t.ex. vid en explosion) triggning av sensor som tillåter återuppspelning av det som föregick vid händelsen och som tillåter identifiering.
- Vilken upplösning krävs för effektiv följning. Följning med 3D har stor potential.
- Effektiv följning m.h.a. 3D-strukturer i staden som begränsningar
- Positionera m.h.a. av 3D-strukturen
- Kan man avlyssna tal på avstånd? Dopplerlaser, läsa läpprörelser?
- Tyda avsikter hos individer på avstånd.

Andra relevanta prioriterade områden robust måligenkänning samt verkansverifiering efter insats. Dagens fototolkning har brister därvidlag. 3D-avbildning har större möjligheter att uppskatta skador och bestämma om målet är bekämpat eller ej. Bland de mest prioriterade teknologierna nämndes

Teknologi för aktiv 3D-avbildning

- Laserkällor (Bl.a. fiberlasrar)
- Icke mekanisk strålstyrning
- Detektorer inklusive fotonräkning ”on a chip”
- Avbildning i turbulens
- Multi-apertur-avbildning

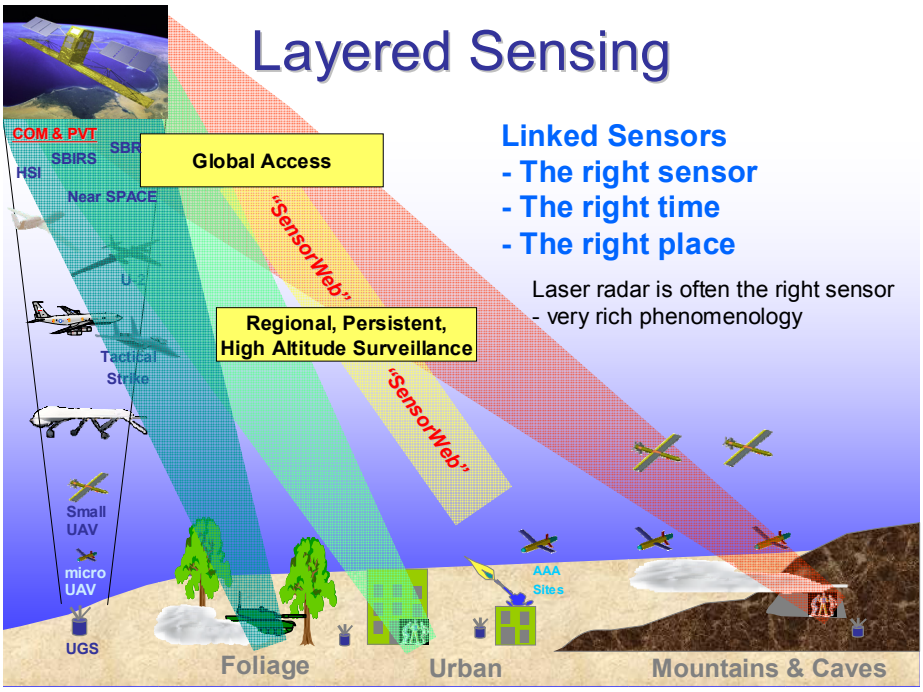
Selex [73] presenterade bl.a. en kortpulslaser (<< 1 ns) som gav ett brett spektrum och reducerade speckleproblemet vid aktiv avbildning.

2.2.6 14th Coherent Laser Radar Conference

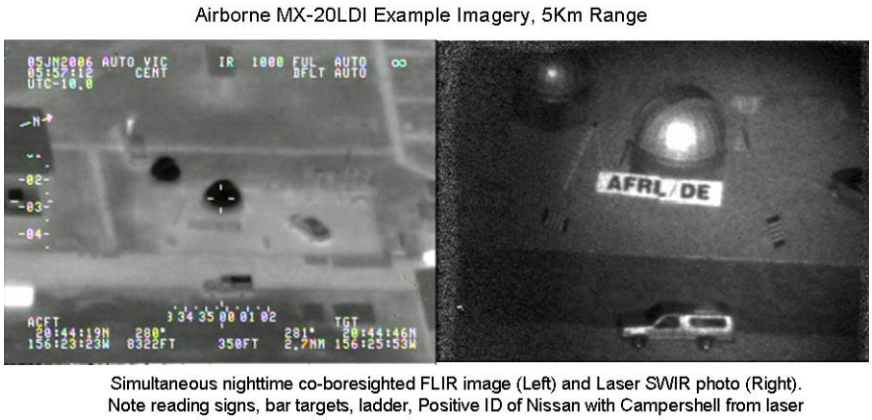
Denna konferens hålls vart annat år och täcker i huvudsak in utvecklingen inom koherent laserradar. På senare år har man utvidgat sessionerna till att även omfatta direkt-detekterande system och fenomen. FOI stod som värd för denna konferens i Linköping 1997. Årets konferens som hölls i Snowmass Colorado bjöd på många intressanta föredrag med stort inslag av nya systemkoncept. Konferenspresentationerna finns tillgängliga på konferensens hemsida [74].

Paul McMannamon, chief scientist vid Air Force Research Laboratory (AFRL) redovisade “The Roles of Laser Radar in Layered Sensing” (Figur 11). Laserradar spelar en viktig roll i konceptet och kan arbeta på alla nivåer (höjder). Nyligen har syntetisk

aperturlidar (SAL) visat på högupplöst 3D-avbildning på i storleksordningen 20 km avstånd. Terrängkartering och måligenkänning inklusive vegetationspenetration demonstreras från 100 m till 3-6 km höjd. En laserradar kombineras med fördel med att system med större yttäckning (SAR, IR) för målinmätning och måligenkänning.

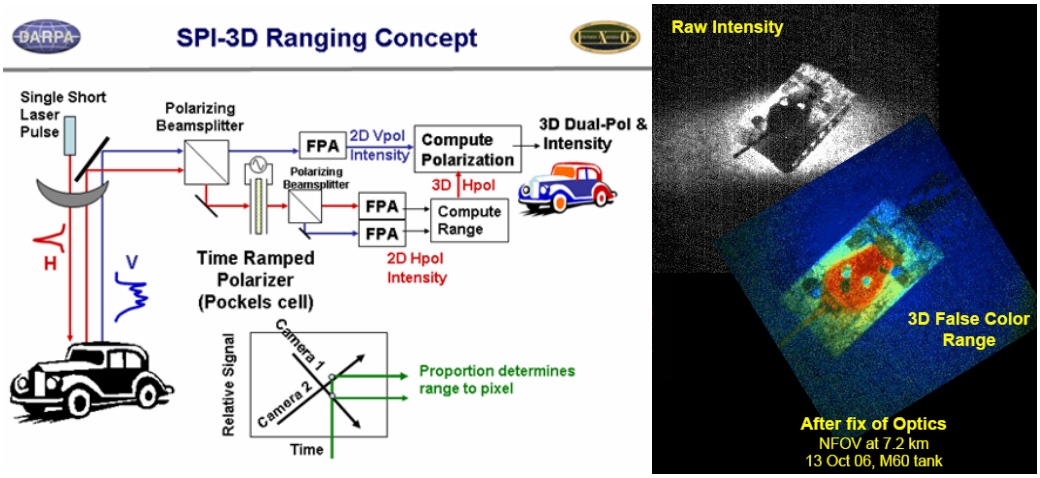


Figur 11. Konceptet skiktad spaning (AFRL) [74].



Figur 12. Jämförelse mellan högupplöst IR och ladar. Avstånd 5 km (AFRL) [74].

McMannamon gav exempel på högupplöst aktivt avbildning i form av en jämförelse mellan högupplöst IR och ladar (Figur 12). Ett annat imponerande exempel visas i Figur 13 som visar principen från programmet *Standoff Precision ID in 3-D* (SPI-3D) [75]. Genom att snabbt ändra polarisationen (inom en tidsram motsvarande pulslängden) hos en av de inkommande polarisationskomponenterna kan man genom kvotbildning mellan bestämma avståndet till varje pixel med en enda puls. Notera den goda avstånds- och vinkelupplösningen i Figur 13 (t.h.) som visar en stridsvagn på 7 km avstånd. Både avstånd, reflektion och polarisation erhålles. Man skulle även kunna tillämpa en annan typ av kodning t.ex. amplitud eller fas under laserpulsen för att bestämma avståndet.



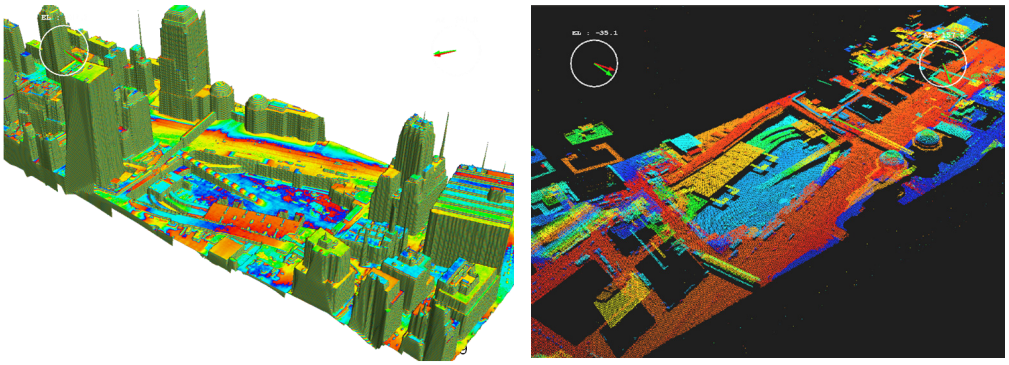
Figur 13. T.v. principen för avståndsmätning genom polarisationsvridning (bild DARPA) och t.h. ett exempel på en stridsvagn på 7 km avstånd [74].

McMannamon beskrev även hur passiv och aktiv spektral 3D-avbildning hade tillämpningar i katastrofområden som New Orleans för att prognostisera risker för översvämning, för att lokalisera människor och livstecken. AFRL har vidare flera system för högupplöst terrängavbildning från system på låg höjd (100-tals meter, E BAIR) till system på storleksordningen 10 km höjd (PILAR, RAIDER, ALIRT). Det första, E BAIR-systemet är avsett för UAV och har mycket god avståndsnoggrannhet (sub-cm) och är baserat på en hög-prf-laser där pulsseparationen begränsar högsta höjd. PILAR och dess efterföljare RAIDER baseras på LOCAAS teknologin med en analogdetekterande detektormatris. Tabellen i Figur 14 visar data för dessa multi-funktionssystem med kapacitet för både terrängkartering samt se igenom vegetation och måligenkänning via multipla vyer.

Parameter	PILAR	RAIDER
Receiver Aperture (cm)	15	< 25,4
Power Required (kWatts)	1	2
Weight (lbs)	150	275
Slant Range (km/kft)	8 / 26	> 16 / 53
Spatial Resolution (µrad) - Spotlight	42	21
Spatial Resolution (µrad) – Terrain Mapping	84	42
Minimum Frame Size (m)	30×30	30×30
Frame Size (pixels)	90×90	180×180
Swath Width (meters)	< 75 @ 12,500 ft	> 400 @ 25,000 ft
Range Accuracy (cm)	9,375	7,5
Range Resolution (m)	4,0	1,0
Frame Rate (Hz)	4	> 8

Figur 14. T.v. data för PILAR respektive det nya RAIDER (avbildas även överst t.h.). Underst till höger visas E BAIR för UAV baserad på enkel-detektor-skannande teknik [74].

ALIRT är också ett system för kombinerad kartering och måligenkänning. Systemet baseras på den vid MIT utvecklade tekniken Geigermode Avalanche Photo Diode (GAPD). Detektormatrisen är 32×32 element eller större. Figur 15 visar exempel på 3D-data från ALIRT.

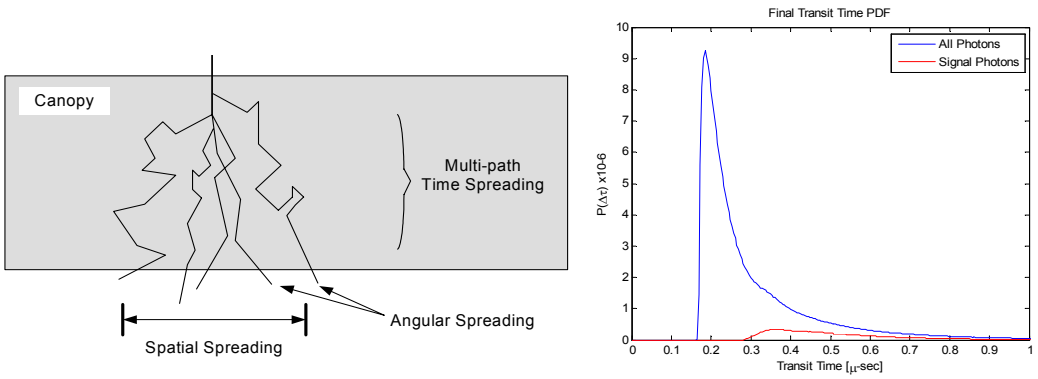


Figur 15. 3D-data från ALIRT [74].

McMannamon talade även om vikten av kontinuerlig uthållig spaning över stadsområden. Målet är att övervaka ett 20×20 km^2 med radar/IR och sedan kunna utnyttja en högupplöst sensor t.ex. ladar för måligenkänning av detekterade anomalier.

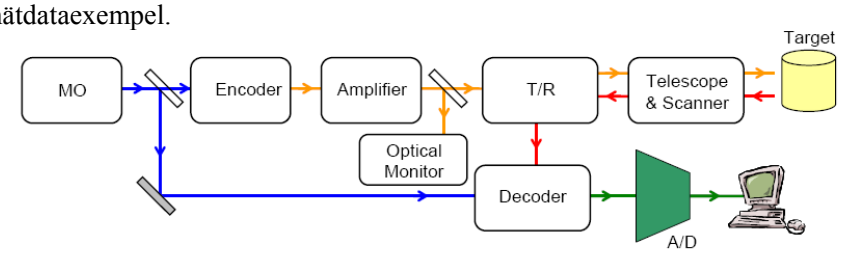
Boeing Spectral Lab beskrev hur man tagit över tillverkning av GAPD-detektorer från MIT Lincoln Lab. Man avser att sätt in detektorerna i sensorer för UAV mm.

Greiner et al. från LOCI (Laser and Optical Communication Institute) som är en centrumbildning mellan AFRL och universitetet i Dayton presenterade Monte Carlo-simuleringar av propagering genom vegetation. Skog täcker 23 % av jordens yta så problemet är relevant i många avseenden. I dag utnyttjas de små mellanrum som finns mellan löv och grenar i trädkronorna. I många fall är dock vegetationen mycket tät (djungel) och tätheten är störst i medelsolriktningen (där skall ju träden tillgodogöra sig solljuset). Det finns en teoretisk möjlighet att även utnyttja transmissionen genom löven för att se igenom. Greiner visade genom simuleringar i zenitvinkeln att svar från marken under träden (signalfotonerna) i allmänhet alltid kom i medeltal 100 ns (motsvarande 15 meter gångtid) efter det stora ekot från trädkronorna. Det finns alltså goda möjligheter att grinda bort detta (Figur 16).

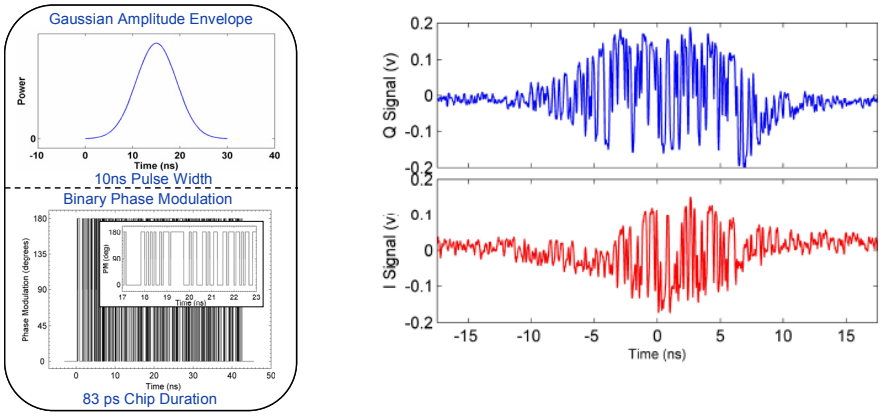


Figur 16. Monte Carlo simulering av laser pulspropagering genom skog. Signalfotonerna (från markplanet) kommer ca 100 ns efter det stora ekot från trädkronorna i detta exempel.

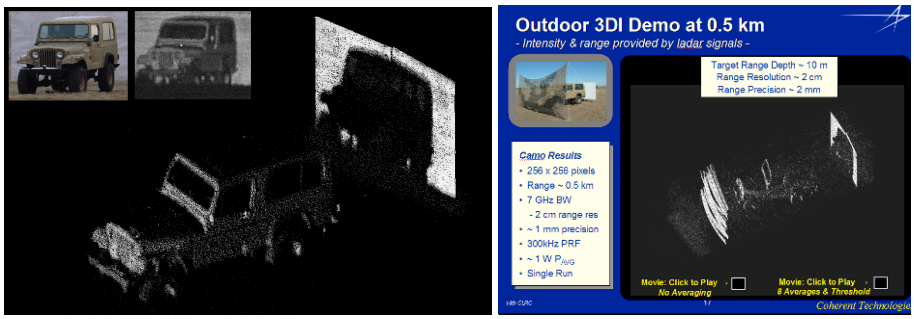
Buck från Lockheed Martin Coherent Technologies (f.d. CTI) talade om ”The Super-resolution Sensor System (S^3) program”. Detta program är mycket ambitiöst och syftar till att i samma system förena 3D-avbildning, vibrometri, polarimetri samt apertur-syntes i samma sensor. Avståndsupplösningen för en ladar ges i allmänhet av uttrycket c/2B. Medan man för hög upplösning i allmänhet kräver hög bandbredd B kan det vara svårt att realisera och därför försöker man ofta att utnyttja en implementation som inte kräver hög bandbreddselektronik (t.ex. FMCW). Medan det är svårt att generera och detektera ps-pulser med full detektorbandbredd är det lättare att koda en puls med t.ex. en fas eller polarisationskodning med mycket hög momentan bandbredd (THz) och utnyttja multikanalteknik med GHz bandbredd på elektroniksidan. Figur 17 visar ett blockdiagram, medan Figur 18 visar principen för mätningarna. Figur 19 visar ett mätdataexempel.



Figur 17. Blockdiagram för LMCT’s multifunktionsladar. MO=master oscillator och amplifier är en fiberförstärkare- Laserprf 1-300 kHz, pulslängd 10 ns och medeleffekt ca 1 W. (Buck et al. [74]).

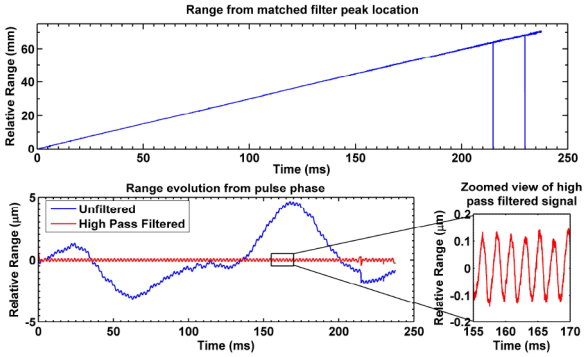


Figur 18. T.v. fasmodulering med upplösningen 83 ps av den 10 ns utsända laserpulsen. T.h. I- och Q-komponenterna från ett punktmål. Kvadraturdetektion medger analytisk rekonstruktion av den komplexa mottagna signalen med efterföljande signalbehandling med matchat filter. (Buck et al. [74]).

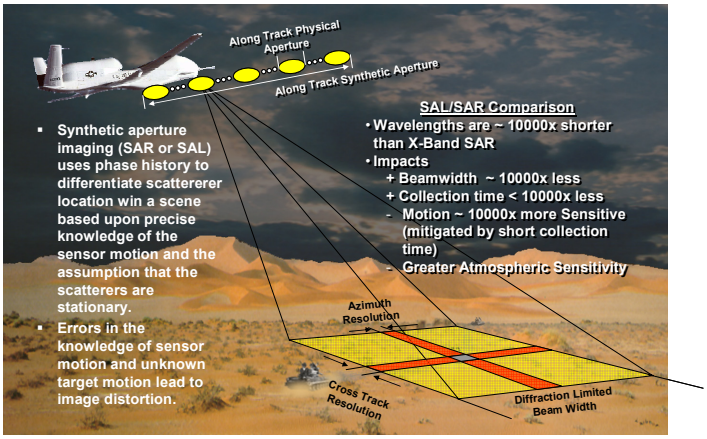


Figur 19. T.v. en punktmolnbild av en jeep på 0,5 km avstånd. Transversell bildstorlek 256×256 pixels. Medelvärde av 8 bilder. De små insatta bilderna visar ett foto resp. en intensitetsbild. T.h. visas en bild av jeepen bakom ett kamouflagenät med 50 % transmission. Avståndsupplösningen var imponerande 2 cm och avståndsnoggrannheten uppgavs till 2 mm. (Buck et al. [74]).

Figur 20 visar ett exempel från vibrometri. En högtalare har satts på en rörlig plattform med en hastighet av ca 3,3 m/s. Genom att subtrahera denna hastighet med tillhörande fasförändringar samt filtrera bort ”långsamma” speckleinducerade avståndsförändringar kunde högtalartonen plockas fram. Det svåra uppstår när specklebrusets frekvenskarakteristik överlappar den önskade signalens.

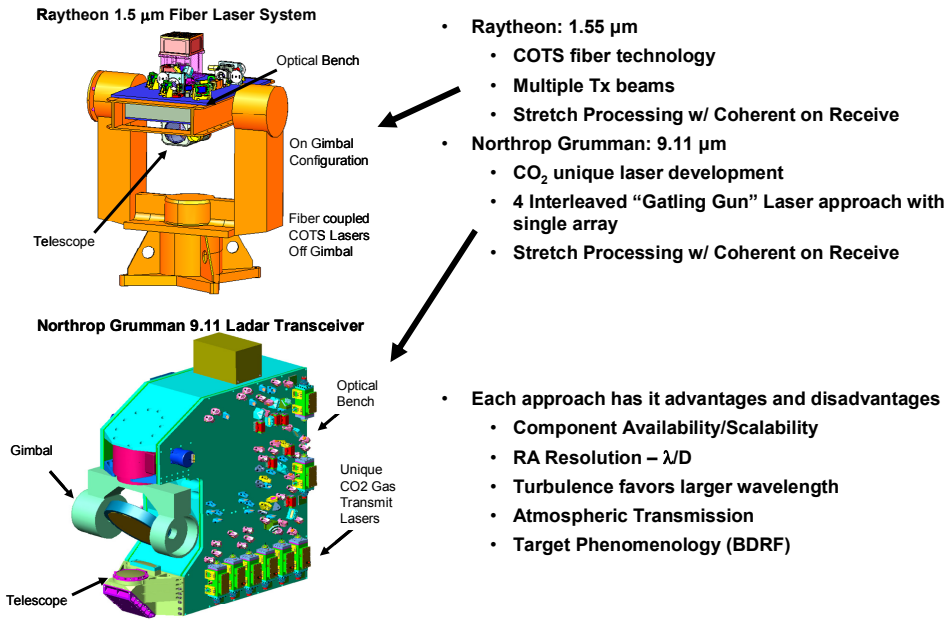


Figur 20. Mätning och signalbehandling för att extrahera en högtalarton från en rörlig högtalare. (Buck et al. [74]).

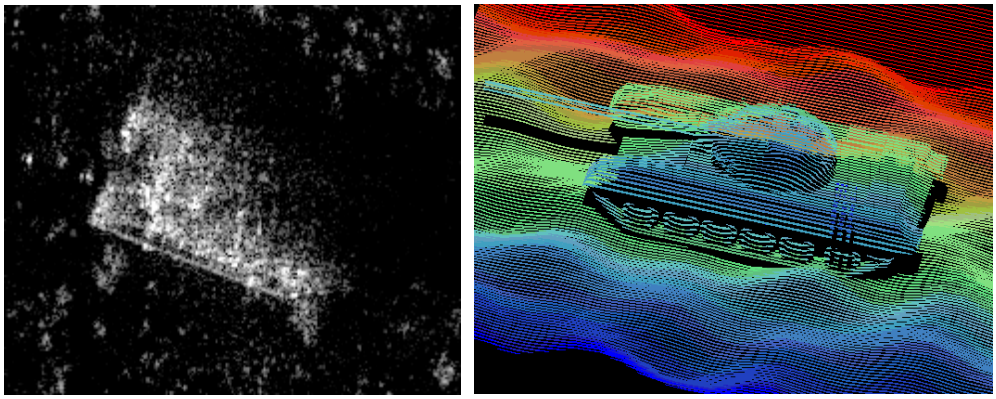


Figur 21. Principen för syntetisk aperturladar (SAL) och jämförelse med konventionell X bands-SAR. (Tomlinsen et al. [74]).

Phil Tomlinsen [74] talade om DARPA programmet SALTI - *Synthetic Aperture Lidar for Tactical Imaging*, se Figur 21. Man har nu för först gången flugit två olika syntetiska apertur-ladarsystem med ”unprecedented 3D renderings of extended diffuse targets”, se Figur 22. Man talar om system som skall identifiera mål på 20-30 km för taktiskt bruk eller t.o.m. för rymdbaserade system med möjligheter att avbilda från geostationära satelliter. Alla bilder från SALTI är hemliga men man visade en jämförelse mellan en SAR bild och en simulerad SAL bild (Figur 23). Eftersom SAL använder sig av optiska våglängder blir bilderna mer lika ”fotografier” jämfört med SAR bilderna där reflektionen sker i en helt annan geometrisk skala.



Figur 22. Två olika SAL system som båda har flugit i SALTI programmet. Raytheon har ett fiberbaserat 1,55 µm system och Northrop satsade på ett CO_2 system vid 9,11 µm. (Tomlinsen et al. [74]).

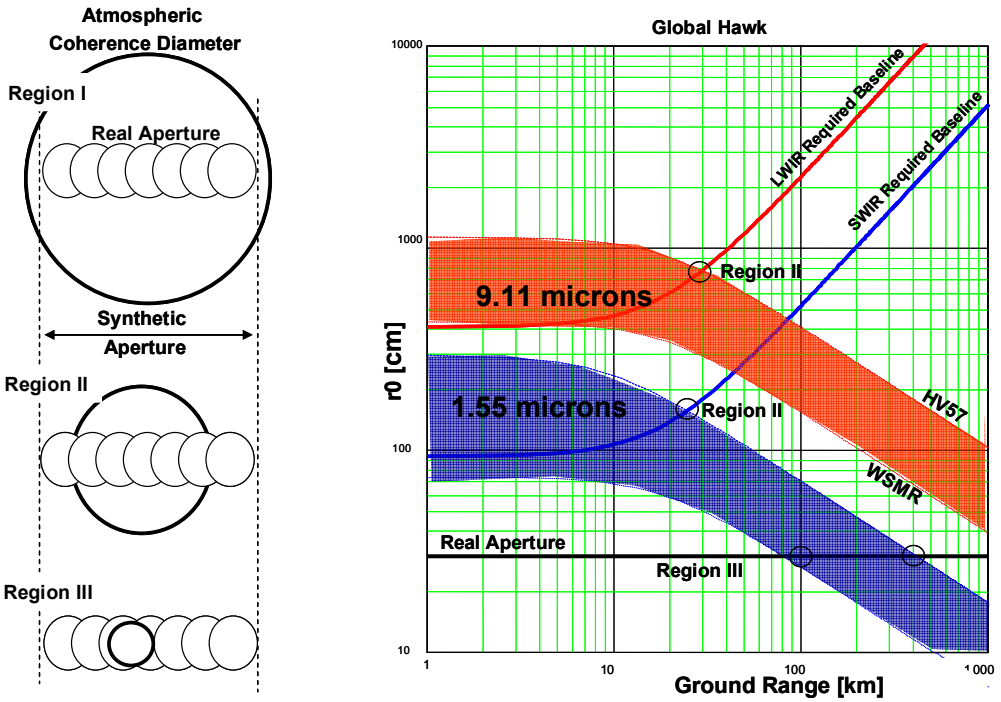


Figur 23. T.v. en RF SAR bild och t.h. en simulerad SAL bild. (Tomlinsen et al. [74]).

Det finns för- och nackdelar med SAL jämfört med SAR. Tabell 1 jämför några egenskaper mellan SAL och SAR. Den stora skillnaden i våglängd medför att SAL har ca 10 000 ggr kortare exponeringstid och följaktligen 10 000 ggr kortare syntetisk antenndiameter jämfört med RF SAR. Vidare ger den optiska våglängden mer tolkningsbara bilder och 3D-avbildning med mycket högre upplösning jämfört med SAR. Laseremission har låg röjningsrisk (inga sidolober) samt medför inte något problem med frekvensallokering som man har vid RF-frekvenser. Den stora nackdelen med SAL är naturligtvis beroendet av atmosfären både avseende turbulens och dämpning. Viss väderpenetration kan ske men på bekostnad av högre sändareffekt. En mer fundamental begränsning kan atmosfärsturbulens åstadkomma. Figur 24 illustrerar detta. Man skiljer på olika fall avseende atmosfärens koherensdiameter r_0 (det transversella avstånd relativt strålen över vilken ingen nämnvärd fasdistorsion sker). I område 1 ($VT_{exp} > r_0$), är turbulensbegränsningen försumbar, i område 2 ($D < r_0 < VT_{exp}$) kan bilder erhållas dock efter processering såsom autofokusering. I område 3 ($r_0 < D$) är det svårt att erhålla god avbildning.

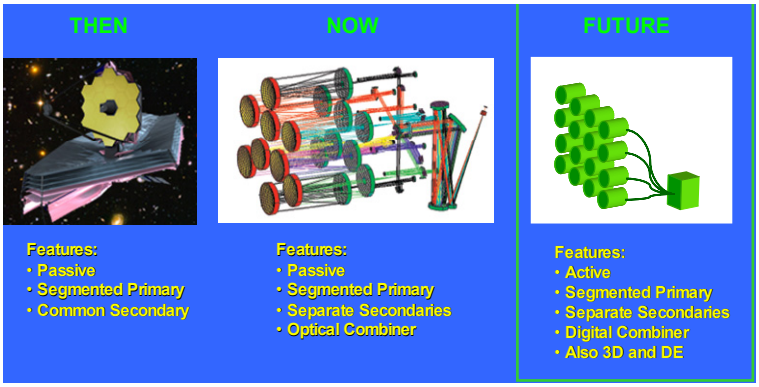
Tabell 1. Jämförelse mellan SAL och SAR.

Egenskap	SAL	SAR	Kommentar
Hög upplösning	+	0	Upplösning λ/D eller λ/VT_{exp}
Tolkningsbarhet	++	0	Optisk våglängder ger bilder som vi är vana att tolka
Exponeringstid	++	0	T_{exp} ca 10 000 ggr kortare
Synfält	0	++	Strålbredd λ/D.
Väderinflytande	0	++	Stor nackdel för SAL, både turbulens och dämpning i atmosfären reducerar prestanda.
Se in i urban miljö	++	0	SAR får problem med interferens i urbana strukturer (”canyons”).
Röjningsrisk	++	0	Inga sidolober för SAL.
3D-avbildning	++	0	För ladar i princip ned till mm. Svårare vid radarvåglängder på grund av interferens mellan olika spridare.
Frekvensallokering	++	0	
Teknisk mognad	0	++	SAR har funnits några årtionden, flygburen SAL demonstrerad 2006.



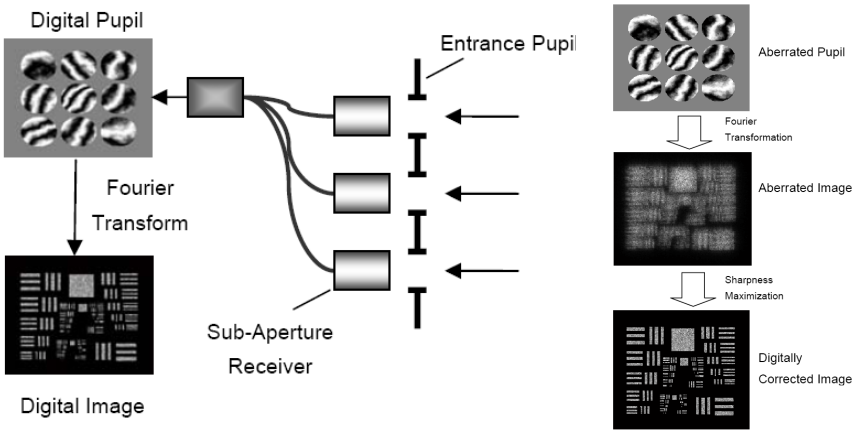
Figur 24. T.v. Olika regioner för SAL m.a.p. turbulens genom jämförelse mellan syntetiska, reella aperturer med atmosfärens koherensdiameter r_0, Område 1: $VT_{exp} > r_0$, område 2:$D < r_0 < VT_{exp}$, område 3: $r_0 < D$. T.h. Atmosfärens koherenslängd för 9,11 resp. 1,55 µm laservåglängd som funktion av markavståndet. Global Hawk som diagrammet avser flyger normalt på 20 km höjd. LWIR och SWIR required baselines antas motsvarar de syntetiska antenndiametrarna. För 20 km höjd hamnar man då på ca 3 cm upplösning. (Tomlinsen et al. [74]).

Marron et al. [74] från Lockheed Martin Coherent Technologies beskrev aktiv avbildning med multiapertursystem. Genom att koherent kombinera bilder från olika aperturer kan man hålla nere volym och vikt samtidigt som man kan uppnå hög upplösning. Om man använder en avstämbar laser kan man även uppnå högupplösta 3D-bilder. I dessa multi-apertursystem sker avbildningsprocessen med hjälp av digital korrektion av fasfel på grund av optik och atmosfär. Figur 25 visar utvecklingen av stora optiska teleskop som går från stora segmenterade speglar till multiteleskop-system med optisk multiplexering. I framtiden kan man genom att använda laser-belysning kan man digitalt multiplexa signaler från många små teleskop. Även på sändarsidan kan man tänka sig digital strålstyrning och strålformning genom faskontroll av de olika delsändarna.

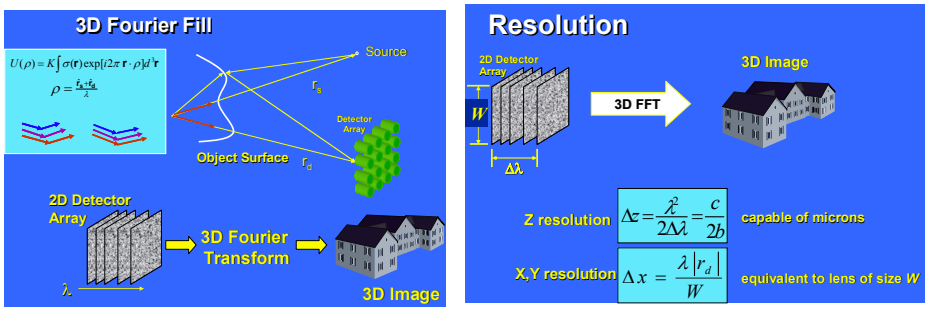


Figur 25. Utveckling av stora teleskop för hög upplösning. (Marron et al. [74]).

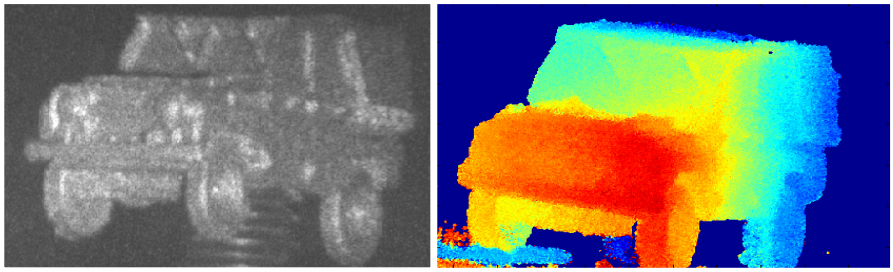
Figur 26 visar principen för aktiv koherent multiapertur-avbildning. För att registrera det optiska fältet i varje subapertur används en variant av holografi fast med digital lagring. En sändarstråle blandas inom en del av den utsända strålen (referensstrålen eller lokaloscillatorn) och det bildade speckle-mönstret registreras i detektormatrisen. Eftersom det mottagna elektriska fältet från målet innehåller fastermen exp(i**kr**) inses att man kan mäta avstånd genom att variera våglängden hos sändaren (ändra absolutbeloppet på vågvektorn ($k=2\pi/\lambda$)). Den avståndsupplösning man kan uppnå härleds enkelt till $\Delta z \approx \lambda^2/\Delta\lambda$ där $\Delta\lambda$ är separationerna mellan två använda våglängder.
Figur 27 och Figur 28 illustrerar 3D-avbildning och den upplösning som kan uppnås.



Figur 26. T.v. Principen för multiapertur koherent avbildning. Data från varje delapertur kombineras digitalt i en matris som motsvarar hela aperturen. Bilden formas sedan efter en digital Fourier transform. T.h. visas hur autofokus metoder kan användas för att kompensera för avbildningsfel. (Marron et al. [74]).



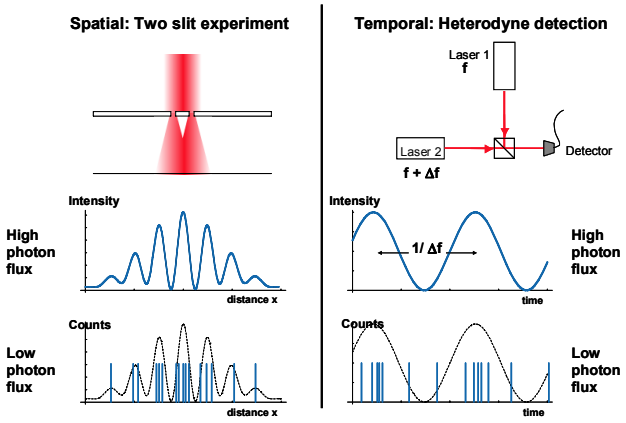
Figur 27. Principen för 3D-avbildning (t.v.) och t.h. uttryck för avstånds och transversell upplösning. (Marron et al. [74]).



Figur 28. T.v. en intensitetsbild och t.h. en avståndsbild uppnådd genom koherent avbildning med två våglängder. Medelvärdebildning över 8 frames. (Marron et al. [74]).

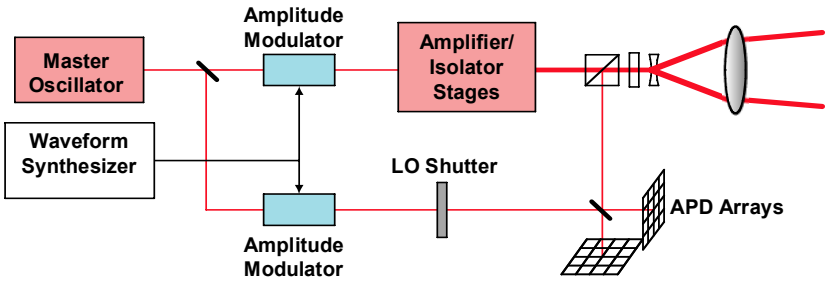
Richard Heinrichs [74] från MIT Lincoln Lab talade om koherent detektion med foton-räknande detektormatriser. Det intressanta med detta är att man härigenom undviker det stora problemet med hög lokaloscillatoreffekt per pixel. Vid analog detektion brukar ~1 mW per pixel behövas för att bli shot-noise-begränsad. Detta motverkar stora matriser, eftersom en 10 kpixel-matris skulle t.ex. behöva belastas med en total lokal-oscillator(LO)-effekt av 10 W ! Med en fotonräknande GAPD-matris kan även LO-effekten vara av samma storleksordningen som signalen d.v.s. enstaka fotoner undre samplingtiden och LO-effektbelastningen blir då försumbar. Man kan se många fördelar med detta:

- Både direkt och koherent detektion i samma detektor (Doppler + 3D) och med samma laser
- Stora matriser (ROIC registrerar bara tid för anländande foton, låg LO-effekt)



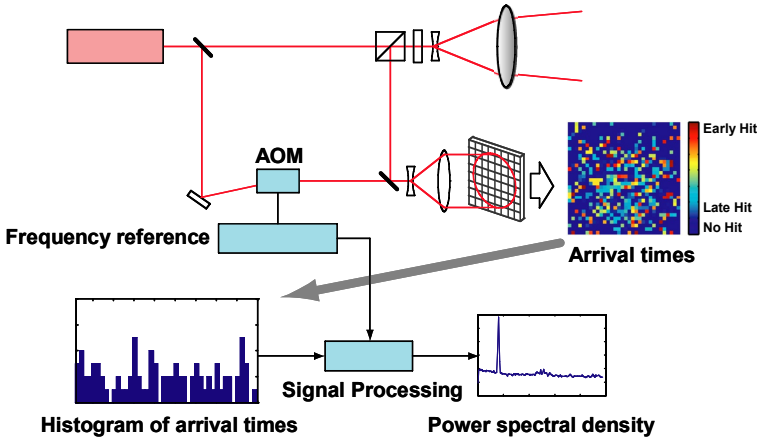
Figur 29. Koherent detektion/interferens vid höga och låga fotonflöden. (Heinrichs [74]).

En jämförelse mellan ”konventionell koherent detektering och fotonräknande koherent detektering visas i Figur 29, omsatt i ett multifunktionssystem kan det te sig som i Figur 30. LO-slutaren medger växling mellan direkt och koherent detektion. Master-oscillatorn och amplitudmodulatorerna medger sändning av olika vågformer. Två detektormatriser ger möjlighet att detektera både vertikal och horisontell polarisation.



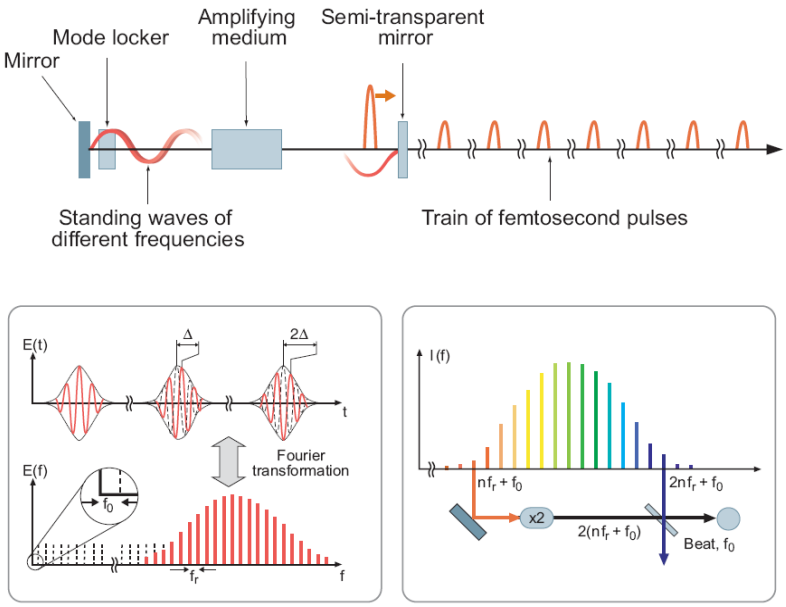
Figur 30. Koncept för ett direkt/koherent system baserat på GAPD-matriser. Högupplöst Doppler-avbildning, polarisation och 3D-avbildning möjliggörs i samma sensor. (Heinrichs [74]).

Figur 31 visar principen för 3D- och Doppleravbildning med GAPD-matriser. I varje pixel detekteras under varje LO-period tiden för anländande fotoner. Detta ger ett tids-histogram som efter FFT ger Dopplerinformation. Samtidigt erhålles även avståndet i varje pixel. Detta kan även mötas med direkt detektion med fördelen av lägre speckle-brus. Tidsupplösningen hos chipklockan (2 GHz för MITs detektor) bestämmer band-bredden.



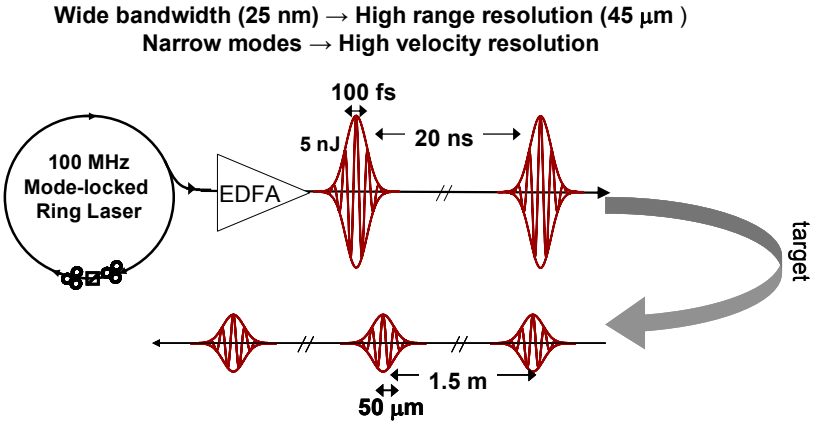
Figur 31. Koherent detektion med GAPD. (Heinrichs [74]).

Hall och Hänsch erhöll 2005 års Nobelpris i fysik genom sina insatser i laserbaserad precisionsspektroskopi som bygger på den så kallade frekvenskamtekniken som enkelt kan beskrivas som en ny mätlinjal för tid och frekvens [76]. Frekvenskamtekniken illustreras i Figur 32. Helt nyligen har frekvenskamtekniken vidgats att inkludera det extremt högfrekventa ultravioletta området vilket kan leda till ännu mer precisa klockor vid röntgenfrekvenser. Genom att man lyckats faslåsa de korta pulserna kan ännu kortare pulser (10^{-18} s, attosekunder) genereras genom interferens. Detta kommer att ha stor betydelse utvecklingen inom utvecklingen av GPS till mm-cm precision och vidare för telekommunikation liksom för naturvetenskapen i allmänhet. Man avser bl.a. att studera naturkonstanterna med än högre precision.

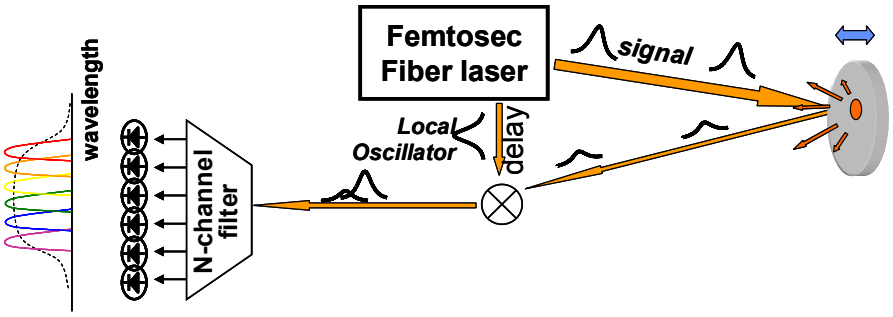


Figur 32. Principen för frekvenskamtekniken. Den övre delen av diagrammet visar hur laserpulserna bildas och deras tid och frekvenspektrum. Den spektrala fördelningen består en kam av frekvenser som är extremt väldefinierade. Genom frekvensdubbling kan man bestämma den okända grundfrekvensen f_0 och därmed erhålla en ny extremt noggrann mätlinjal för tid och frekvens. Tekniken har utvecklats av T. Hänsch och belönades med 2005 års Nobelpris [76].

Newbury [74] från NIST i Boulder höll ett mycket intressant föredrag om "Lidar with Femtosecond Fiber-Laser Frequency Combs", se Figur 33. Femtosekund(fs)-laser behandlas även i en översiktlig FOI-rapport [77]. Några egenskaper och möjligheter med frekvenskamtekniken för koherent ladar är hög avståndsupplösning, reducerat speckle-inflytande (bred spektral emission), hög Dopplerupplösning samt koherent detektion från puls till puls (som för konventionell radar). Man har helt enkelt en bredbandskälla ekvivalent med 10-tusentals separata koherenta sändare.



Figur 33. Ex. på ladarsändare baserad på en fiber-fs-frekvenskamlaser. (Newbury [74]).

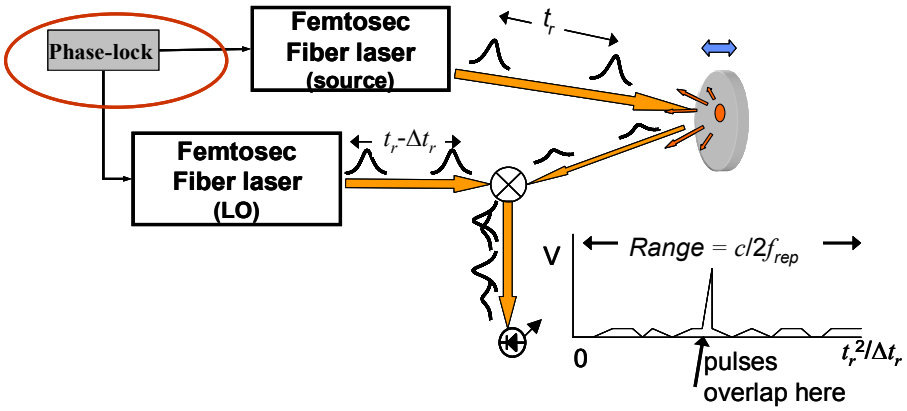


Figur 34. Spektralt upplöst fs-frekvenskamladar. (Newbury [74]).

Newbury [74] redovisade två olika ladarsystem (laboratorienivå); ett spektralt upplöst system (Figur 34) samt ett baserat på två faslåsta fs-fiberlasrar (Figur 35). I det första systemet delas spektrumet för varje puls upp i ett antal kanaler. Fördelen med detta kan vara att man kan tillämpa spektral medelvärdesbildning i Dopplerkanalen för att reducera speckleinflytandet samt att man bättre kan kompensera för dispersion i systemet. Med detta system demonstrerades en avståndsupplösning av 45 µm (i laboratoriet) och en stabil Dopplersignal genom spektral medelvärdesbildning.

I det andra konceptet (Figur 35) används två frekvenslåsta fs-fiberlasrar. Härigenom undviks fördröjningsledning för lokaloscillatorn och man får ett enklare system genom att endast en detektor/digitizer behövs. Kostnaden kommer i frekvenslåsningen mellan de två lasrarna. Med detta system demonstrerades sub-mm-avståndsupplösning med 1,5 m avståndstvetydighet.

Frekvenskamtekniken för ladar verkar för närvarande vara lite för exklusiv för implementering i taktiska militära system.



Figur 35. Ladarsystem baserat på två frekvenslåsta fs-fiberlasrar. (Newbury[74]).

2.2.7 Sammanfattning av system och tekniktrender

Laserradarområdet utvecklas för närvarande snabbt. Vi har här inte tagit upp lidarsystem (lidar, Light Detection And Ranging, är i princip samma sak som ladar men avser oftast system i vissa tillämpningar såsom för vindmätning) för vindmätning och mätning av föroreningar men här märks en tydlig kommersialisering av system för rutinmätningar på flygplatser och i industrimiljö.

Utvecklingen inom området 3D-ladarsystem sammanfattas enligt nedanstående lista.

Teknologi:

- Nya laserkällor utvecklas ständigt, speciellt intressant är utvecklingen av
  - Fiberlaser
    - White light lasers med bred spektral emission (vis/NIR)
    - Ultrakorta pulser (ps-fs)
  - Frekvenskamteknik (fs-laser)
  - Diodpumpade fastatillståndslasrar (μ-chip, avstämbara lasrar)
- Nya detektormatriser
  - Större Geigermod APD (128×64) matriser
  - Koherent detektion och fotonräkning
  - CMT APD matriser för passiv (MWIR) och aktiv 3D-avbildning
  - Fortsatt utveckling av matriser med analog detektion (Advanced Scientific Concepts)
- Stark utveckling på processorchip och snabba AD omvandlare
  - Alltmer kan göras med digital signalbehandling i stället för i den optisk analoga domänen.

Systemutveckling

- Utveckling mot kompakta tripod och handhållna ladarsystem samt system för UAV
- Fortsatt utveckling av JIGSAW-konceptet (se genom vegetation från UAV)
- Fortsatt stark utveckling av lidarsystem för fjärranalys (vind, CO_2, farliga ämnen etc.)
- Nya koncept utnyttjande
  - Direkt/koherent detektion med fotonräkning
  - Multiapertursystem/3D-avbildning med multivåglängd och fasinformation
  - Syntetisk aperturladar (SAL), två olika systemkoncept demonstrerade från flygplan
  - Ladar med extrem precision i avstånd och Doppler (fs-kamteknik mm.)

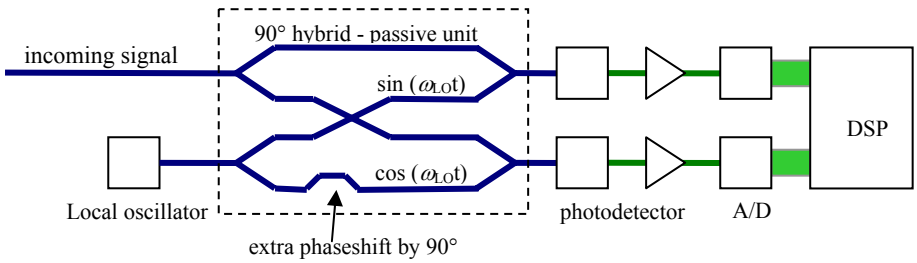
2.3 Signalbehandling

Signalbehandlingsverksamheten inom projektet har i de flesta fall varit inspirerad av internationellt publicerade vetenskapliga artiklar. Därför kan en god överblick över de metoder som verkar internationellt intressanta fås genom att titta på vad som skett inom projektet, se Avsnitt 4.3. Om man i större utsträckning tittar framåt kan man notera följande exempel på intressanta forskningsfrågor. Trenden inom signalbehandlingsutvecklingen drivs främst av allt större beräkningskraft samt allt högre upplösning, noggrannhet och uppdateringsfrekvens i mätdata.

- *Ny matematisk teori kan ge bättre 3D-representationer*. Genom att använda nya idéer från andra områden, exempelvis det matematiska, såsom spinn-bilder och tensorer kan man hitta bättre metoder att diskriminera mål från bakgrund. [78-81]
- *Modellering av lasersystem, mål och bakgrund*. Ett allt mer viktigt stöd för algoritmframtagning och för att generera träningsdata. Dock är detta område inte så stort på lasersidan än. Det är mycket beräkningstungt att simulera realistiska 3D-system, särskilt med hänsyn till exempelvis atmosfär. [82-84]

- *Fusion av data från flera vyer*. För att få ut mer av data, och för att utnyttja styrkan med att data är i globala koordinater kan man fusionera flera överlappande datamängder för att höja förmågan att detektera, följa och känna igen mål i svåra miljöer. Målet är att få metoder som är robusta mot kamouflage och skyl samt varierande väder och driftstillstånd. [56]
- *Kombinera data från olika optiska sensorer*. För att nå ännu bättre robusthet i måldetektion- och måligenkänning. Kombinationen av 3D-systemets förmåga att kunna ”se” genom vegetation och kamouflage, samt stöd från 3D-formen i måligenkänningsprocessen, förstärker de passiva optiska systemens fördel med yttäckning och höga detektionspotential. [85]
- *Automatiskt identifiera objekt i realtid*. Eftersom mogna system finns på marknaden blir det allt viktigare att hitta metoder som robust kan implementeras i självständiga realtidslösningar. [86, 87]
- *Analys av mottagen vågformsdata*. Genomförs för att erhålla högre upplösning i mottagen signal. Genom att mer ingående analysera pulssvaret i ett lasersystem kan ett större antal ekon fås fram ur mottagen signal utan ökad energiförbrukning. [57]
- *Prestandanalys och teoretiska gränser*. Informationsteoretiska resonemang kan ge teoretiska gränser för prestanda som praktiska metoder kan jämföras med för att få en uppfattning av hur mycket bättre algoritmer det går att få. [15, 88]
- *Optiska korrelatorer*. I igenkänningsalgoritmer kan själva sökningen i databaser vara tidsödande. Denna metod bygger istället på att redan i den optiska signalen korrelera mot ett målbibliotek. [89]
- *Digital behandling av koherenta signaler*. Se principskissen i Figur 36 [90], där man för ett koherent system förflyttat vissa beräkningsoperationer från den analoga till den digitala domänen och därigenom förbättrat prestandan.

Aktiv avbildning i 3D är ett tillämpningsområde av mycket stor vikt för såväl militära som civila marknader. För militära tillkämpningar underlättar 3D-avbildning detektion av maskerade eller delvis skymda mål, medan kommersiella tillämpningar är t.ex. terrängkartering och hinderdetektion för autonoma fordon. Förutom multispektral information kan morfologi, vibrometri och polarimetri kombineras med laserradardata för att ytterligare förbättra detektionssannolikhet och minska falsklarmsannolikheten [91].



Figur 36. Principen för digital processning av koherenta signaler [90].

3 Marknaden

Tillgängligheten på kommersiella laserradarsystem har ökat under senare år. Idag finns det system som kan mäta små detaljer (storleksklass mm) med en noggrannhet ner till µm-nivå. Andra system kan mäta över stora avstånd (storleksklass km) med en noggrannhet ner till dm-nivå. System används inom tillverkningsindustrin för att till exempel kontrollera producerade detaljer eller ytors ojämnheter avseende toleranser. Tillverkare av bilar använder laserradar för att mäta fullskaliga modeller och generera CAD-ritningar. Inom medicin och tandvård byggs 3D-modeller producerade från data från laserradar. Producenter av filmer samt dataspelsbranschen använder laserradar för att mäta modeller som sedan datoranimeras. Laserradar används inom områden som arkitektur, arkeologi, gruvdrift och processindustri. I Sverige har mätning av skog med flygburet system blivit ett stort användningsområde. På FOI använder vi laserradar som en del i vår forskning för algoritmutveckling inom 3-D.

Gemensamt för alla typer av laserradarsystem är att de mäter vinklar och avstånd beröringsfritt, där varje avståndsmätning med en given vinkel ger upphov till en punkt; en tredimensionell koordinat (x,y,z). En laserradar mäter punkter med en enorm hastighet, oftast flera tusen punkter per sekund, och med en god täthet. Resultatet blir ett punktmoln innehållande hundratusentals till miljontals punkter, där varje punkt är en tredimensionell koordinat (x,y,z). Punktmoln är grunden för triangulerade och texturerade 3D-modeller. Än så länge är de skannande laserradarsystemen de överlägset mest utbredda, men det finns även ett fåtal system med matrisdetektorer som mäter flera tusen punkter med hjälp av endast en laserpuls.

Laserradarsystem kan mäta avstånd med tre olika metoder. En metod är att mäta flygtiden för en laserpuls, vilken benämns time of flight (TOF). Flygtiden är den tid från det att en laserpuls lämnar systemet, reflekteras mot en yta och når detektorn. Avståndet beräknas genom att multiplicera tiden med ljusets hastighet/2. En annan metod för avståndsmätning är att mäta fasskillnad. En utsänd laserstråle moduleras med en bärvåg (CW – Continuous wave) och avståndet beräknas med hjälp av fasskillnaden mellan utsänd och mottagen våg. En tredje metod är att kombinera en laser med en tracker eller kamera (aktiv stereoskopteknik), ett så kallat triangulerande system, vilket mäter avståndet med en laserstråle (eller laserlinje) som får svepa med väl definierade vinklar över ett mätobjekt där varje punkt (eller linje) observeras av en separat sensor, exempelvis en CCD-kamera. En väl definierad bas (avstånd) mellan utsänd laser och sensor gör att avståndet till objektet kan trianguleras fram.

Förutom optisk mätning för generering av punktmoln kan även nämnas mätning med mekaniska prober, röntgen samt ultraljud. Den optiska mätmetoden är den som är överlägset mest utbredd avseende ytmätning och det är dess möjligheter och begränsningar som diskuteras här.

Grovt kan laserradarsystem delas in i tre klasser beroende på vilket avstånd det mäter, vilka är kortdistanssystem, medeldistanssystem samt långdistanssystem. Triangulerande system räknas till kortdistanssystem, fasmätande system (CW) tillhör medeldistanssystem och system som mäter flygtiden (TOF) tillhör långdistanssystem. Alla tre avståndsklasser har markbundna system, medan de flygburna systemen hittas som långdistanssystem.

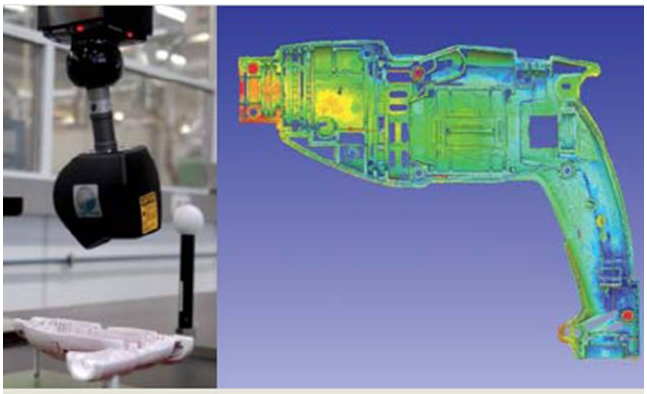
International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) ger länkar [92] till alla stora fabrikörer och utrustningar, både markbundna (Terrestrial Laser Scanning – TLS) samt flygburna.

3.1 Kommersiellt tillgängliga system

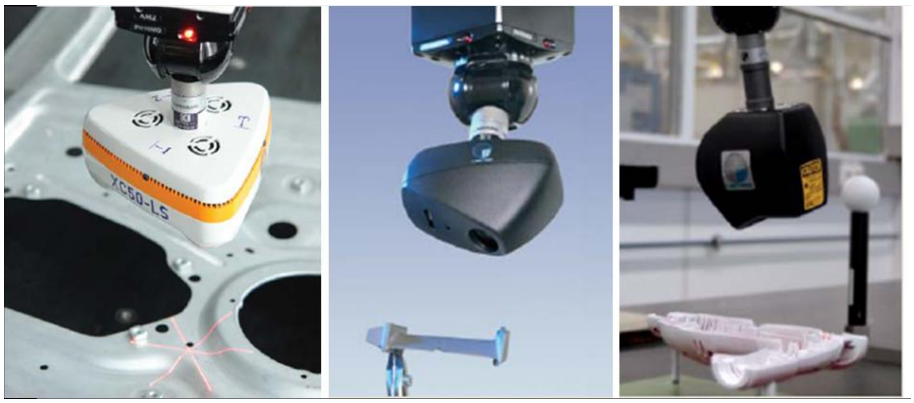
I detta kapitel presenteras en rad system på laserradar och en rad olika parametrar. I många avseenden kan det vara svårt att jämföra olika system fullt ut då det inte finns någon industristandard för de olika parametrar som kan beskriva ett laserradarsystem. Amerikanska NIST (National Institute of Standards and Technology) har påpekat detta [93] men ännu inte fått gehör på sin kritik från fabrikörer.

3.1.1 Triangulerande system

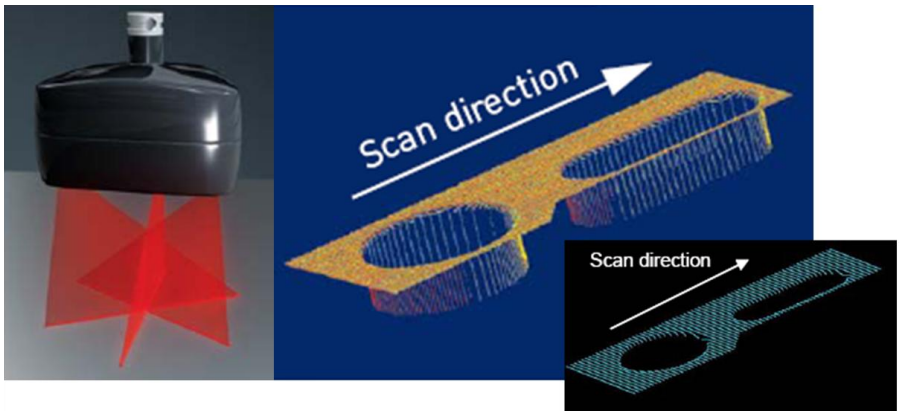
Om en stor detaljrikedom ska återskapas i tre dimensioner är det nödvändigt att mäta på kort distans med en god täthet. Den triangulerande tekniken är den teknik som är den överlägset mest noggranna, ner till µm-noggrannhet. Mätavståndet är i allmänhet från några centimeter till ett par decimeter och dessa system klassas därför som kort-distanssystem. De triangulerande systemen använder mätning av 6 frihetsgrader vilket refererar till rörelse i tredimensionell rymd, nämligen möjligheten att röra sig framåt/bakåt, upp/ner, vänster/höger (rörelse i tre vinkelräta axlar) kombinerat med rotation runt tre axlar (gir, kurs och roll). I de så kallade hybridsystemen arbetar laserenheten ihop med en extern positioneringsenhet (CMM – Coordinate Measuring Machine), där laser tillsammans med CMM sveper runt objektet. Det finns också system som innehåller en mätarm och dessa system kan mäta större objekt som till exempel en bilkaross. Detaljrikedomen från hybridsystem blir mycket stor (Figur 37). Hybridsystemen används inom tillverkningsindustrin för inspektion av tillverkade detaljer; att de håller måtten inom givna toleranser (Figur 37). De används också för avbildning inom medicin och tandvård. Andra områden är arkeologi och konservering. Ett stort märke inom hybridsystem är Metris [94] som producerar flera olika modeller (Figur 38) för olika applikationer. Modellen XC50 är en så kallad korsskanner som innehåller tre skannerhuvuden som skannar 3 laserlinjer från tre vinklar i kors. Korsskanning gör att laserstrålen lättare kan mäta på djupet, till exempel hål (Figur 39). Modellerna LC15 och LC50 arbetar med en laserlinje. Tittar vi på ett par prestandavärden på dessa hybridsystem (Tabell 2) ser vi att mätavståndet är ca 70 mm och noggrannheten 8 till 15 µm.



Figur 37. Detaljrikedomen blir mycket stor vid mätning med ett hybridsystem. Här visas en så kallad toleransanalys av ett hölje till en borrmaskin där olika färgsättning visar på avstånd från given tolerans.



Figur 38. Exempel på hybridsystem från Metris. Från vänster till höger XC50/XC50-LS, LC15 samt LC50.



Figur 39. Ett hybridsystem innehållande tre linjelasrar når även punkter ner i hål. Med en traditionell linjeskanner skulle ett punktmoln enligt den nedre högra bilden erhållas.

Tabell 2. Prestanda på några hybridmodeller från Metris

Modell	**XC50**	**LC15**	**LC50**
Mätpunkter/s	3×6400	19200	19200
Laserlinjens bredd	3×50 mm	15 mm	50 mm
Synfält	3×50 mm	15 mm	65 mm
Mätavstånd	70 mm	65 mm	70 mm
Avståndsnoggrannhet	15 µm	8 µm	15 µm
Laserklass	Class 2	Class 2	Class 2

Det finns handhållna triangulerande system och dessa arbetar i allmänhet ihop med en extern lasertracker som står uppställd på separat stativ. Enheten som mäter är handhållen och arbetar precis som hybridsystemen med 6 frihetsgrader. Ett par exempel på sådana system är Leica[95] T-Scan 840 och K-Scan MMD från Metris[94] (Figur 40, Tabell 3). K-Scan släpptes i september 2007. K-Scan är 8 ggr snabbare än konkurrenten från Leica och den är också betydligt lättare. Uppgifter på upplösning och noggrannhet på avståndet saknas.

Figur 40. Triangulerande handhållna system med trackers. Till vänster Leica T-Scan 840 med tracker LTD706 och till höger Metris K-Scan MMD. (Bilder från Leica och Metris)

Tabell 3. Prestanda på de handhållna triangulerande systemen Leica T-Scan 840 samt Metris K-Scan MMD.

System	Leica T-Scan 840	Metris K-Scan MMD
Våglängd [nm]	785	i u
Laserklass	Class 2	Class 2M
Mätpunkter/s	10000	80000
Laserlinjens bredd	90 mm	200 mm
Mätavstånd	Medel 83 mm	Medel 115 mm
Avståndsupplösning	1 µm	i u
Avståndsnoggrannhet	±30 µm	i u
Min punkttäthet	0,14 mm	i u
Upplösning sida	0,1 m	0,1
Storlek	172x138x80 mm	179,5x75x137,5 mm
Vikt [kg]	1,2	0,395

I år (2007) har den första handhållna enheten som inte behöver någon arm eller extern positioneringsenhet (CMM) släppts på marknaden. Handyscan 3D är en självpositionerande skanner som använder små reflektionsmål som appliceras på den yta som ska skannas (Figur 41, Tabell 4).

Figur 41. Handyscan är den första handhållna enheten som inte behöver någon extern utrustning. Den använder sig istället av små reflektionsmål som syns applicerade på bilen till höger.

Tabell 4. Prestanda på den handhållna Handyscan 3D.

System	**Handyscan 3D**
Laserklass	Class 2
Mätpunkter/s	25000
Mätavstånd	Medel 83 mm
Upplösning (x,y,z)	50 µm
Noggrannhet	40 µm
Storlek	171×260×216 mm
Vikt [kg]	1,25

Gemensamt för alla de triangulerande systemen som hittills har presenterats är att de mäter på ett kort avstånd, upp till enbart ett par dm. Det finns ett par system från Konica Minolta[96], ett av dem är VIVID-9i, som klarar mätavstånd max 2,5m. Systemet (Figur 42, Tabell 5) skannar alltid 680×480 bildpunkter på 2,5 s. VIVID-9i arbetar med tre utbytbara mottagarobjektiv (f=25mm, f=14mm samt f=8mm) och dessa objektiv är avgörande för hur god punkttätheten blir.

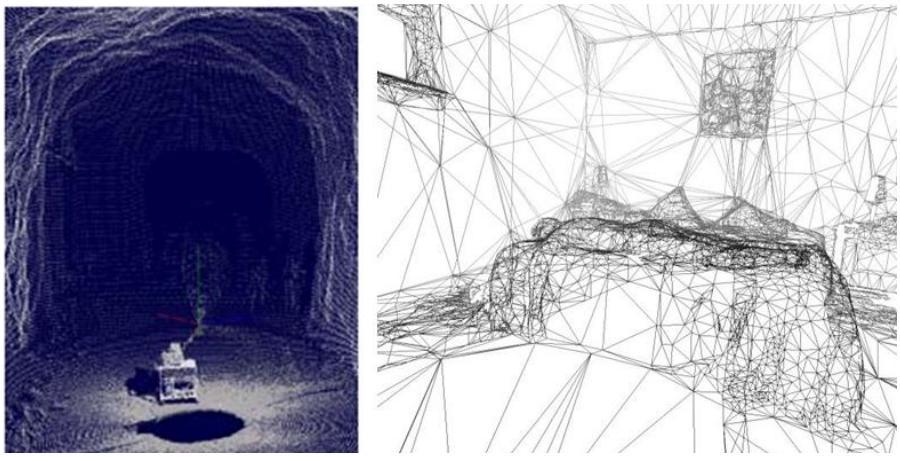
Figur 42. Konica Minolta VIVID-9i. (Bild från Konica Minolta).

Tabell 5 Prestanda på Konica Minolta VIVID-9i.

System	**Konica Minolta VIVID-9i**
Våglängd [nm]	i u
Laserklass	Class 2
Antal bildpunkter	640×480
Tid per skann	2,5 s
Mätavstånd	0,5-2,5
Avståndsprecision	±0,008 mm
Punktnoggrannhet	±0,05 mm
Färgdata	640×480×24 bitars färgdjup
Storlek	221×412×282 mm
Vikt [kg]	15

3.1.2 Fasmätande system

Laserradarutrustningar för medeldistans mäter avstånd med CW-teknik och mäter typiskt på ett avstånd av någon/några dm till några tiotal meter med en noggrannhet ner till ca 3 mm enligt specifikation (10 m avstånd och 80 % reflektion). Med ett sänkt reflektionsvärde försämras noggrannheten till ca 1 cm vilket är mer rimliga siffror i normala mätförhållanden. En CW-skanner är i allmänhet väldigt snabb och samlar in flera hundratusen punkter per sekund. Systemen har ett mycket stort synfält, horisontellt 360° och vertikalt ca 300°. Laserradar för medeldistans av CW-typ används mycket inom gruvnäringen och mätning av tunnlar. Tekniken kommer till sin fulla rätt vid mätning inomhus och då särskilt små ytor beroende på att ett kort minimiavstånd erbjuds, se Figur 43. Laserskannrar av CW-typ används därför till exempel forensiskt vid avbildning av brottsplatser. Några tillverkare av CW-skannrar är 3rdTech Inc [97], Faro [98], Leica [95], Zoller+Fröhlich [99] samt Metris [94].Exempel på några CW-skannrar är (se Figur 44) Faro LS 840/880, Leica HDS4500, Zoller+Fröhlich Imager 5006 samt Metris MV224/260 (Leica har i år, 2007, kommit med en modell som heter HDS 6000 och är i grunden en Zoller+Fröhlich Imager 5006.) Många prestandavärden (Tabell 6) på dessa system är snarlika. Den skanner som sticker ut något framför den andra avseende upplösning och noggrannhet på avståndet är Metris MV224 vilken bygger sin avståndsmätning på en patenterad frekvensmodulering. Avståndsnoggrannheten är fantastiska 0,1 mm, men vi kan också se att den inte är särskilt snabb endast 1000 punkter per sekund. Enbart skannern i MV224 väger nästan 114kg (systemet 200kg) och är anpassad för industribruk och mätning av stora detaljer, medan övriga system är anpassade för fältbruk och väger 13-15kg. Prislappen för dessa system uppskattas från några hundra tusen kr till över en miljon. Metris MV224/260 kostar förmodligen flera miljoner kr.



Figur 43. Applikationer där CW-skannrar kommer till sin fulla rätt är i små trånga utrymmen som gruvgångar eller avbildning av brottsplatser inomhus.

Figur 44. Exempel på laserskannrar som mäter avstånd med hjälp av fasskillnad, från vänster till höger Faro LS880, Leica HDS4500, Zoller+Fröhlich Imager 5006, Metris MV224. (Bilder från respektive fabrikör).

Tabell 6. Prestanda på några laserradarutrustningar baserade på mätning av fasskillnad.

Skanner	Faro LS 840/880	Leica HDS4500 (25m)	Z+F Imager 5006	Metris MV224/260
Våglängd [nm]	785	Infrared	Visuell	632
Laserklass	Class 3R	Class 3R	Class 3R	Class II
Min/max avstånd [m]	0,6-40/76	0,38-25	1-79	1-24/60
Avståndsuppl. [mm]	0,6	i u	0,1	0,035 vid 10m
Avståndsnoggrannhet [mm]	±3 vid 25m	5.5 vid 25m	3 vid 25 m	0,102
Mätpunkter/s	120000	500000	500000	Max 1000
Stråldiameter vid utgång [mm]	3 mm	i u	3	i u
Strålutbredning	0,014°	0,019°	0,012°	i u
Synfält V×H	320×360°	310×360°	310×360°	90×360°
Vinkelupplösning	±0,009°	0,020°	0,018°	0,68μm vid 10m (0.0004°)
Vikt [kg]	14.5	13	14	114

3.1.3 Markbaserade TOF – system

Långdistanssystem klarar i allmänhet av att mäta avstånd från några meter till flera hundra meter och de nyttjar mätning med TOF (Time of flight). Dessa system kommer bäst till sin fulla rätt vid mätning utomhus eftersom de har lång räckvidd (Figur 45). Exempel på några tillverkare av markbundna skannrar (TLS – Terrestrial Laser Scanning) som mäter avstånd med TOF är Optech [100], Rieg l[101], Leica [95] samt Trimble [92]. Alla dessa erbjuder flera olika modeller där de bästa får anses vara Optech ILRIS-36D, Leica ScanStation 2, Riegl 420i samt Trimble GX. Om vi tittar på prestanda (Tabell 7) för dessa system kan vi se att ILRIS-36D sticker ut något avseende max mätavstånd. Observera att mätavståndet är angivet med en reflektion som är mycket stor. Normalt reflekterar exempelvis militära mål 10 till 30 procent vilket drar ner detta avstånd avsevärt. Erfarenhetsmässigt mäter ILRIS bra upp till ett par hundra meter där svar erhålls från de flesta laserskotten. Vi kan också ha i åtanke att dessa system påverkas av väderförhållande. Dis och dimma dämpar drastiskt sannolikheten för detektion. Årets (2007) nyhet från Leica, modell ScanStation 2, är en modell som mäter ca 10 ggr snabbare än sina konkurrenter och även med en noggrannhet som är något bättre än konkurrenterna. Prislappen för dessa system är 1-1,5 Mkr.

Figur 45. Utomhusmiljö från FOI Linköping mätt med Optech ILRIS-3D. Bild FOI.

Figur 46. Exempel på markbundna system som använder flygtidsteknik för att mäta avstånd. Från vänster till höger Optech ILRIS-3D, Leica HDS6000, Riegl 420i samt Trimble GX 3D-skanner. (Bilder från respektive fabrikör).

Tabell 7. Prestanda på några laserradarutrustningar baserade på mätning av Time-of-flight.

Skanner	**Optech ILRIS-36D**	**Leica ScanStation 2**	**Riegl 420i**	**Trimble GX**
Våglängd [nm]	1541	532 (Grön)	NIR	532 (Grön)
Laserklass	Class 1	Class 3R	Class 1	Class 3R
Min/max avstånd [m]	3-1500 (ρ>80%)	Max 300 m vid ρ=90%	2-1000 $\rho\geq$90%	Max 350 vid ρ=90%
Avståndsuppl. [mm]	7	i u	5	i u
Avståndsnoggrannhet [mm]	7 vid 100m	4	10	7 vid 100m
Positionsnoggrannhet [mm]	8 vid 100m	6	i u	12 vid 100m
Mätpunkter/s	2500	Max 50000	11000	5000
Stråldiameter vid utgång	12mm	6mm	10mm	i u
Strålutbredning	0,00974°	i u	0,014°	i u
Synfält V×H	110×360°	270×360°	80×360°	60×360°
Vinkelupplösning	0,00115°	0,0034°	0,0025°	0,00183
Vikt [kg]	13	18,5	16	13

3.1.4 Markbundna system med rörelsekontroll

Inom forskning visades markbundna system monterade på bilar för några år sedan. Det senaste året (2006-2007) har de första systemen introducerats på den kommersiella marknaden. System för mobil laserskanning använder, precis som flygburen laserskanning, 2D-laserskanning tillsammans GPS-system, INS (tröghetsnavigering) och videokamera. Systemen innehåller även en DMI (Distance Meter Indicator). Hela systemet monteras på en dynamisk plattform (bil, tåg, båt etc.) Ett exempel är Streetmapper [102] (Nytt system år 2007, Figur 47,Tabell 8) som använder laser-skannrar (upp till 4 stycken) från Riegl och då den flygburna laserskannern LMS-Q560. Ett annat exempel är Optech som utvecklat ILRIS-3D och som år 2006 kom med en version för rörelsekompensering, ILRIS-3D MC (Motion Compensation)(Figur 48). Hastigheten på de fordon som transporterar plattformen är ännu ganska långsam, 3-5 km/h då en punkttäthet runt 1 cm ska erhållas.

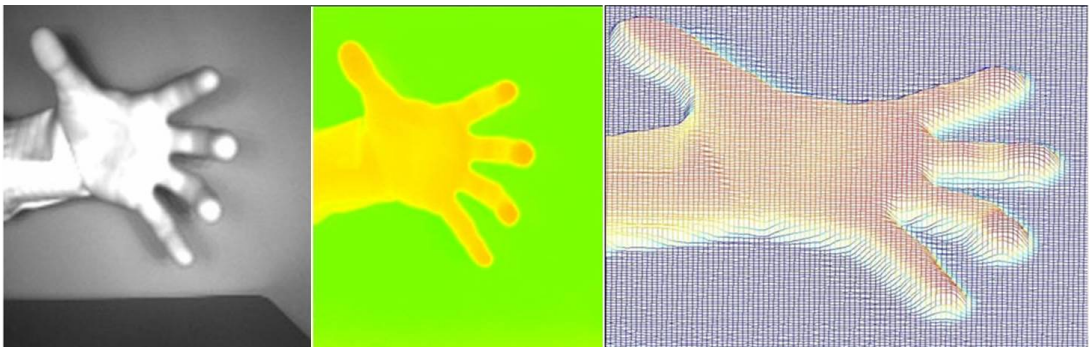
Figur 47. Mobilt kartläggningssystem från Streetmapper. Utrustningen monteras på taket på ett fordon och styrs av en person med PC. (Bilder från 3d laser mapping).

Figur 48. Optech ILRIS-3D med rörelsekompensering. I förgrunden visas från vänster DMI, i mitten GPS-system med dator med positioneringssystem och till höger tröghetsnavigeringsenheten. I bakgrunden visas systemet monterat på ett fordon.

Tabell 8. Prestanda för det mobila systemet Streetmapper.

	Streetmapper
Mätpunkter/s	20000×2 skannrar
Positionsnoggrannhet	5 cm - 1 m (GPS-kvalitet styr)
Punkt till punkt noggrannhet	<3 cm
Mätavstånd	Max 150 m
Synfält	80°

Inom medeldistanssystem har det de senaste åren även börjat produceras bildalstrande avståndskameror innehållande matrisdetektorer för visning och insamling av data i realtid. Endast en laserpuls detekteras av detektorer sittande i en matris. Varje detektor samlar in avstånd och intensitet. Figur 49 visar exempel på intensitet, djupinformation samt en 3-D bild. Tekniken har kommit till användning inom underhållning och video-spel, robotteknik (avkänning var robot befinner sig), automobilt (backvarnare, fot-gängarvarning, kontroll på blinda områden), samspel mellan människa och maskin (projektion och avkänning av tangentbord) och inom medicin- och bioteknik. Figur 50 visar ett par exempel på användningsområden, ansiktsigenkänning vid entré, samt samarbete mellan människa och maskin, avkänning av projicerat fiktivt tangentbord. Här kan nämnas produkter som DP300 Canesta [103] , SwissRanger SR-3000 från Mesa Imaging [94], PMD[vision]® från PMDTechnologies [100]. Se Tabell 9.



Figur 49 Till vänster en intensitetsbild, i mitten en avståndsbild samt till höger en 3D-bild (bilder från Canesta)

Figur 50. Ett par användningsområden med bildalstrande 3D-sensorteknik är ansiktsigenkänning vid passage genom entré och projektion av tangentbord. (Bilder från Canesta).

Figur 51. 3D-kameror för presentation i realtid. Vänster SwissRanger SR-3000, mitten Canesta DP-200 samt höger PMD[vision] 19k Camera.

Tabell 9. Prestanda för några bildalstrande 3-D kameror.

	Canesta DP300	**SwissRanger SR-3000**	**PMD[vision] 19k Camera**
Ljuskälla typ	870 nm	LED	LED
Bildpunkter	132×176	144×176	120×160
Sensor	CMOS	CMOS/CCD	Photon Mixer Device
Bilder per sekund	30	25	10
Synfält	H: 31/80/88°	47.5×39.6°	Max 40°
Djupinformation	>2 mm(DP200)	1% av mätavstånd	>6 mm
Mätavstånd	7,5 m (DP200)	7,5m	7,5m

3.1.5 Flygburna TOF-system

De flygburna systemen används för att dokumentera inom en rad områden. Några exempel är

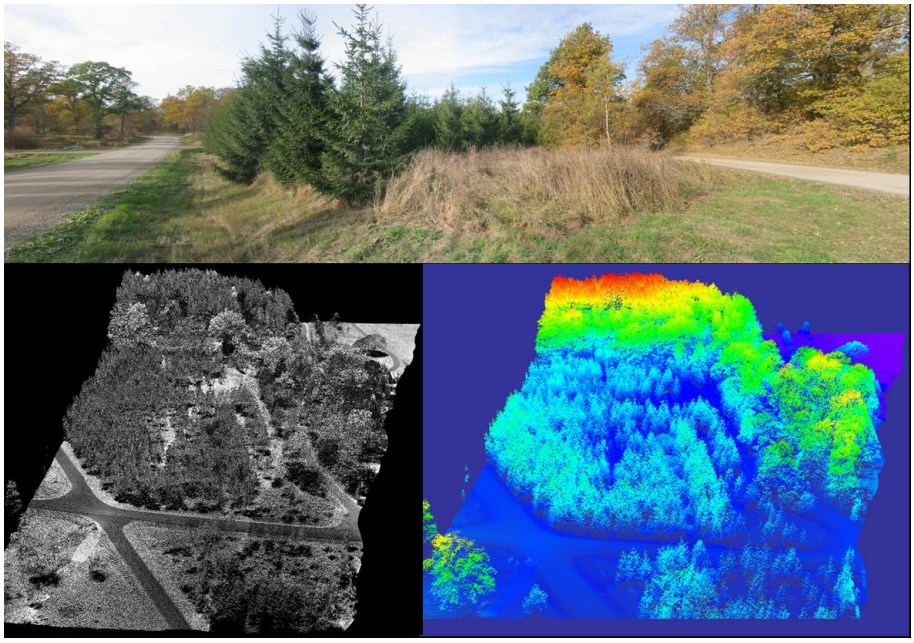
- Översvämningsområden
- Skredrisker (vägar, järnvägar, floder)
- Kraftledningar
- Stadsplanering och modellering (Figur 53)
- Visualisering och simuleringar
- Topografisk kartering
- Underlag för projektering
- Skoglig kartering och vård (Figur 52)

System för flygburen laserradar integrerar flera olika system för att samla in geografisk information:

- GPS
- Tröghetsnavigering (INS)
- Skannande laser
- Digitala bilder

Precis som de markbundna långdistanssystemen använder de flygburna flygtidsteknik (TOF). Skillnaden är att de flygburna klarar att mäta över längre avstånd, från några tiotal meter till flera kilometer. De kan också samla flera påträffade ekon (ytor) från en laserpuls på sin väg ner genom till exempel vegetation eller till exempel en kantträff på ett hustak där laserstrålen även fortsätter ner till marken. Ofta kan dessa system samla in hela vågformen för fortsatt analys. De flesta av dessa system skannar bara horisontellt eller med ellipsoidiska svep, eftersom helikopterns eller flygplanets rörelse framåt sköter avlänkningen vertikalt.

Några exempel på fabrikörer av flygburen laserradar (Figur 54, Tabell 10) är svenska Airborne Hydrography AB (AHAB) [104] som tillverkar AHAB TS 3.5, Riegl som tillverkar LMS-Q560, Leica tillverkar ALS50 och Optech producerar Gemini ALTM.



Figur 52. Data från Tinnerö Eklandskap insamlat med Topeye. Data bearbetade av FOI.

Figur 53. Modell av Norrköping, byggd av FOI och data insamlat med Topeye.

Figur 54. Exempel på flygburna laserradar system. Överst till vänster Leica ALS50, nederst till vänster Optech Gemini ALTM och till höger enbart sensorn för Riegl LMS-Q560.

Tabell 10. Specifikation för några flygburna system.

Specifikation	**AHAB TS 3.5**	**Riegl LMS-Q560**	**Leica ALS50**	**Optech Gemini ALTM**
Flyghöjd	40-1500 m	30-1200 m	Upp till 4000 m	80 till 4000 m
Horisontell noggrannhet	1/5000 × flyghöjd	20 mm	i u	1/11000 × flyg-höjd
Höjdnoggrannhet	<5 cm vid 750 m <10 cm vid 1500 m	i u	i u	5 - 10 cm typiskt
Bitdjup intensitet	12 bitar	16 bitar	i u	12 bitar
Styrning laserfläck	Palmer skanner, Ellipsoid skanner mönster, infallsvinkel 14° till 20°	Roterande polygonspegel, mönster parallell skannlinje	i u	Parallell skannlinje
Bredd synfält	Konstant 0,72×alt	±22,5°	75°	±25°
Laser PRF	50 kHz (max höjd 1500 m) 100 kHz (max höjd 1000 m) 200 kHz (max höjd 500 m)	50 kHz (max höjd 1200 m) 100 kHz (max höjd 1000 m) 200 kHz (max höjd 700 m)	83 kHz	33 till 167 kHz
Våglängd	1064 nm	NIR (Class 1)	800 och 1060nm	Class IV
Vikt (sensor)	approx 50 kg	20 kg	i u	23,4 kg

3.2 Utvecklingen i Sverige, tillverkare, distributörer och användare

Vi har mycket kompetenta både tillverkare och användare inom flygburen laserradar i Sverige. AHAB [104] tillverkar flygburen laserradarutrustning och Topeye [105] flyger dessa system. Topeye ingår i Blom SWE AB där flygresurserna inkluderar 20 st flygplan, 4 st helikoptrar samt 12 leasade flygplan. Många av dessa flygplan används enbart för flygfotografering. Helikoptrarna är troligtvis alla bestyckade med laserradar. Även tyska Toposys [106] flyger i Sverige med sina laserradarsystem Falcon och Harrier. Flygburen laserskanning är riktigt stort i Sverige. Det finns flera företag som utvecklar mjukvara för geografisk IT, Digpro är ett av dessa [107].

De triangulerande systemen inom tillverkningsbranschen finns både på Volvo och Saab. LK Scandinavia AB [108] är återförsäljare i Sverige.

En sökning på webben efter markbunden laserskanning/laserradar etc. i Sverige visar att det fortfarande inte finns särskilt många system i Sverige. Byggföretaget SWECO VBB [44] äger en Zoller+Fröhlich Imager 5003. Byggkonsulterna, WSP [109], säger sig kunna erbjuda laserskanning. Meab-ab [110] verkar ha leasingavtal för att mäta med Leicaskannrar. Byggkonsultföretaget Tyréns [91] säger sig kunna erbjuda laserskanning via underkonsulter. Ett företag i Gävle, 3D Focus [111], utför mätningar med en Leica HDS3000. 3D Scanners Norden AB [112], är återförsäljare av Faroskannrar och även mjukvaran Polyworks.

3.3 Framtida utveckling av laserradarsystem

För två år sedan (2005) undersökte vi den kommersiella laserradarmarknaden och har gjort detsamma alldeles nyligen (2007). Under denna period har utvecklingen gått snabbt framåt.

De triangulerande systemen på kort håll har blivit än mer noggranna och de handhållna systemen har blivit både lättare och kompaktare. I år (2007) har även det första riktiga handhållna systemet utan extern utrustning kommit på den kommersiella marknaden. Mätavståndet har dock inte blivit större och för dess huvudsakliga användning att generera CAD-modeller för olika ändamål finns heller inte detta krav. Ur dessa system går troligen att pressa ur små prestandaförbättringar, men behovet finns snart inte då vi redan pratar om µm noggrannhet. Vi kommer troligen att få se snabbare system. De handhållna systemen kommer troligtvis att utvecklas och bli både lättare och kompaktare.

Medeldistanssystemen (CW) har inte utvecklats så mycket de senaste två åren. Antalet punkter per sekund är runt en halv miljon mätpunkter per sekund för de snabbaste systemen och noggrannheten är under normala mätförhållanden runt 1 cm.

För de markbundna långdistanssystemen har synfältet ökat markant beroende på att separata vyer med mindre synfält läggs ihop till ett större direkt. Numera har ett långdistanssystem lika stort synfält som medeldistanssystemen (CW), dvs. näst intill rundstrålande. Insamlingshastigheten har ökat markant. Ett system, Leica ScanStation 2, samlar in 50000 mätpunkter per sekund. De första mobila systemen med rörelsekompensering har gjort sitt intåg på den kommersiella marknaden och denna teknik kommer att ta över statiska mätningar där möjlighet till förflyttning i realtid ges. Vi kommer säkerligen att se en utveckling både med snabbare insamlingstakt och med

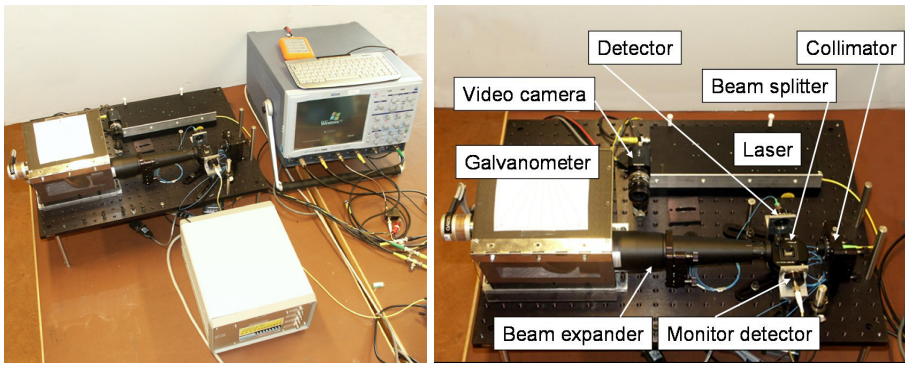
fordon som klarar av att köra snabbare under datainsamling. Dynamisk insamling av data på marken är ett billigt alternativ i förhållande till flygburen laserkartering där så är möjligt.

De flygande systemen blir snabbare och lättare. Vi har sett en sådan utveckling de sista två åren.

3.4 FOIs nya laserskanner – High Performance 3-D Laser scanner

Fabrikörer anger sällan pulslängd. Det är denna parameter som är avgörande för hur väl två ekon från samma laserpuls kan lösas upp. ILRIS-3D har till exempel en puls på 5-6 ns vilket teoretiskt gör att två skilda ekon kan lösas upp med ett avstånd på 1,5 till 1,8 meter. Avstånd kortare än så gör att artefakter (även kallade spökpunkter) uppstår. Leicas HDS3000 erbjuder en puls på endast 500ps vilket teoretiskt gör att 15 cm kan lösas upp mellan två ekon. HDS3000 erbjuder dock endast detektion av det som laserstrålen först träffar. På grund av att vi kände behov av att kunna samla in flera ekon med en kort laserpuls har vi inom projektet tillsammans med MOMS (E3084) utvecklat en egen laserskanner som fått arbetsnamnet **HiPer**; *High Performance 3-D Laser Scanner*.

Systemet består av en laser från Keopsys som genererar en laserpuls om 500ps och max 100mW (Laser Class IV). Kontrollelektroniken har integrerats till en enhet och de optiska delarna har satts ihop på ett bord. Programmering för kontroll av systemet och datainsamling har utförts på FOI Optroniksystem. Operatörens gränssnitt har programmerats i LabView. Hela vågformen samlas in med oscilloskop, LeCroy WavePro 7300A. Omfattande laboratorietest för att optimera och ta reda på systemets prestanda och begränsningar återstår innan systemet kan tas i bruk fullt ut.



Figur 55. HiPer - High Performance 3-D laser scanner. Till vänster hela systemet, undantaget dator och spänningsaggregat, till höger visas den optiska delen.

4 Mätningar och signalbehandling

4.1 Lasersystem

FOI Optroniksystem äger en Optech ILRIS-3D, kallad ILRIS, vilken är föregångaren till 36-D med den skillnaden att den inte har något vridbord. Synfältet är därför mindre på ILRIS-3D (±20°). ILRIS är en av få kommersiella markbundna laserradarsystem som kan samla in sista ekot; det som laserstrålen sist träffar (system från Riegl klarar sista eko också). Detta har gjort att vi har haft en möjlighet att titta på förmågan att penetrera lövverk, kamouflagenät etc. för att detektera skylda mål. ILRIS arbetar med en ögonsäker våglängd, 1,5 µm, vilket har varit viktigt att studera militärt. Med ILRIS mäter vi både struktur och reflektans och en noggrannare systemanalys har gjorts av utrustningen [13].

Vi har också en laserradar Riegl LMS-210i, kallad Riegl, vilken är den första laser-radarindividen som Riegl byggde för den kommersiella marknaden. Vi fick detta system levererat redan år 2000. Systemet är idag gammalt och föråldrat, men används trots det ibland. Senast i år använde vi det vid ett civilt uppdrag då vi mätte Älvestads kyrka utanför Linköping.

Genom det unika samarbetet med Air Force Research Laboratory (AFRL) i USA, har vi haft nära kontakt med upphovsmännen bakom 3D-sensorn *Flash ladar*, se Figur 56. Denna sensor har genomgått ett antal utvecklingssteg, från att först bestå av 32×32 pixlar, med mycket brus och en mycket dålig laser, till att idag vara en state-of-the-art 3D-avbildande sensor med 128×128 pixlar, och med mätkapacitet på upp till flera kilo-meter. Till och med vågformen kan sparas för varje pixel vilket gör data utmärkt för fortsatt analys. Själva systemet utvecklas av Advanced Scientific Concepts på uppdrag av AFRL. Under 2007 såldes även en likadan enhet till Dr. Eberts laserradar-grupp vid FGAN vilket även visar att den är mogen nog att spridas. Vi har nära kontakt även med denna grupp genom flera samarbeten och personliga kontakter.

Figur 56. AFRLs 3D-sensor *Flash ladar*. Nederst syns lasern och kontrollenheten, i mitten optiken som sitter kopplad med detektorplattan (till höger). Överst sitter en videokamera för att få en överblick över mätningen. Komponenten som inte syns är en laptop för styrning och datalagring. Bild FOI.

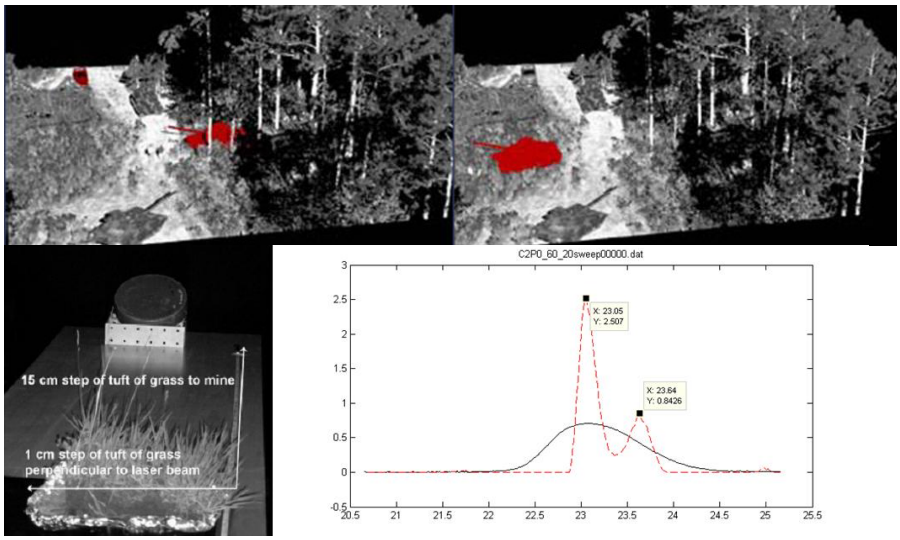
För några år sedan köpte FOI in en kompakt 3D-kamera, DP203, av tillverkaren Canesta Inc, se Figur 57. Denna kompakta kamera (125×60×63 mm) tar bilder (64×64 pixlar) i en takt av upp till 30 Hz, beroende på vald exponeringstiden. Maximalt praktiskt mätavstånd är ca 10m. Den består av en laserbelysare i nära infraröd våglängd, och en kamera med ett CMOS-chip. Den styrs från en vanlig laptop (via USB) där även data lagras. Canesta har senare kommit med en uppgraderad version, som beskrivs i Avsnitt 3.1.4.

Figur 57. 3D-kameran DP203, från Canesta Inc. Denna kompakta kamera (125x60x63 mm) tar avståndsbilder (64×64 pixlar) i en takt av upp till 30 Hz. Laserbelysaren syns till vänster och aperturen till kameran syns till höger. Bild FOI.

4.2 Mätningar

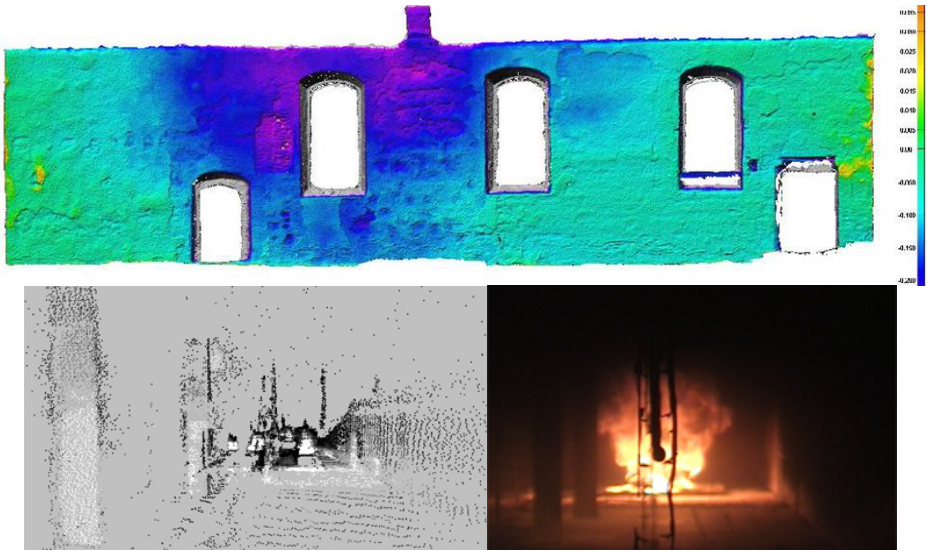
I Bilaga A återfinns en komplett förteckning över de mätningar som genomförts inom projektet, eller i nära koppling till projektet. Ett urval av dessa återges i detta avsnitt. Syftena med mätningar har varit många, exempelvis:

- Stödja utvecklingen och testningen av signalbehandlingsmetoder, se Figur 58.
- Karakterisera reflektansen hos material eller ytor, se Figur 59.
- Mäta penetrationsmöjligheterna genom olika material, där flera varit hemliga.
- Demonstrera användningsmöjligheterna med sensorn, se Figur 60.
- Samla in geometrisk ”ground truth”, se Figur 61.
- Undersöka sensornära datafusion, se Figur 62.

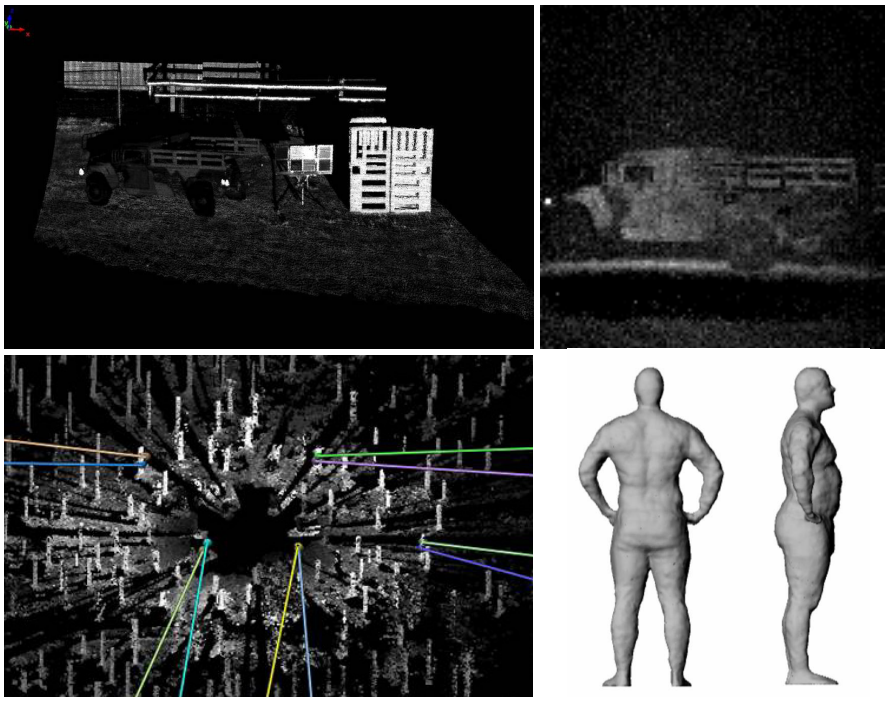


Figur 58. Mätdata har samlats in för att stödja utvecklingen av signalbehandlingsmetoder. Överst data från Huntsville i USA, som användes för att utvärdera en förändringsdetektor. Nederst data för att analysera vågformen i laserekot.

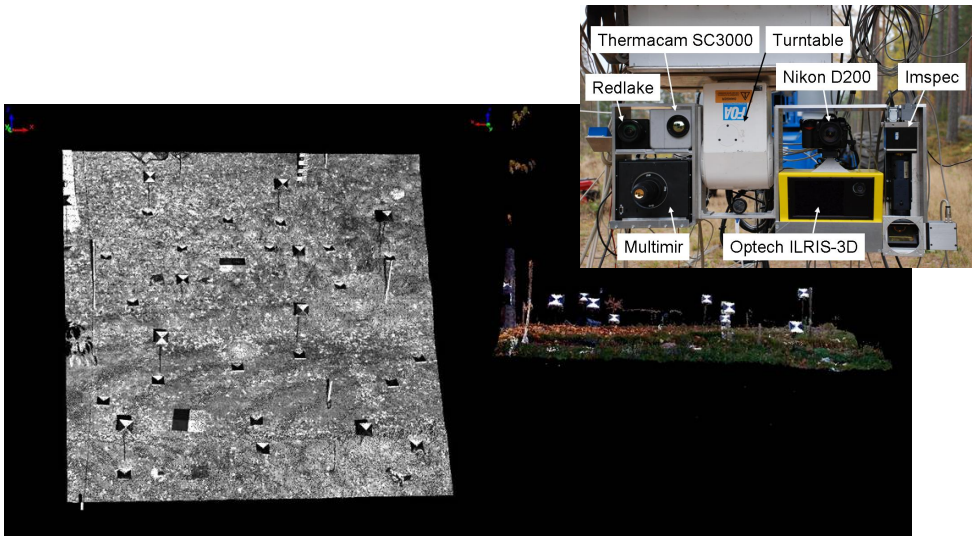
Figur 59. Reflektansmätning av Terrängbil 13, militär kamouflagefärg, vintermiljö samt årstidsvariationerna hos vegetation. Mätsystem ILRIS. Bild FOI.



Figur 60. Exempel på användbarheten med 3D-avbildande laserradar. Överst visas avvikelserna i planhet hos en kyrkvägg, och nederst möjligheten att penetrera eld och rök. Mätsystem ILRIS. Bild FOI.



Figur 61. Exempel där 3D-laserdata använts som geometrisk ground truth. Överst för att analysera prestandan hos AFRLs Flash Ladar, nere t.v. för att verifiera manuell skogsinventering, och nederst t.h. för att ha ett ”facit” inför radarmätningar mot en mänsklig kropp. Mätsystem ILRIS. Bild FOI.



Figur 62. En mätning inom MOMS där data använts till sensornära datafusion. Till vänster intensitetsbild från ILRIS och till höger samma punktmoln, dock i annan vinkel, och med textur från CCD-kameran. Strävan är att kunna koppla ihop data från många av sensorerna i fixturen, se uppe t.h.. Bild FOI.

4.3 Signalbehandling

Inom projektet har vi inventerat tillgängliga signalbehandlingsmetoder och bedömt dem, varav en del har implementerats och utvärderats mer grundligt. De flesta av dessa metoder har redovisats i olika fora under projektets gång [1, 2, 6-9, 12, 14, 15, 18, 20-23, 34, 37, 42, 113, 114], och några utvalda metoder beskrivs kortfattat i detta avsnitt. För fördjupad läsning hänvisas i första hand till [7].

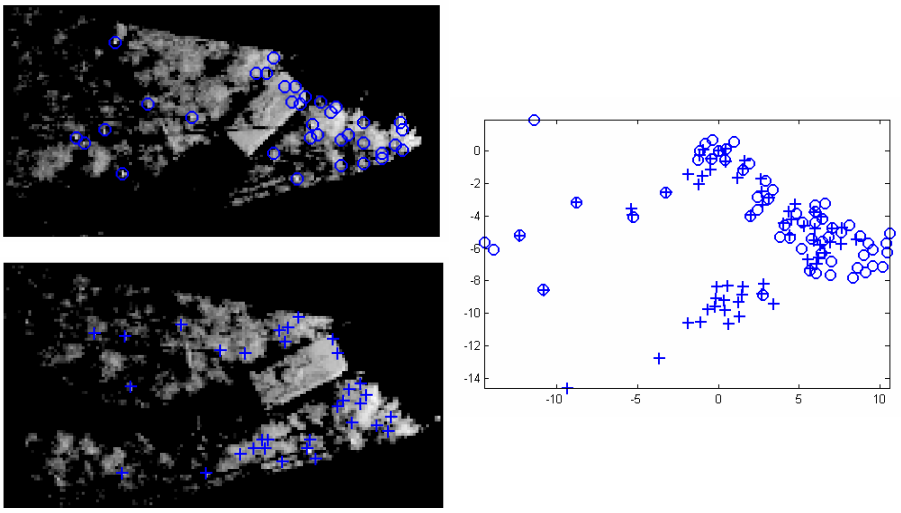
Fokus för signalbehandlingsmetoderna var först att studera måligenkänningsförmågan, särskilt i de fall där den är låg med andra sensorer. Efterhand har det blivit alltmer tydligt att för att nå dit måste många förbehandlingssteg först hanteras. Bland dessa finns registrering, detektering, markestimering och klassificering. För detta arbete har vi utnyttjat tidigare genomfört arbete inom exempelvis taktiskt kartering [115].

En av de största förmågehöjningarna med 3D-avbildande laser är i vegetation, där lasern på ett unikt sätt både penetrerar lövverket och ger hög upplösning. Därför har detta fall varit viktigt att studera metoder för. Som ett första steg ser vi *registreringen* där det handlar om att sammanfoga flera datamängder till ett och att förstå var data befinner sig i ett världskoordinatsystem. Nästa steg är att hitta lokala egenskaper som avviker, och kan vara intressanta *detektioner*. S*egmentering och klassificering* har som mål att ge en övergripande bild av vilka områden i data som hör ihop på olika sätt, exempelvis att hitta marken eller träden. Själva *måligenkänningen* kan ske på många olika sätt, och givetvis kan egenskaperna som användes vid detektionen även användas för måligenkänning. För att förstärka måligenkänningsförmågan kan man även använda information från andra sensorer, så kallade *samverkande sensorer*. Här är det viktigt med bra metoder för att korrekt foga samman informationen.

I urban miljö är kraven annorlunda eftersom de egenskaper som gör att fordon avviker från skogen (bakgrunden) inte är lämpliga att använda i bebyggelse, där exempelvis platta ytor och hörn är vanliga. Andra egenskaper måste undersökas och man inser vikten av att ha en a priori-information vid bearbetningen av data, såsom hur miljön ser ut, eller en mycket noggrann invisning. Den största påverkan att förflytta sig från terräng till urban miljö sker på detektions-, segmenterings- och klassificeringsområdet, medan registreringen och själva måligenkänningen inte påverkas nämnvärt. Men för att få ett system att fungera praktiskt måste den ointressanta informationen rensas bort i rådata, så att måligenkänningen enbart utförs på relevant data. Detta är ett svårt problem p.g.a. svårigheterna att definiera vad som är ointressant. Viktigaste anledningen är att öka robustheten och i möjligaste mån undvika falsklarm. Måligenkänning är ofta en beräkningstung process som man bara vill göra på få, relevanta datamängder.

4.3.1 Registrering

Registreringen handlar om att globalt få en vetskap om vart data hör. Dels kopplingen till exempelvis RT90-systemet, men även kopplingen till andra datamängder insamlade på ungefär samma plats. Det förstnämnda löses till stor del genom ett GPS/INS-system, som idag är en given komponent i alla kvalificerade sensorsystem. Trots detta finns det fortfarande en så pass stor osäkerhet i position att två insamlade datamängder inte kommer att överlappa perfekt. Om man då direkt överlagrar dem, kommer den mätosäkerhet som redan fanns i respektive datamängd att öka drastiskt. Lösningen på detta är att man iterativt kan ”testa” att sätta samman två datamängder och beräkna hur mycket de avviker, följt av en mindre justering av deras relativa position, se Figur 63. Ifall man inte har en bra initial gissning kan man först använda sig av en grov injustering baserad på exempelvis träd, väggar, eller andra tydliga objekt. För mer information hänvisas till [2, 7, 34].



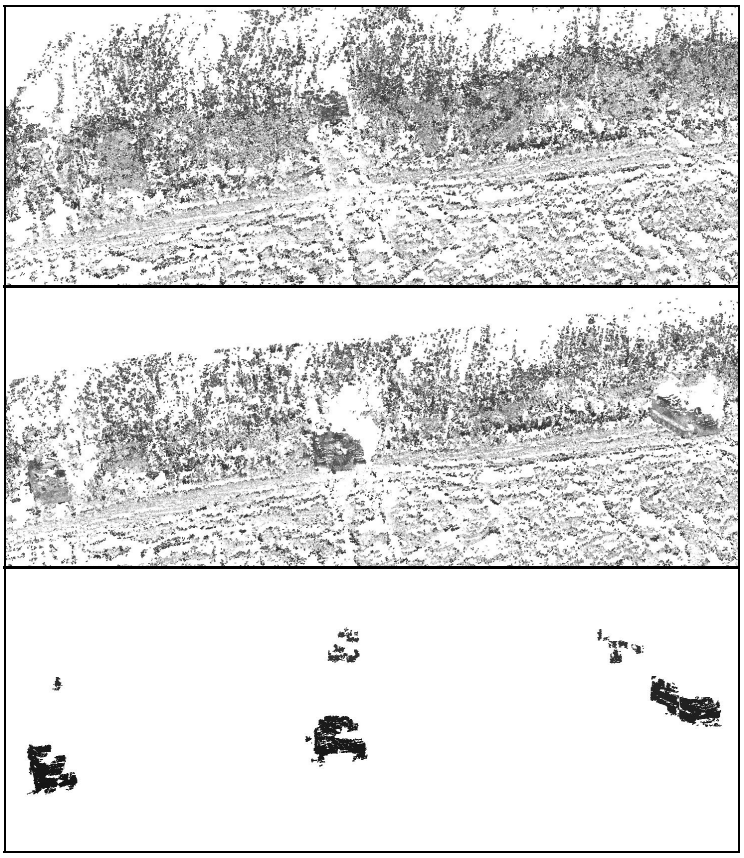
Figur 63. Till vänster visas två vyer av samma område. Färgmarkeringarna visar identifierade nyckelpunkter (robusta punkter i scenen) med vars hjälp man kan justera bilderna så att de helt överlappar varandra. Efter registreringen överlappar nyckelpunkterna enligt bilder till höger. Axlarna är i meter. Bild FOI.

4.3.2 Detektering

Detekteringen handlar om att hitta lokala egenskaper som kan användas för att identifiera olika kategorier av objekt såsom träd, ytor, mark, hörn etc. Ena delen av området är inriktat mot att hitta robusta egenskaper som verkligen ger en bra skiljelinje mellan det intressanta och det övriga. Den andra delen består i att hitta en algoritm som kan registrera dessa egenskaper. Några olika intressanta egenskaper [7, 42] är:

- *Platthet i lokala regioner*
  En ovanlig egenskap i naturen, men vanlig på exempelvis fordon. Denna kan undersökas med exempelvis Hough-transform och spinn-bilder.
- *Förändring i punkttäthet mellan två datamängder*
  Efter registrering av två datamängder kan man jämföra den lokala punkttätheten mellan dessa. Principen baseras på en volymcellindelning av scenen och att man undersöker antalet punkter inom respektive cell Ifall något objekt har flyttat sig märkts det tydligt eftersom ett antal ekon ”byter cell”, se Figur 64. Metoden är känslig för olika aspektvinklar och avstånd.
- *Lokal avståndsvarians*
  Ifall man betraktar varje kolumn i en avståndsbild från ett mark-till-mark-system kommer avståndet normalt öka stort från nederkant till överkant på bilden. Ifall detta inte sker har vi funnit ett träd, fordon eller annat som avviker från marken. Metoden fungerar mindre bra vid höga aspektvinklar och vid tät undervegetation.
- *Hörn, kanter och andra distinkta lokala geometrier*
  Ifall vi letar efter en uppsättning former, så kan vi finna de som är mest avvikande i en miljö. Spinn-bilder är en bra, men tyvärr beräknings-krävande, sådan metod.
- *Avvikelsen från en skattad markyta*
  Ifall man först skattar markytan, vilket lätt låter sig göras med 3D-data, kan man exempelvis använda höjden över marken som viktig informa-tion för vidare analyser.

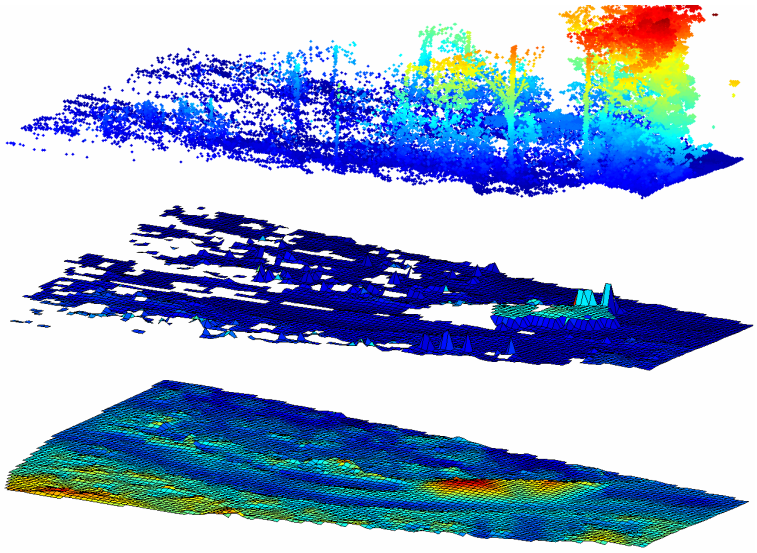
För att förstärka metoderna att upptäcka dessa egenskaper, kan man kombinera egenskaper. Exempelvis kan man kombinera höjden över marken med den spektrala reflektansen på objekten, se mer i avsnittet om samverkande sensorer.



Figur 64. Exempel på förändringsdetektion. De två registrerade datamängderna överst i bilden jämförs och en tydligt avvikande punkttäthet visar precis var de tre militärfordonen är placerade. Principen baseras på en volymcellindelning av scenen och att man undersöker antalet punkter inom respektive cell. Bild FOI.

4.3.3 Segmentering and klassificering

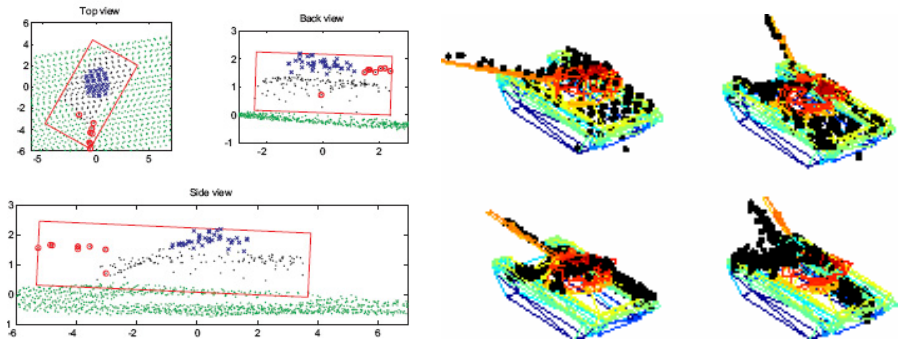
Segmenteringen och klassificeringen är snarlik detekteringen, men fokus ligger i att kunna dela in samtliga mätpunkter i ett antal olika kategorier, i lite större skala än detekteringen. Många av detekteringsprinciperna kan användas här, men dessutom tillkommer några metoder såsom markskattaren, se Figur 65. En enkel träddetektor har också visats fungera väl. Nästa steg ligger i att kombinera dessa detekterade egenskaper och dra mer långtgående slutsatser om vilken kategori en mätpunkt tillhör. Exempelvis kan man definiera ett träd som en kombination av stam (ett ganska platt kluster av vertikala tätt liggande punkter med exempelvis minst 2 meters höjd från marken) och trädkrona (ett ”brus av mätpunkter” över ca 1 meters höjd). Målet med detta steg är ofta att ofta att kunna frilägga ett antal mätpunkter som är intressanta för fortsatt analys, exempelvis måligenkänning. Ett annat mål är att kunna lämna ifrån sig ett bra kart-underlag eftersom såväl marken som träd och byggnader är identifierade och lokaliserade.



Figur 65. Illustration av markskattning. Färgen illustrerar höjden över marken. Överst visas rådata, i mitten visas en gles markstruktur som ett delresultat, och nederst visas den slutliga täta markmodellen. Bild FOI.

4.3.4 Måligenkänning

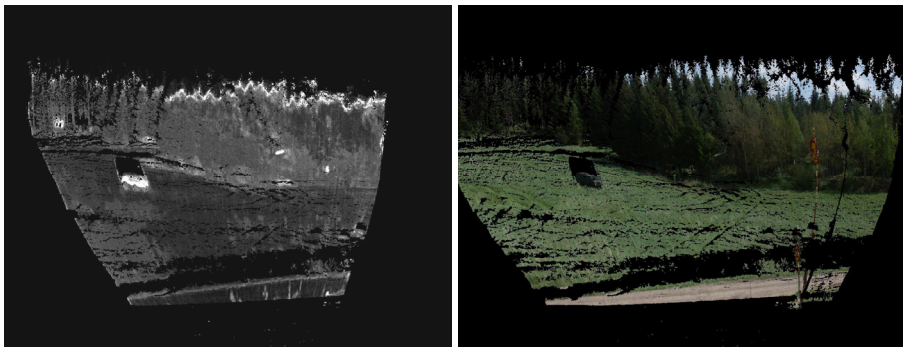
Det slutgiltiga målet är ofta att kunna känna igen detekterade och i mätdata isolerade objekt. Man kan exempelvis använda en indelning i objektstyp såsom bil, lastbil, flygplan, båt eller mer detaljerat; bandfordon, hjulfordon, torn med eller utan eldrör. Med dessa metoder behöver man inte veta exakt vilka objekt man letar efter, men man får samtidigt mindre specifika svar. Ett alternativ är att veta vilka objekt man letar efter och, utgående från beskrivningar av dessa mål (till exempelvis CAD-modeller), jämföra med mätdata. Då är man känslig för fel i sina beskrivningar, men man kan också få ett mer tillförlitligt svar i sin måligenkänning. Ifall man saknar en modell av det som finns i mätdata, vet man med dessa metoder dessvärre istället inte alls vad det kan vara. En kombination verkar rimligt att utnyttja. Inom projektet har exempelvis rektangelskattning under-sökts, där man beräknar den rektangel som omsluter objektet för att erhålla bästa skattningen av målets dimensioner, och sedan kan jämföra med en databas över olika fordon, se Figur 66. Som en vidareutveckling på denna kan man dela in objekten i flera delar såsom chassi, hytt, torn, eldrör, och nå en bättre måligenkänningsgrad. Mer information kan erhållas i [1, 7, 14, 15, 23, 113, 114].



Figur 66. Matchningsresultat. Till vänster visas den minsta rektangel som omsluter en stridsvagn (T-72). Data är från TopEye. Till höger har fyra olika mätdatamängder (svarta punkterna) matchats mot artikulerade CAD-modeller av T-72. Bild FOI.

4.3.5 Samverkande sensorer

Under 2006 påbörjades en verksamhet som strävar till att kombinera heterogena sensordata (som kommer från olika typer av sensorer). I ett första steg har samtidiga mätningar genomförts med 3D-laserradar och hyperspektral sensor. Utgående från ett antal gemensamma kalibreringspunkter (som syns tydligt i båda sensordatamängderna) kan sensorerna kalibreras geometriskt. Dessa punkter kan antingen vara utplacerade referenser, men även lätthittade naturliga positioner i scenen kan användas, såsom träd, vägkorsningar och stenar. Denna kalibrering görs redan när systemet sätts samman, så att den geometriska kopplingen (extrinsiska kalibreringen) mellan sensorerna blir känd. Med hjälp av denna kalibrering kan man sedan överlagra färginformationen från de registrerade kamerorna på 3D-datan enligt Figur 67. Exemplet visar den hyperspektrala anomalibilden till vänster och ett digitalkamerafoto till höger. Notera de vita fläckarna i vänsterbilden, eftersom de visar på avvikande material som upptäckts av den hyperspektrala kameran, men som inte syns i digitalkameran. Dessa kan sedan fungera som lämplig invisning för en mer högupplöst sensor, exempelvis en högupplöst 3D-laserradar. Inom detta område har följande rapporter producerats [6, 9, 12, 37, 41].



Figur 67. Tredimensionella vridbara punktmoln (Ströplahult V, Kvarn) färglagda med information från andra sensorer. Till vänster färglagd med anomalivärden från den hyperspektrala kameran och till höger färglagd med RGB-värden från digitalkameran som var monterad ovanpå laserskannern. Bild FOI.

5 Fysikaliska och instrumentella gränser

Några för alla tillämpningar gemensamma och intressanta grundläggande frågeställningar är:

- Var går gränsen för upplösning (vinkelupplösning samt avståndsupplösning och avståndsnoggrannhet)
- Vilken upplösning krävs för olika tillämpningar
- Vilka parametrar förutom 3D bör registreras
- Hur tät ”skyl” kan man se igenom?
- Räckvidd/uppdatering kontra apparatstorlek och effektbehov.
- Hur små och kompakta kan systemen bli?

5.1.1 Upplösningsgränser

Avståndsupplösningen för ett pulsat ladarsystem ges av uttrycket:

$$\delta R = \frac{c}{2B} \approx \frac{c\tau}{2} \qquad (1)$$

Där c är ljushastigheten och B vågformens bandbredd och τ pulsbredden. Man inser problemet med den elektroniska begränsningen för hög upplösning. Exempelvis för δ=1 cm, behövs τ<63 ps eller B>15 GHz. Denna typ av bandbredd är knappt tillgänglig hos dagens detektorer eller digitizers. Samtidigt måste pulsenergin var relativt hög för att få räckvidd vilket för extremt korta pulser leder till mycket höga toppeffekter. Detta blir opraktiskt bl.a. på grund av skaderisken på komponenter etc. Idag ligger gränsen för konventionell pulsad ladar vid pulslängder på ca 0,5 ns. Det finns emellertid flera andra sätt att upp nå hög upplösning utan att komma i konflikt med elektriska bandbredds-begränsningar. Några av dessa är AM eller FM-CW teknik där man omvandlar mätningen från tidsplanet till att mäta fas eller frekvens. En annan möjlighet är att snabbt ändra polarisation eller fas under en puls och omvandla avståndsmätningen till ett problem att mäta intensitet. Detta är exempelvis vad som görs vid omvandling av en serie GV-bilder (GV = Gated Viewing = Grindad avbildning [116]) till 3D.

Upplösningen hos GV-system med svepbar gatelucka[2] ges av:

$$\delta R \approx \frac{c\sqrt{T_{step} \cdot \sigma}}{2} \qquad (2)$$

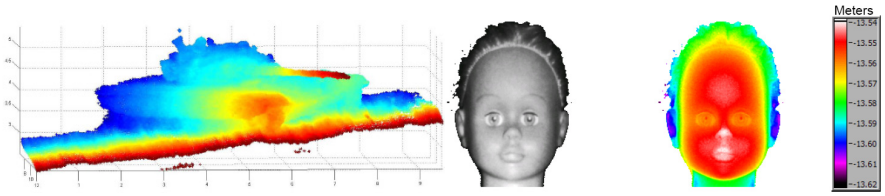
där T_{step} är gateluckans steglängd och σ^2 variansen i tidsfluktuationerna hos laserpuls och gatelucka ($\sigma^2=\sigma^2_{gate}+\sigma^2_{puls}$). Denna varians reduceras med medelvärdebildning över flera frames. Med gatesteg och fluktuationer i storleksordningen 0,1 ns blir upplösningen enligt [117] 1,5 cm. Notera att om man samplar tätt i vinkelled relativt objektets 3D-struktur så är avståndsnoggrannheten mer relevant än upplösning eftersom man jämför avstånd i angränsande pixlar.

Avståndsnoggrannheten är i allmänhet mycket bättre än upplösningen och ges i allmänhet av

[2] Ett GV-system består av en pulsad laser och en mycket snabb slutare som ser till att exponera kamerachippet enbart för reflektioner från ett visst mätavstånd, s.k. gatelucka.

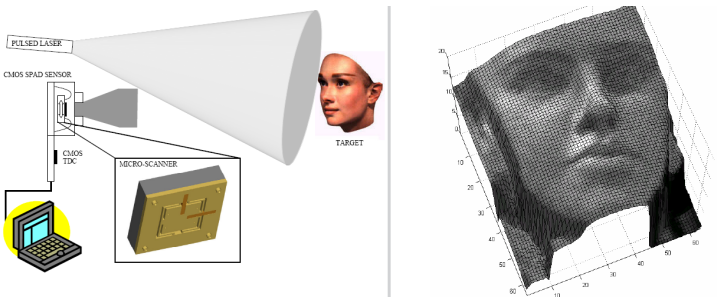
$$\sigma_R \propto \frac{\delta R}{\sqrt{N_{avg} SNR_1}} \qquad (3)$$

där SNR_1 är signalbrusförhållandet vid en mätning och N_{avg} är antalet mätningar över vilken medelvärdesbildning sker. Avståndsnoggrannheten (precisionen) kan bli 1 mm eller bättre. Exempel på system som uppnått mm-precision är den faskodningsteknik som användes av Buck et al. [74], GV-system (Busck et al. [117] samt Figur 68) och TCSPC (Time correlated single photon counting, Sjöqvist et al. [118]).



Figur 68. Exempel på 3D-rekonstruktion från GV-bildsekvenser. Betydligt bättre avståndsnoggrannhet och upplösning kan erhållas än vad som ges av gateluckan respektive laserpulsens längd. Vänsterbilden från Andersson [119] och bilden till höger från Busck et al. [117].

I TCSPC tekniken används SPAD (Single Photon Avalanche Detector) och avstånds-noggrannheten bestäms av kanalbredden och gittret i tidsbestämningen. För SPAD-matriser ligger dessa i ps-området som resulterat i mm-noggrannhet, se Figur 69. Man bygger upp ett svar genom att medelvärdesbilda ett större antal pulser, så laserkällornas prf ligger i kHz-MHz området. Nyligen uppnåddes 1 mm precision på 13 km avstånd [120] med 0,1 sekunders integrationstid i fullt dagsljus med TCSPC tekniken.



Figur 69. Att avbilda ett ansikte på 3,75 m med 1,3 mm noggrannhet. (Niclass et al. [121]).

Spektral avståndsmätning som diskuteras av Marron [74] har en upplösningsgräns enligt

$$\delta R = \frac{\lambda^2}{2\Delta\lambda} \qquad (4)$$

Med exempelvis $\Delta\lambda=\lambda$ erhålles en avståndsupplösning = λ ! Notera att detta gäller utan inverkan av turbulens som kan störa fasbilden. Tekniken har demonstrerats på laboratoriet men inte så vitt vi vet på längre avstånd.

Vinkelupplösningen δθ för en konventionell ladar ges av:

$$\delta\theta = \max(\lambda / D, d_{pix} / F) \qquad (5)$$

För λ=1,5 μm och D=15 cm ger detta en diffraktionsgräns på 10μrad. För att matcha detta krävs F=1 m och 10 μm pixelstorlek. Tio μm kommer troligen att vara en praktisk pixelstorlek inom de närmaste åren. Selexdetektorn har t.ex. 24 μm-pixlar och SPAD-matriser har hittills haft ca 25 μm pitch. MIT:s Geigermod detektor har 100 μm pitch.

För syntetisk aperturlidar (SAL) gäller formel (5) med tolkningen att D betyder den syntetiska aperturdiametern D_{synt}. I detta fall kommer pixelstorlek/fokallängd att vara begränsande utav λ/D_{synt}.

Turbulens och målinducerade speckler kommer att begränsa både noggrannhet och upplösning i såväl vinkel som avstånd. För vinkelupplösning gäller att

$$\delta\theta = \frac{\lambda}{\min(r_0, D)} \qquad (6)$$

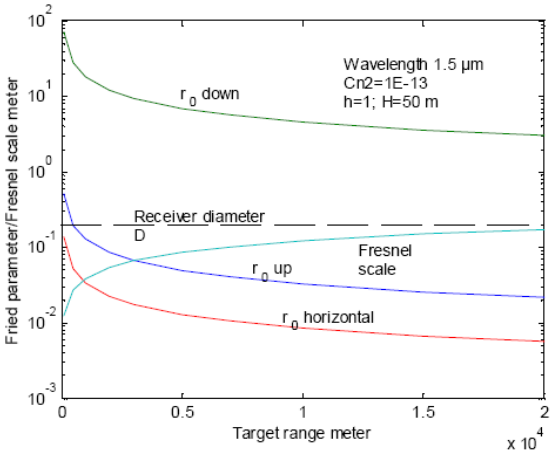
För avståndsnoggrannheten och upplösning är det svårare att ge ett konkret uttryck för försämringen till följd av turbulens. Bl.a. kommer turbulensen att göra laser-belysningen ojämn i målet. Målet kommer att generera speckler som kopplar till turbulens på återvägen. Korrelationslängden r_0 för amplitudfluktuationerna ges av:

$$r_{0,svag} = 2.1 \cdot \sqrt{\lambda L} \quad (\text{svag turbulens, } \sigma^2_{lnI}<2) \qquad (7)$$

$$r_{0,stark} = \frac{0.76\sqrt{\lambda L}}{(\sigma^2_{Rytov})^{3/5}} \quad (\text{stark turbulens, } \sigma^2_{lnI}>2) \qquad (8)$$

Där L är sträckan till målet , $\sqrt{\lambda L}$ är Fresnelradien och $\sigma^2_{Rytov} = 1.23 \cdot C_n^2 \cdot k^{7/6} \cdot L^{11/6}$. För en plan våg gäller att logvariansen σ^2_{lnI} är = Rytovvariansen σ^2_{Rytov}.

Figur 70 visar hur r_0 varierar med avstånd för en markbunden sensor som tittar horisontellt respektive till ett mål på 50 meters höjd samt en flygburen sensor på 50 meters höjd. Vi ser att för den flygburna sensorn på bara 50 meters höjd är turbulensinverkan ringa (r0>>D). Det blir betydligt sämre för en markbunden sensor som tittar uppåt eller horisontellt. Stark turbulens nära marken har antagits (dagtid). En sensor med diameter på 20 cm har lagts in som referens.

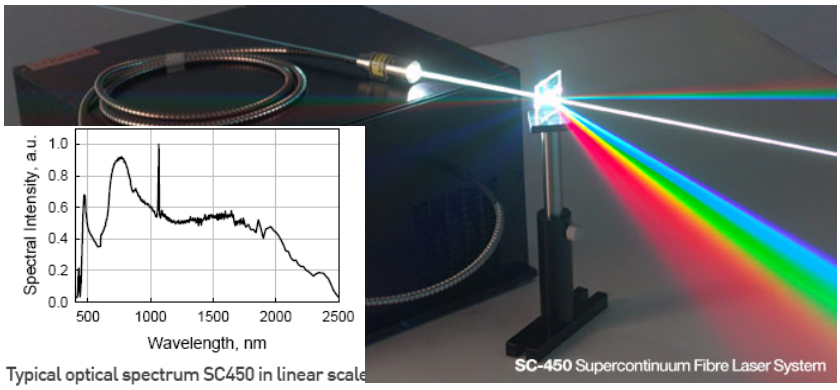


Figur 70. Fried's parameter r_0 samt Fresnelradien $\sqrt{\lambda L}$ för sneda och horisontella banor. Notera att för en flygburen sensor på bara 50 meters höjd är turbulensinverkan ringa (r0>>D). Det blir betydligt sämre för en markbunden sensor som tittar uppåt eller horisontellt. Stark turbulens nära marken har antagits (dagtid). (Steinvall et al. [122]).

Specklestorleken i bildplanet är av storleksordningen $\lambda F/r_0$. Speckler kan vara begränsande för bildkvaliteten. Det gängse sättet att reducera speckler är medelvärdesbildning över flera frames. En annan möjlighet erbjuder "vitljuslasern" d.v.s. en spektralt breddad laser. Multivåglängdslaser kan även användas för att reducera turbulensfädning inom atmosfärskommunikation med laser [123]. Senare tids utveckling bl.a. på fiber-lasersidan har lett till utvecklingen av så kallade vitljuslasrar (Tabell 11, Figur 71). Dessa har hög prf, korta pulser (ps) samt hög medeleffekt (flera W). Andra koncept för bredspektrala lasrar har involverat fs-laser och OPO-teknik. Nyligen presenterades förbättringen i bildkvalitet genom att använda bredspektrala lasrar för grindad avbildning vid 1,5 µm [73].

Tabell 11. Fabrikantens (Fianium) specifikation för några olika varianter av vitljuslasrar, se Figur 71.

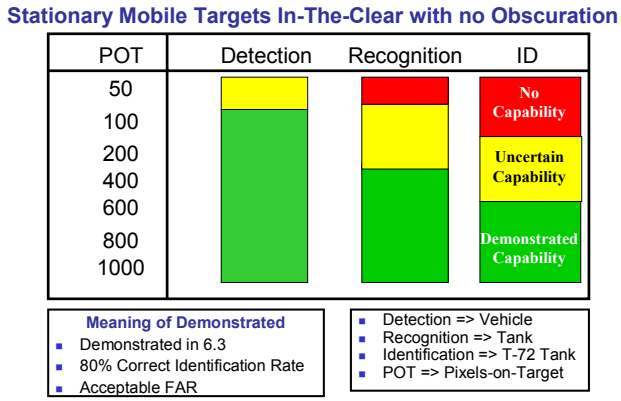
Parameters	Unit	SC450-2	SC450-4	SC450-6
Spectral bandwidth	nm	450-2500	450-2500	450-2500
Spectral flatness	dB	‹ 6		
Master source pulsewidth	ps	5		
Repetition rate	MHz	20	40	50
Average power	W	2	4	6
Spectral density	mW/nm	› 1	› 2	› 3
Power consumption, max	W	‹ 100		‹ 200
Dimensions (W x L x D)	mm	300 x 250 x 120		
Weight	kg	4.5		



Figur 71. Supercontinuum laser (“white light laser”) baserad på en passivt modlåst fiberlaser och fiberförstärkare. Till vänster ses utsänt spektrum. Från firma Fianium. I en tillämpning kan den visuella delen naturligtvis filtreras bort.

5.1.2 Upplösning för olika tillämpningar

Det är viktigt att analysera vilken upplösning som krävs för olika tillämpningar inte bara för att kunna bedöma prestanda utan även för att optimera ett system visavi kostnad, storlek och vikt. State of the art för 3 år sedan var att sannolikheten för korrekt identifiering var P_{id}=80% med en falsklarmssannolikhet P_{fa}=20%. Man bedömer läget idag som P_{id}=90% och P_{fa}=10%. Tabellen i Figur 72 ger status för 3-4 år sedan beträffande uppnådda resultat med 3D-ladar.



Figur 72. State-of-the-art för 3D-ladarns förmåga till automatisk detektion, klassificering samt identifiering av fordonsmål. POT= Antal pixlar på målet. Källa: NTO ATR working group.

Harney [124] har via en informationsteoretisk ansats visat att ladar med samma optiska apertur och våglängdsområde samt 5 avståndsceller över målet ger en räckviddsökning för måligenkänning med en faktor 2,7 jämfört med termisk IR.

5.1.3 Parametrar förutom 3D

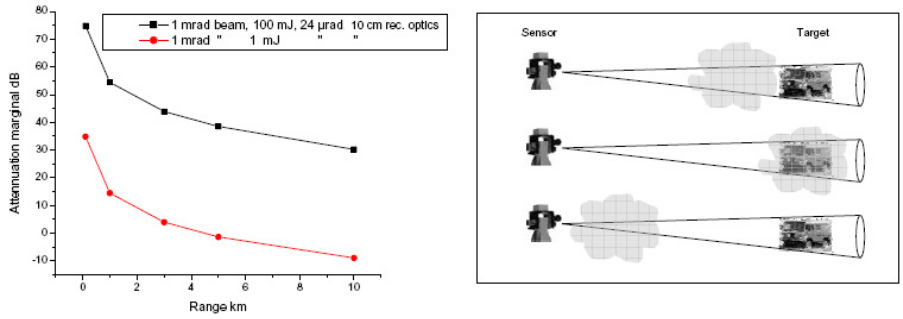
Den parameter som är enklast att utnyttja är intensitet som motsvarar reflektionsegenskaperna i mål och bakgrund. Laserreflektion kan utgöra en stark invisande parameter för t.ex. optiska sensorer, billyktor, vajrar, stolpar som alla uppvisar stark reflektion vid våglängden 1,5 µm eller därunder. Med multivåglängdslaser eller ”vitljuslaser” kan man göra aktiv spektral avbildning och således få ”färg på natten”. Detta bör vara en attraktiv möjlighet för spaningsystem som kan detektera anomalier vilka därefter sonderas med högupplöst 3D-ladar. Samma resonemang kan gälla för polarisation. Liten depolarisation kan ofta vara en indikation på människotillverkade föremål.

5.1.4 Skylens täthet

Jordens yta täcks till ca 23 % av skog och till stora delar även av moln. För både militära och civila ändamål är det av största värde att kunna se (=avbilda) igenom vegetation och moln eller annan skyl som kamouflage, tält, rånarmasker, grumligt vatten och kläder, även om dessa skyl är heltäckande. Om denna avbildning kan utföras vid optiska våglängder erhålls till skillnad från radarteknik (Carabas och liknande system) en möjlighet till direkt måligenkänning genom högupplöst avbildning i tre dimensioner med mm-cm-upplösning. En optiskt högupplösande sensor kan med stor fördel kombineras med radar för att förena stor yttäckning och detektion med snabb måligenkänning.

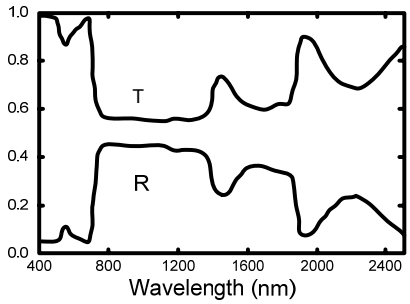
3D-avbildning ”genom vegetation” har hittills demonstrerats internationellt samt vid FOI. Denna avbildning utnyttjar dock de ”hål” i vegetationstäcket som ofta förekommer, en heltäckande avbildning av ett föremål i sådan miljö kräver oftast multipla vyer, något som är tidsmässigt och databehandlingsmässigt krävande. Hur stor täckningsgrad som kan klaras av beror till stor del vilka krav för antalet punkter på målet som krävs liksom av möjligheten att utnyttja flera vyer. Ett riktvärde är 90-95% täckning i skylet och 5-10 vyer för en god täckning på målet. Detta är relevant för 10-20 cm samplingstäthet. MIT [125] har demonstrerat mycket god måligenkännings-förmåga (P_{id}=99%, P_{fa}<0,01%) för mål med denna typ av samplingstäthet både för mål öppet samt under vegetation och kamouflagenät.

En uppfattning av hur mycket rök, moln och dimma eller vegetation som man kan se ”rakt igenom” kan enkelt fås om man tittar på ”energibudgeten” för ett ladarsystem t.ex. ett GV system vid 1,5 µm. Det framgår av Figur 73 att 40-60 dB dämpning är en rimlig siffra för ett system som tittar på 2-5 km avstånd.



Figur 73. Uppskattning av dämpningsmarginalen för ett GV system vid 1,5 µm som tittar genom rök eller moln. Utanför molnet har klart väder antagits. Brus ca 10 elektroner rms under gatetiden. T.h. olika scener avseende molnets placering. Mittenfallet torde vara svårast att avbilda utan inverkan av molnets spridning. (Steinvall et al. [62]).

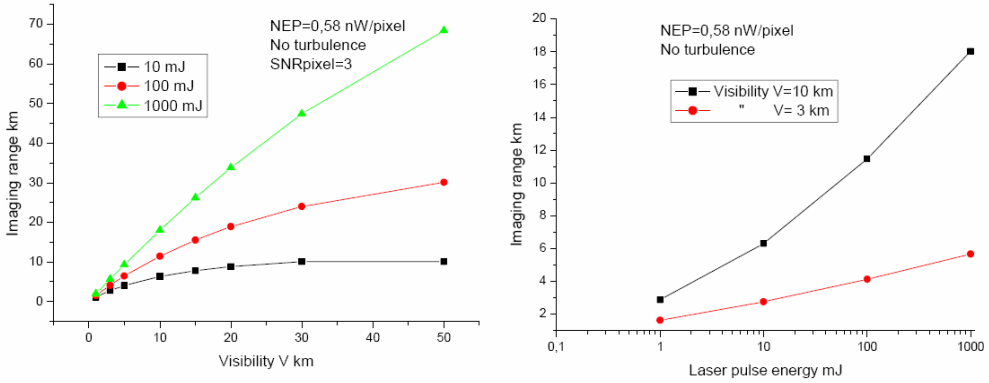
Ny laserteknik med ultrakorta laserpulser (sub-ns/ps/fs) samt singelfoton-känsliga, ultrasnabba matrisdetektorer (exempelvis SPAD) eller snabba grindbara bildförstärkare ger nya möjligheter med optisk avbildning, nämligen att se igenom ”direkt igenom” löv och dylikt. Man utnyttjar då de fotoner som gått raka vägen från sensorn och tillbaka till mottagaren (de så kallade ballistiska fotonerna) för att tidsgrinda bort de som spritts (gått längre eller kortare väg). Metodens tillämpbarhet för ladar undersöks för närvarande bl.a. inom US Air Force. Eftersom löv i princip har en transmission kring 50% för våglängder i NIR området (Figur 74) så finns en viss sannolikhet att detektera fotoner som gått ned och upp genom en eller flera blad. Det bör alltså i princip vara möjligt att se rakt igenom vegetation.



Figur 74. Transmission och reflektion genom ett poppelblad. (Jacquemond et al. [126]).

5.1.5 Räckvidd/uppdatering kontra apparatstorlek och effektbehov

Ladarsystemets storlek bestäms i huvudsak av apertur samt av laserns storlek. I en tidigare översikt över 3D-ladartekniken finns ett antal systemkoncept genomräknade [127]. Räckviddens beroende av visuell sikt och laserenergi har illustrerats i Figur 75 från [49]. I figuren har 20 cm apertur antagits som en typisk övre gräns för en rimlig apertur.



Figur 75. Räckvidd för ett 3D-system med 20 cm optik, matrisstorlek 256×256 element med 25 µm pitch, NEP=0,58 nW (nära shot noise gränsen 0,4 nW) och 15 cm avståndsupplösning. Laserpulsenergi och visuell sikt har varierats. Våglängd 1,5 µm. I övrigt se [49].

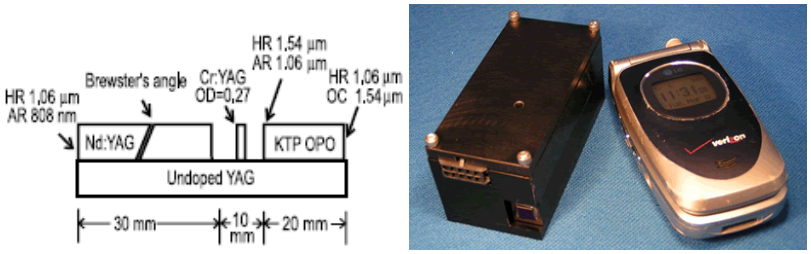
Skalning till andra aperturer, laserenergier och känsligheten kan lätt göras om med skalar med faktorn

$$F = \frac{E_p A_r}{NEP}, \qquad (9)$$

där E_p är pulsenergin, A_r mottagararean samt NEP är brusekvivalent effekt vi aktuell bandbredd. Uppdateringshastigheten (bildfrekvensen) är proportionell mot laserns medeleffekt och för höga medeleffekter (> 1 W) kommer kylningen att ta visst utrymme. Figur 76 indikerar storlek för utrustning i klassen 1,5-2 km räckvidd.

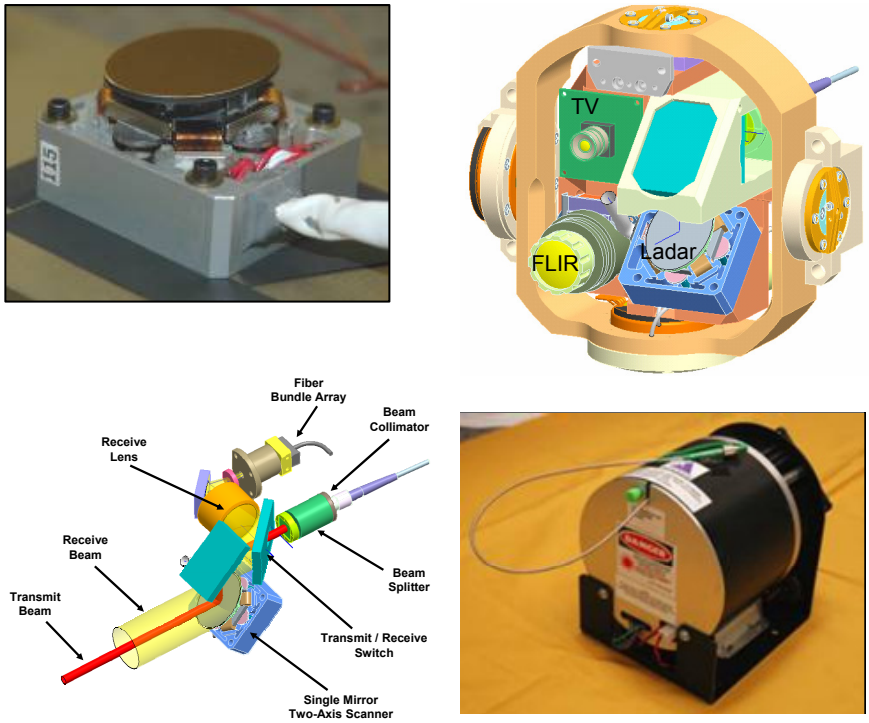
Figur 76. T.v. 3D-ladar vid 1,5 µm från Advanced Scientific Concepts, ASC [107]. Matrisstorlek 128×128 element, bildhastighet 30 Hz, vikt 6 kg, elektrisk effekt 400 W. Lasern är luftkyld. Trolig pulsenergi 10-20 mJ/puls. T.h. kameramodul utan laser.

Kompakta lasrar kan framställas baserade på diodpumpade kristall-lasrar eller fiberlaser. Den så kallade monoblocklasern kan göras mycket kompakt [96, 128], se Figur 77.

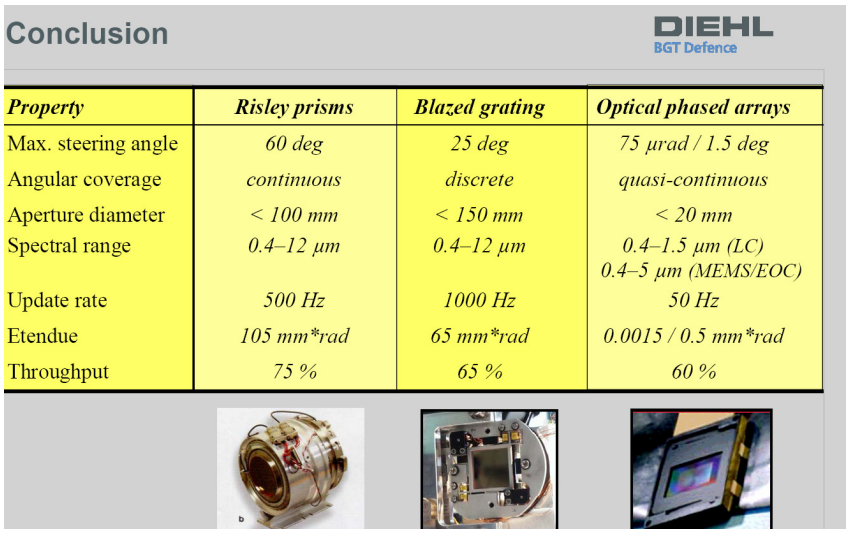


Figur 77. Monoblocklaser (1,5 µm) kan göras mycket kompakta (t.h. lasern tillsammans med en vik-telefon) och avge pulser i klassen 10 mJ vid 10 Hz eller mer. Från [96].

Fiberteknik är fördelaktigt för att bygga kompakta system. Fibrer kan leda både sändar-effekt och mottagarsignal så att stor frihet erhålls för att göra en kompakt konstruktion. Även om 3D-FPA är den långsiktigt intressanta utvecklingen för 3D-ladar behövs ofta skannerteknik för att kunna erhålla en tillräckligt stor vinkeltäckning (field of regard). Kompakt skannerteknik inkluderar galvanometerskanners (se Figur 78) förutom Risley prismor, gittersystem samt optisk fasstyrd skanning (SLM). Figur 79 visar state-of-the-art för några av dessa tekniker.



Figur 78. Exempel på kompakta ladarteknik för målsökare. Ladaraperturen är 2,5 cm. Överst t.v. tvåaxlig skanner, överst t.h. målsökarhuvudet. Undre raden t.v. systembeskrivning av ladar samt t.h. fiberlasersändaren. Källa ARMDEC USA.



Figur 79. State-of-the-art för kompakt skannerteknik för ladar. Källa BBGT Diehl.

6 Prestandautvärdering i militära tillämpningar

Ett av projektets mål har varit att värdera nyttan av 3D-avbildande lasersensorer i militära tillämpningar. Det finns inga givna metoder för värdering av 3D-avbildande lasersensorer varför en stor del av arbetet har varit att utveckla värderingsmetoder. På grund av projektets begränsade resurser har vi valt att fokusera på några tillämpningar och för att kunna värdera sensorernas nytta i dessa tillämpningar har vi valt några scenarion. I dessa scenarion kan vi beskriva sensorernas nytta för de tillämpningar som vi valt. De metoder för värdering som vi tagit fram och använt är generella och kan användas för andra tillämpningar och i andra scenarion. Vi har strävat efter att beräkna prestanda men i en del fall saknas relevanta mätdata och i andra fall har ekonomiska begränsningar hindrat oss men då har vi istället fört ett resonemang kring prestandan.

I detta kapitel beskrivs först de scenarion som valts ut att vara de första värderingstillämpningarna. Eftersom en förutsättning för den beräkningsmässiga värderingen är att komplett täcka in hela kedjan från sensor till detektionsprestanda beskrivs därefter den kedjan av algoritmer som använts.

6.1 Scenariobeskrivning

När projektet planerades 2004, var ett fokus användning av 3D-avbildande system för att förbättra måligenkänningsförmågan av mål i svåra omgivningar, där svår avsåg tät vegetation. Sedan dess har försvarsmaktens intressen delvis förändrats mot urban miljö, vilket inneburit helt nya förutsättningar för prestandavärderingsarbetet. Dessutom är det inte den svenska stadsmiljön som tilldrar sig det största intresset utan en blandning mellan rural och primitiv urban miljö i fjärran regioner, områden där vi inte har tillgång till mätdata. Vi har därför, för att kunna fortsätta bygga upp rutiner för prestandavärdering, valt att bibehålla scenariot *fordon i (svensk) vegetation* som en utgångspunkt för de beräkningsmässiga värderingarna, se exempelvis Figur 80. Vi har i denna utvärdering ignorerat de enklaste fallen, såsom fordon på öppet fält, eftersom det inte skulle tillföra något i denna analys. Några exempel på scenarier visas i Figur 81.

Figur 80. Denna sidovy visar mätdata från Huntsville (Avsnitt A.13). Sensor har sett data från övre högra hörnet av bilden. Trots den täta skogen och den sneda infallsvinkeln har vi fortfarande många mätdatapunkter på stridsvagnen, i ellipsen nere till vänster. Bild FOI.

Figur 81. Bilderna visar exempel på scener som valts för utvärderingen. Bild FOI.

En ännu viktigare fråga rör sensorvalet vid mätningarna och vårt mål att ha en sensoroberoende metodik för dataanalys. Genom projektets många internationella kontakter har vi god tillgång till data från olika sensorer ute i världen, men då vi i denna värdering har behövt ground-truth har vi varit starkt begränsade till i de flesta fall enbart ILRIS.

6.2 Värderingsmetodik

I kapital 6 har vi valt att värdera sensorsystemets förmåga att hitta och känna igen eller identifiera mål. Problemet kan delas in i två delar, först att detektera målen som finns i scenen och ange deras position och sedan att kunna beskriva målen, t. ex. att ange fordonsklass, om det har hjul eller band, om det har eldrör etc.

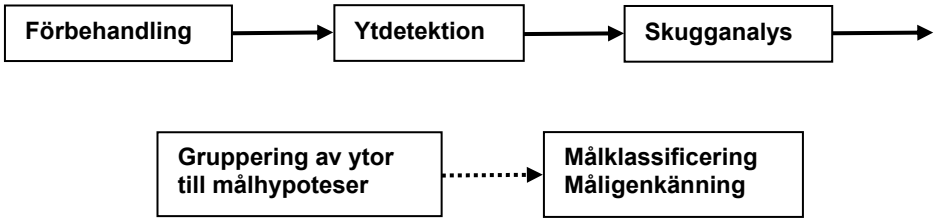
En bra detektionsmetod har hög sannolikhet för detektion av samtliga mål och samtidigt låg sannolikhet för felaktiga (falska) detektioner. Detektionsförmågan kan värderas genom att placera ut fordon med kända egenskaper i en scen och mäta in deras position. Uppgifterna om de kända målen jämförs sedan med resultatet från sensorsystemet och detektionsfrekvens, falsklarmsfrekvens och förmåga att känna igen målen beräknas.

Metodens prestanda kan beskrivas med ROC-kurvor (eng. ROC: receiver operating characteristics) [129]. På ROC-kurvor presenteras statistiken för korrekt måldetektion som en funktion av statistiken för falsk måldetektion. Värderingsmetoden är väl etablerad och ger en god översikt över det utvärdera systemets prestanda. Såsom vi valt att göra utvärderingen kommer parametrar från mätsystemet, från den aktuella mätsituationen och den valda detektionsmetoden att påverka resultatet. Ur teknisk/ taktisk synvinkel behöver det inte vara negativt, eftersom alla dessa parametrar samverkar vid en operativ användning. Sensorsystemets prestande beror både på sensorn och på de detektions- och måligenkänningsalgoritmer som används. Det finns inga givna algoritmer som ger bäst resultat.

För att avgöra om man har en korrekt måldetektion eller inte, har gått vi igenom 30 mätningar och för hand definierat vilka delar av data som tillhör målet och vilka som tillhör bakgrunden (icke-mål). Resultatet från detektionsmetoden jämförs sedan med detta ”facit”. Eftersom facit görs för hand, introduceras små fel i detta steg och perfekt

måldetektion utan felklassificeringar är i princip omöjligt. Om man gör utvärderingen på syntetiska/simulerade data kan klassificeringen av mål/bakgrund göras mer exakt. Vi anser att det trots allt är mer intressant att göra utvärderingen på registreringar från fältförsök, för att det efterliknar mer den tekniska/taktiska användningen. Det är dessutom svårt att göra simuleringar av tillräckligt hög kvalitet.

6.2.1 Vald detektionsmetod



Figur 82: Den analyserade detektionsmetoden.

Detektionsmetoden består av olika steg, se Figur 82. De enskilda stegen beskrivs mer utförligt i 4.3 och i [7]. Under förbehandlingen beräknas vilka punkter som tillhör marken och dessa tas bort. Även felaktiga punkter, s.k. outliers, tas bort. I yt-detektionen söks hela datamängden igenom efter ytor som kan tillhöra tillverkade objekt (såsom fordon). Eftersom vi letar efter fordon i naturen, till skillnad från urbana miljöer, är släta ytor normalt sällsynta. Storleken på ytorna varieras i värderingen nedan. Oftast resulterar ytdetektionen i några falska detektioner. Man bör dock notera att en rejäl datareduktion görs i detta steg. Ett objekt med en viss utbredning och höjd genererar en skugga. I nästa steg i detektionsmetoden kräver man att ett troligt mål ska, förutom att ha några släta ytor, ha en skugga bakom sig relativt sensorn och dessutom rimliga intensitetsvärden. En del felklassificerad bakgrunds-data korrigeras i detta steg. I det sista steget grupperas de återstående ytorna ihop till troliga mål. En grupp av ytor ska vara placerade nära varandra för att bli sammanfogade till en grupp. Måtten som används i detta steg är grova, eftersom man vill kunna detektera delvis dolda mål.

6.3 Värderingsresultat

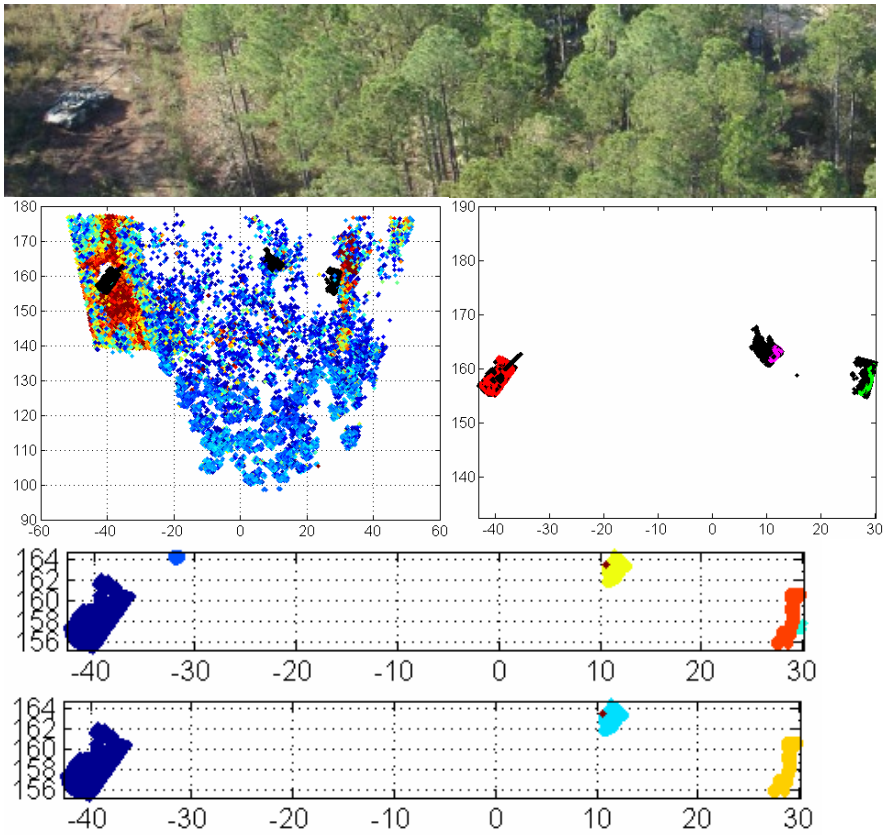
Av de 30 testade scenerna resulterade 26 i att mål detekterades, i många fall fanns några falska måldetektioner också med. För fyra fall återstod inga troliga mål efter ytgrupperingen, trots att de fanns i scenerna. I 17 scener genereras många målhypoteser för varje testad parametersuppsättning. Vi börjar med att visa resultat från två av de trettio scenerna, resultaten av systemutvärderingen och den valda detektionsmetoden sammanfattas därefter.

6.3.1 Två exempel

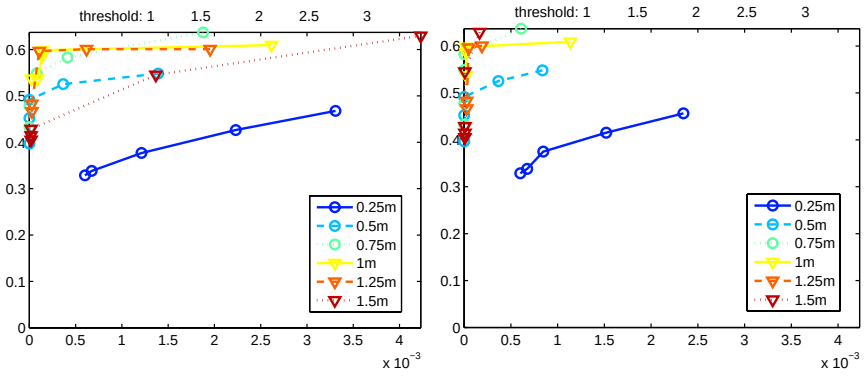
I den första mätningen, gjord i Huntsville (Avsnitt A.13), finns tre fordon i scenen; en T72:a på en grusväg och två M60 som står bakom en skogsridå, se Figur 83. Alla tre fordon detekteras, de falska målen från ytdetektionssteget filtreras bort senare i detektionen. För ROC-kurvorna, Figur 84-Figur 85, ser man att antalet falska mål-detektioner minskar under bearbetningens gång. Alla mål detekteras, men antalet korrekt klassificerade sampel (pixlar/voxlar) på målet är lågt jämfört med facit, därför blir den högsta detektionssannolikheten bara 65%. I ROC-plottarna finns det flera olika kurvor, dessa härrör från olika parametersättningar i ytdetektionen. I ytdetektionen väljer man hur stora områden som man ska leta efter ytor i, kallat partitionering och

valen visas i rutorna i figurerna, och man väljer hur stor utbredning en yta får ha, väljs med en tröskel (eng. threshold) vars värden visas ovanför graferna.

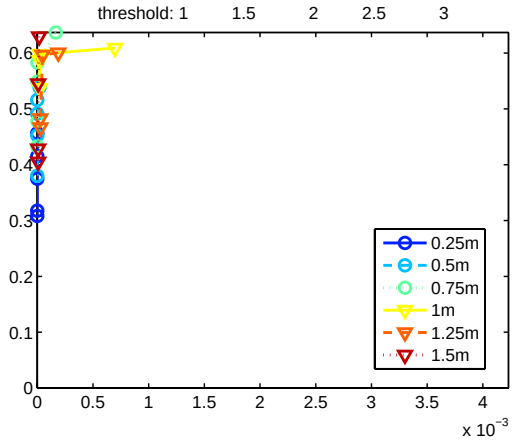
För T72:an detekterades data från större delen av karossen, vilket gjorde det intressant att gå vidare med målklassificering och måligenkänning, se Figur 86 och [14]. I målklassificeringen skattas fordonets dimensioner och jämförs med en måldatabas, storleken stämmer på några decimeter när med den modell av T72:a som finns. I målklassificeringen identifierades tornet. Vid matchning med CAD-modeller av T72, M60, BTR80, MTLB, ZSU23 och M113, erhålls bäst match med T72-modellen. För data från M60 detekterades endast delar av karossen, vilket gör det svårt att skatta storleken korrekt, se Figur 87.



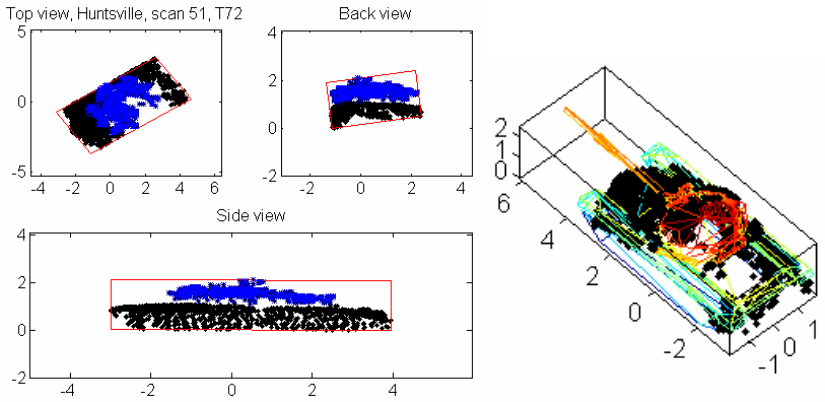
Figur 83: Detektion av fordon på väg och i skog. Till vänster finns en T72 på en grusväg, bakom skogen finns två M60 (högra delen av bilden). Överst: foto från mätplatsen. Nedanför, vänster: laserradar-registrering av scenen, fordonen är svartmarkerade, höger: resultat av detektionen. Näst underst: resultat av ytdetektionen, några falska mål finns med. Underst: resultatet efter skugganalys, de falska målen har tagits bort. Axlarnas enhet är meter.



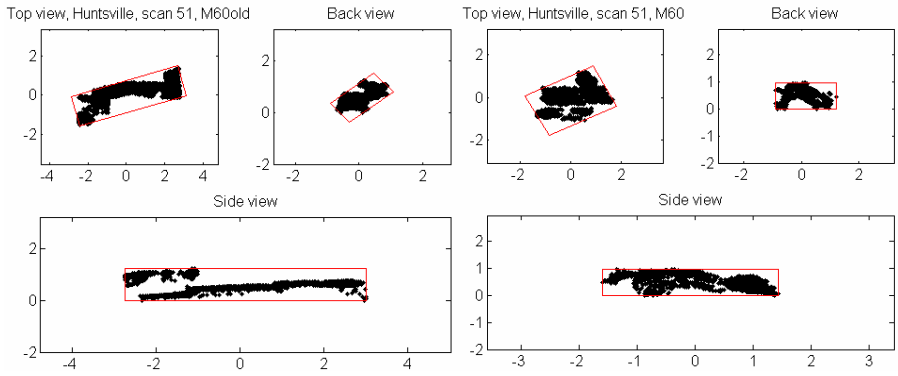
Figur 84: ROC-kurvor efter ytdetektionen (vänster) och skugganalysen (höger). Horisontell axel: antalet falska måldetektioner, vertikal axel: antalet sanna måldetektioner jämfört med facit.



Figur 85: Slutlig ROC-kurva. Horisontell axel: antalet falska måldetektioner, vertikal axel: antalet sanna måldetektioner jämfört med facit. Antalet falska detektioner är små och antalet korrekta klassificeringar är lågt p.g.a. av att många sampel inte detekteras, även om målen har detekterats.

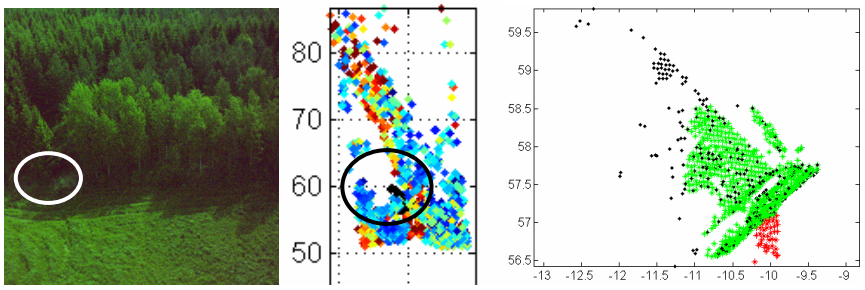


Figur 86: Exempel på klassificering och måligenkänning av T72. Vänster: skattning av storlek och identifiering av tornet. Höger: matchning med CAD-modell av en T72. Axlarnas enhet är meter.

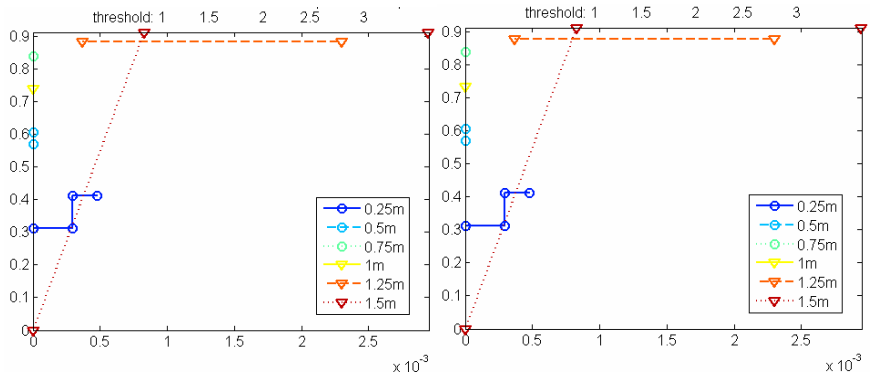


Figur 87: Skattning av storlek för de två M60. endast delar av fordonen har detekterats och storleksuppskattningen misslyckas därför. Axlarnas enhet är meter.

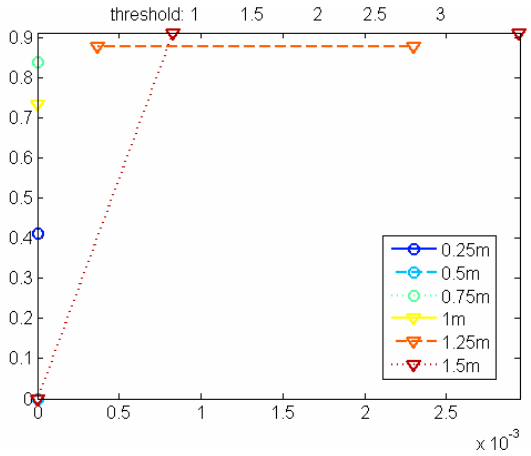
I den andra mätningen, från Kvarn 2006, finns en TGB11 bakom en gran i skogskanten. På de bilder som finns från försöket skymtas bara delar av fordonet. Tillräckligt mycket laserstrålar penetrerar dock terrängmasken och den delen av fordonet som är riktad mot sensorn (fronten) detekteras väl, se Figur 88. För vissa parameteruppsättningar i ytdetektionen detekteras drygt 90% av måldata korrekt samtidigt som det är få falska måldetektioner, se Figur 89-Figur 90.



Figur 88: En tgb11 inbackad i skogskanten. Vänster: foto, mitten: laserradar-registrering av scenen, höger: resultat av detektionen, svarta prickar är facit och de färgade stjärnorna är detekterade sampel.



Figur 89: ROC-kurvor efter ytdetektionen (vänster) och skugganalysen (höger). Horisontell axel: antalet falska måldetektioner, vertikal axel: antalet sanna måldetektioner jämfört med facit.



Figur 90: Slutlig ROC-kurva. Horisontell axel: antalet falska måldetektioner, vertikal axel: antalet sanna måldetektioner jämfört med facit. Antalet falska detektioner är små och antalet korrekta klassificeringar är högt för denna mätning, de flesta sampel på målet har detekterats korrekt.

6.3.2 Resultat

Projektet har nu utvecklat en metodik för att jobba med värdering av laserradardata. Metoden är välkänd och visar sig fungera bra, ett ramverk finns implementerat. Metoden är ganska ”sträng” eftersom den jämför antalet sampel på målet mot facit, snarare än om man detekterat den del av data där målet finns. Det drar ned detektionssannolikheten i de resultat som presenteras. En fråga som inte är fullt utredd forskningsmässigt är hur stor del av målet som måste detekteras för att få en bra grund för målklassificering.

Värderingen visar att det är fullt möjligt att detektera fordon även i svår terräng. Ju mer skog, desto större ytor ska man leta efter i ytdetektionen. Generellt erhålls bättre resultat om man tittar snett nedåt på scenen jämfört med från sidan, detta blir extra tydligt om fordonet är placerat i tät skog.

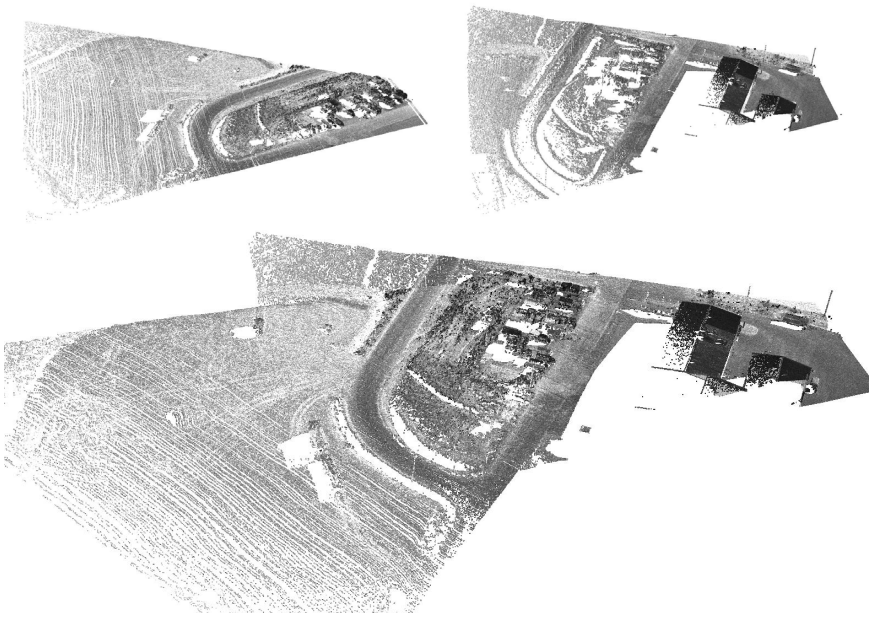
För många fall genereras många målhypoteser för varje parameterval. En del hypoteser består av ytor som är detekterade på fordonet, men det finns också (falska) målhypoteser som består av bakgrundsdata eller en blandning av mål- och bakgrundsdata. För att kunna välja ut de mest troliga hypoteserna måste detektionsmetoden kompletteras med en efteranalys innan ev. målklassificering tar vid. Förbehandlingen kan också förbättras genom att den trädstamsdetektor som finns utvecklad används även här. Då försvinner troligen en del av de ytor som inte hör till fordonen.

6.4 Aspekter på urban miljö

Övriga intressanta militära scenarier inkluderar exempelvis rural och urban miljö. Även i dessa miljöer bidrar 3D-avbildande laserradar med avståndsdiskriminering, dygnsoberoende, långa mätavstånd och hög upplösning. Dock får mätningar i dessa omgivningar konsekvenser för den automatiska dataanalysen. Egenskaperna som gör att ett fordonsmål avviker från omgivningen blir mindre, och delar av analysen blir svårare. Ifall man betraktar signalbehandlingsstegen som redovisas i Avsnitt 4.3 så går registreringen, måligenkänningen/identifieringen och datafusionen lika bra i urban miljö som i vegetation. Däremot är detekteringen och segmenteringen ett svårare problem, som kräver mer forskning. De egenskaper som man tidigare använt för att

skilja på fordon i vegetation, såsom kanter, hörn och platta ytor, blir inte relevanta i bebyggelse. Nya egenskaper måste tas fram, alternativt måste invisningen inför måligenkänningsmomentet vara betydligt bättre, vilket sätter högre krav på andra sensorer. Utvecklingen inom området, såväl på teknik- och systemsidan som på signalbehandlingssidan, förväntas påverka dessa tillämpningar på ett mycket positivt sätt. Noggrannare mätningar, längre mätavstånd, mindre och lättare system, samt mer och mer automatisk analys av data. Eftersom utvecklingen inom civila sektorn dessutom väntas öka i takt med fler civila tillämpningar kommer och urbana miljön bli en naturlig del av utvecklingsmålen.

Ifall vi antar att vi har en bra detektion och därmed med stor noggrannhet vet i vilken del av en datamängd som vi försöker identifiera ett fordon har vi redan tidigare visat att vi kan nå en bra måligenkänningsprestanda [1]. Den tydliga fördelen att många datamängder med 3D-laserdata lätt kan sammanfogas-(registreras) till en helhetsbild ger den stora styrkan att det är lätt att skapa sig en robust normalbild, se Figur 91. Vid en ny överflygning är det sedan lätt att kontrollera ifall någon förändring skett.



Figur 91. De två vyerna överst (P4/Kvarn) sammanfogas till en gemensam bild nedanför. Bild FOI.

Penetrationen genom vegetation kan i många fall även tillämpas på tonade rutor och persienner. Prestandan för dessa tillämpningar har med positiva resultat testats av bland annat FOI [130]. Även om första intresset dök upp på civila säkerhetssidan har det blivit mer och mer intressant även på militära sidan, för att förbereda sig för internationella insatser med assymetrisk krigsföring.

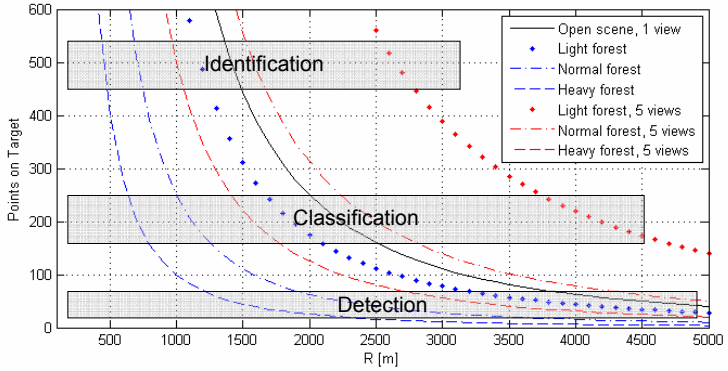
6.5 Typsystem/spelkort

Genom att betrakta utvecklingen i världen märks det tydligt att trenden i militära tillämpningar är att ha matriser snarare än rent skannande system. Däremot är de av skiftande storlek och form och vissa är linjematriser som fortfarande skannar men i lägre takt och kanske enbart längs en axel. I detta avsnitt beskriver vi några tänkbara hypotetiska system och konsekvenserna i prestanda för dessa system.

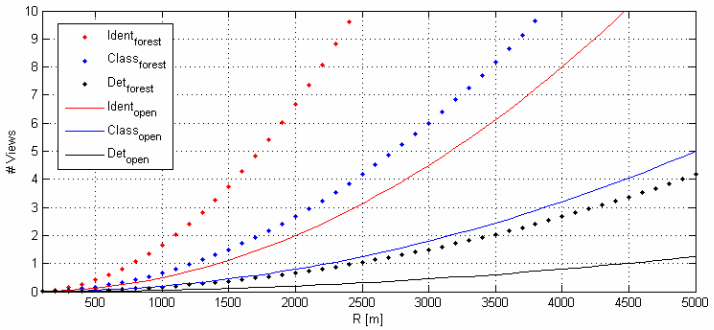
Enligt resonemangen som fördes i Avsnitt 5.1.2 och erfarenheterna från värderingen ovan, är det rimligt att anta att vi behöver en upplösning på 50, 200 eller 500 punkter på målet för att uppnå detektion, klassificering respektive identifiering. Ifall vi avser fordon (ca 10 m^2) så medför detta 50, 30 respektive 15 cm pixelavstånd på målet. Av erfarenheter dragna genom projektet behövs ett maximalt avståndsbrus på ca 5-10 cm för att genomföra en robust segmentering av en målyta i en brusig miljö.

System 1: GAPD (128×128)

Med en GAPD-sensor (se Avsnitt 2.1) har vi en rimlig pitch på ca 100µm (Avsnitt 5.1.1) och ifall vi antar ett tänkt teleskop med F=1m och D=15cm nås ett maximalt mätavstånd på 1,5 km för detektion, medan klassificering och identifiering kan ske på 3, respektive 5 km avstånd. Atmosfären kan givetvis komma att påverka dessa resultat. Om målet befinner sig i vegetation försvinner ett antal mätpunkter i skylen. Detta kan man kompensera för genom att genomföra flera mätningar och fusionera dessa. Normalvärden på penetration i svenska trädkronor är 20% för lövträd på sommaren och 30 % för barrträd. Ifall vi utgår från ett rimligt mätavstånd på 1,5 km med sned infallsvinkel, och ovanstående konfiguration, så får vi så kan vi enligt uträkningen i Figur 92 detektera mål även i djup skog (10% penetration) med endast en vy. Klassificera gör vi på 800 m avstånd. Vi ser även i Figur 93 att ifall vi vill identifiera på 1,5 km avstånd (i en normaltät skog på sommaren) behövs det ca 4 olika vyer. På mätavstånd under ca 750 meter är synfältet dock för litet för att se hela målet och måligenkänningsmetoder kan börja få problem. Eftersom systemet endast ger ett avstånd i varje pixel omöjliggörs vågformsanalys.



Figur 92. Figuren visar hur ett GAPD-system klarar av att detektera och identifiera mål i skogsmiljö. Målet antas vara 10m^2 stort.



Figur 93. Figuren visar hur många vyer som krävs för att uppnå detektion, klassificering och identifiering, i skog och öppet landskap för olika avstånd. Målet är ca 10m^2. Systemet är ett tänkt GAPD-system.

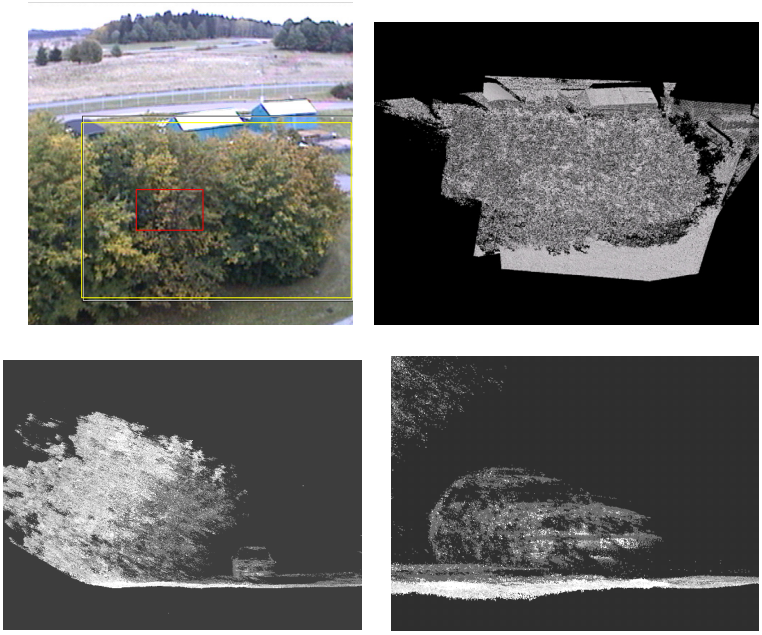
System 2: Flash ladar (256×256)

Detta system (som kan ses som en vidareutveckling av AFRLs sensor från Avsnitt 4.1) kan ge vågformen i varje pixel, samplat i 20 bins. En avvägning får alltså göras mellan att ha hög avståndsupplösning och att ha en lång mätvolym. Fördelen med att systemet ger en vågform är att flera ekon per puls kan registreras. Detta sker normalt automatiskt med tröskelvärde på strömmen. Genom att utnyttja bättre vågformsanalys, exempelvis invers faltning, kan ännu flera pulser i varje eko bestämmas. Enligt [33] visas exempel på hur antalet ekon kan öka med ca 30 % jämfört med de automatiska metoderna. Detta system kräver dock ett specialtillverkat ROIC, vilket leder till stora pixlar. Vidare systemutveckling kan givetvis minska ner detta, men på bekostnad av minskad känslighet. Om vi antar en rimlig pitch på 100µm så ger detta samma förutsättningar för vinkelupplösning som föregående system, med skillnaden att vi får fler ekon per exponering. Medan GAPD-systemet är fotonräknande (mycket hög ljuskänslighet) och direkt har en god avståndsupplösning, behöver data från *Flash ladar*-systemet utsättas för mer signalbehandling. Men eftersom andra-ekon i större utsträckning kan upptäckas blir penetrationsmöjligheterna desto bättre.

7 Prestandabedömning i civila säkerhetstillämpningar

Historiskt har säkerhets- och bevakningssystem varit baserade på förhållandevis enkla och robusta sensorer. Dels för att hålla nere kostnaderna, men även för att kunskapen om den potentiella förmågehöjningen varit dålig. Ett av de största och i sin tur dyraste problemen är ändå att falsklarmsnivåerna är för höga i förhållande till detektionsnivån. Det skulle räcka med mindre personalstyrkor än idag om antalet falsklarm minskade. Dessutom kommer en operatör som får för många falsklarm efterhand att bortse från dem, vilket lätt leder till missade skarpa larm! Ifall detta samband tydligare kan påvisas, kan mer fokus läggas på att lösa dessa problem och en sensorutveckling i strävan mot lägre falsklarmsnivåer kan drivas även från den civila sektorn.

När 3D-avbildande laserbaserade system införs på civila säkerhetsmarknaden erhålls ett stort antal fördelar, jämfört med traditionella kamerasystem. Först av allt bibehålls det viktigaste: Omgivningen ser ut som vanligt genom att vi fortfarande optiskt alstrar en högupplöst bild. Men genom att systemet har en egen ljuskälla (även om den är osynlig för ögat) är sensorn oberoende av solens variationer, och blir därmed robust mot dygnsvariationerna. Dessutom fås genom detta nattkapacitet på köpet. Utöver den högupplösta bild som alstras, fås även avståndet i samtliga mätpunkter. Det ger möjligheten att avståndsdiskriminera (skilja på objekt på olika avstånd) och därigenom se genom vegetation, persienner etc. se Figur 94. Genom att utnyttja de små luckorna som finns mellan löv- och grenverk i träd kan lasern genom sin naturliga avståndsdiskriminering skilja ut de skymda objekten.

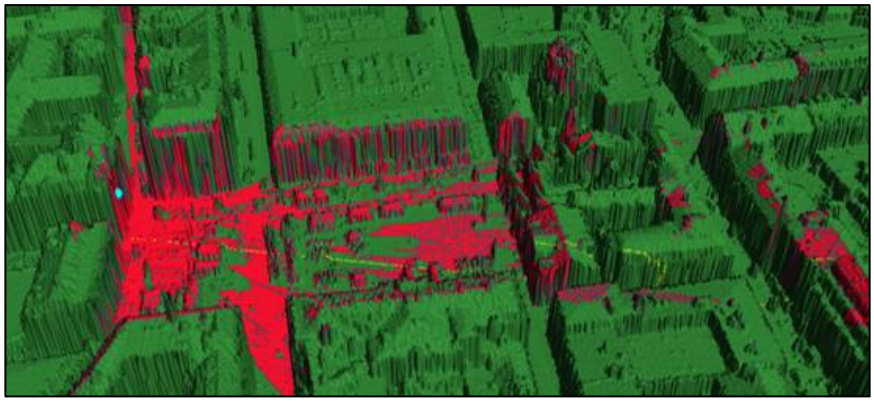


Figur 94. Bilden visar den penetrerande förmågan hos lasern. Genom buskaget uppe t.v., som för lasern ser ut som uppe t.h., kan vi, trots den täta vegetationen, fortfarande tydligt se bilen bakom, vilket visas i de nedre bilderna, där vyn är roterad. Bild FOI.

Eftersom sensorn bland annat har en egen integrerad ljuskälla kan effekten även anpassas till mycket långa avstånd, uppåt något tiotals kilometer, beroende på väder och atmosfär, se [116]. Slutligen, den kanske viktigaste fördelen när sensorn väl har samlat in data är att resultatet ges i absoluta koordinater (med enheten meter). Mätdata samlas in som relativa *(u, v, R)*-koordinater (avståndsbild) men kan genom avstånds-informationen (och kännedom om sensorparametrar) lätt transformeras till absoluta *(X, Y, Z)*-koordinater. Dessa kan sedan, med hjälp av position och orientering, lätt transformeras till världskoordinatsystem som RT90 eller WGS84.

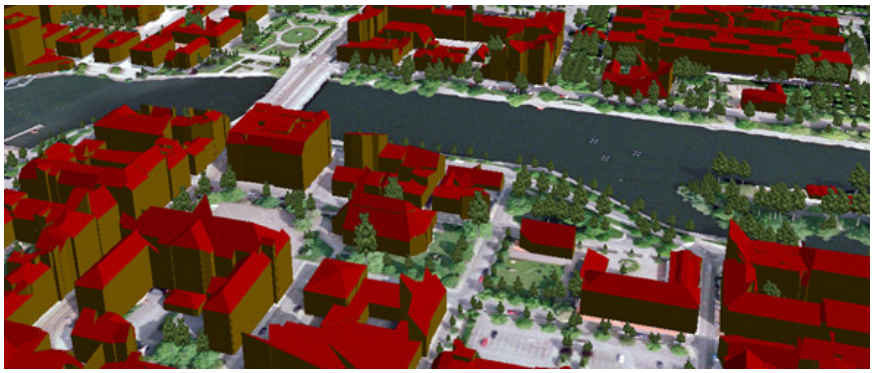
7.1 Stöd vid säkerhetsanalys

När behoven av ett säkerhetssystem analyseras för utomhusmiljöer är kartor det naturliga underlaget att använda, men det finns vissa kritiska brister i detta. Exempelvis kan man inte tillfredsställande mäta upp siktsträckor med avseende på höjden på hinder, eller ta hänsyn till markhöjdsvariationerna för att upptäcka blinda områden i kameror. Med hjälp av laserskanner kan man exakt och i absoluta mått se placering av varje hus, skjul, stolpe, träd och buske, och även fånga upp markstrukturen. Man kan sedan virtuellt testa var man ska placera sin larmutrustning, se Figur 95. Om man sedan kan använda sig av denna modell i en operatörscentral, kan man som en bonus ge en bättre rumsuppfattning för larmoperatören. Det blir alltmer viktigt eftersom operatörs-arbetet i allt större omfattning centraliseras och därmed tappar lokalkännedom om det specifika bevakningsobjektet.



Figur 95. Figuren visar en observatörs synfält markerat i rött. Observatören är placerad vid den turkosa markering. På detta sätt kan man virtuellt testa sig fram till en optimal placering av kameror och annan larmutrustning. Bild FOI.

Beroende på storlek på området som analyseras kan antingen flygburen eller mark-bunden laserskanner vara lämplig att mäta in området. Efterbearbetning av data är sedan nödvändig för att gå från rådata till en modell lämpad som underlag för fortsatt analys. Idag finns bra och välutvecklade mjukvaror för denna efterbearbetning, se Figur 96.



Figur 96. En modell av en del av Norrköping skapad genom att laserskanna området från luften. Modellerna av husen och träden är sedan skapade utifrån rådata, genom en till stora delar automatisk process utvecklad vid FOI. Bild FOI.

En variant av denna tillämpning är vid forensiska undersökningar, då en massa foton tas av en brottsplats. Även om dessa foton är högupplösta och på de flesta sätt innehåller det underlag man vill ha under förundersökningen och i domstolen, kan man inte mäta med absoluta mått och man kan inte efteråt se från vilken plats man såg vad. Genom att skanna av området som en komplettering av den ordinarie undersökningen, ges möjligheten att i efterhand få svar på många frågor som man inte tänkte på att ställa sig på plats. Man ges då möjligheten att efteråt genomföra exakta mätningar. Man kan även göra siktanalyser, och man kan dessutom använda modellen för en tydlig visualisering i domstolen. Genom ett samarbete mellan FOI och Västerortspolisen i Stockholm undersöktes ett användningssätt av detta av Beck och Brorsson Läthén [131].

När 3D-laserradar används som stöd vid säkerhetsanalys är oftast inte tiden det mest kritiska, och man har tid på sig att göra jobbet noggrant och detaljerat. Trots det finns idag både snabba och pålitliga system att mäta in områden såväl från luften som från marken. Med en punkttäthet på ca 10-20 punkter per m^2 (lagom för bra stads-modellering) fås en yttäckning på 10-80 km^2/h med de flygande systemen som nämns i Avsnitt 3.1.5. Osäkerheten i mätningarna ligger normalt på mindre än 1dm och orsakar inga större problem. Redan i insamlingen transformeras punktkoordinaterna till ett globalt koordi-natsystem (exempelvis RT90) så att data enkelt går att lägga ihop och processa till användbar GIS-information.

7.2 Avsökande sensorer

Ett stort problem med dagens övervakningssystem är som nämnts alla falsklarm, som till viss del är en naturlig följd av att man vill ha en hög detektionsnivå. Visst kan man komplettera en IR-barriär som ofta larmar för fåglar och omkringflygande löv, med en kamera, men det kräver i de flesta fall ändå en operatör för att avfärda de falska larmen. Dessutom får kamerorna ofta problem nattetid på grund av det svaga ljuset.

Istället kan man tänka sig en roterande laserskanner som ständigt ligger och känner av omgivningen. På grund av den mer kvalificerade sensorn får vi då tillgång till mycket mer information. Vi får bland annat en avståndsbild av omgivningen, vilken inte påver-kas av solens eller gatuljusens påverkan. Avvikelser från denna normalbild upptäcks lätt och robust. Dessutom kan vi lätt läsa av storleken och hastigheten på avvikelsen, genom att vi har absoluta mått. Härigenom kan de flesta falska larma automatiskt avfärdas utan att någon larmoperatör behöver kallas in. Som en ytterligare fördel kan nämnas den vegetationspenetrerande förmågan hos lasern, se Figur 94.

I en realiserbarhetsstudie genomförd av Svenska Kraftnät [132] undersöktes prestandan hos tillgängliga tekniska lösningar för bevakning. Bland dessa fanns stängsellarm, marklarm, IR-barriärer och CCTV-system. Man valde även att testa roterande laserskanner och konstaterade att den var driftsäker och gav få falsklarm.

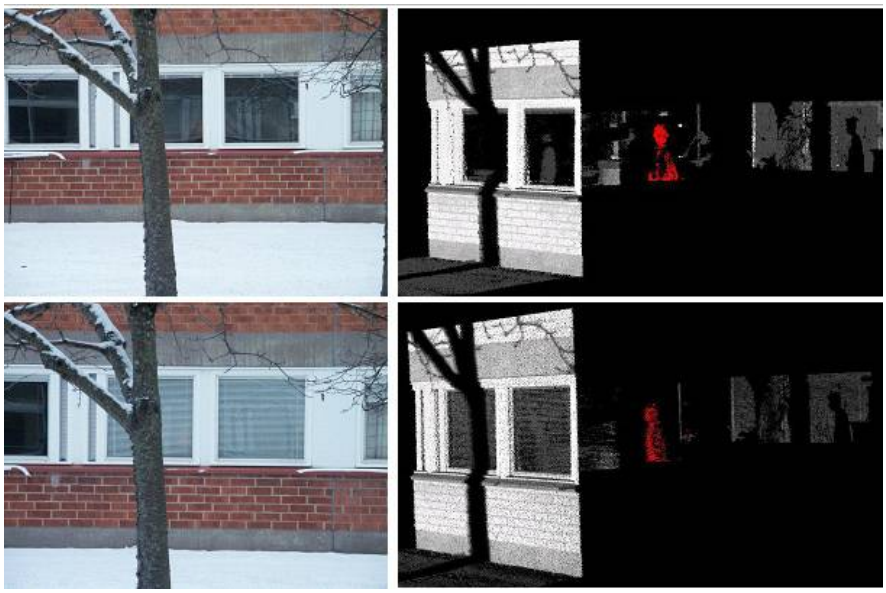
Beroende på vilken prestanda man vill uppnå finns lasersystem som samlar in över 100’000 punkter per sekund. Låt oss exemplifiera att man har behovet av att i 180 graders synfält på 50 meters avstånd vilja ha en punktupplösning på 1 dm. Om man därtill antar att det intressanta mätområdet är 4 meter högt, så når man en scenuppdateringsfrekvens på ca 2 Hz, vilket får anses vara fullt tillräckligt för att upptäcka överträdelser.

7.3 Spaningssensorer

Istället för att rotera och skanna en laserstråle kan man designa sensorn som en kamera. För dessa system dyker ett antal andra intressanta tillämpningar upp. Då byter man ut fördelen med det stora synfältet mot noggrannheten och tätheten i data. Vi får med andra ord mycket högupplösta 3D-bilder av mindre omgiv-ningar, och som en extra fördel når vi videotakt i många sådana system. Den kanske största användningen av dessa system är för att erhålla en mycket bra igenkänningsgrad, och därigenom exempelvis få robustare passagekontroller. Såväl som det kan användas för biometrisk mätning av kropp eller ansikte, kan det givetvis även användas till fordons- eller båtigenkänning. Det har visats att man ökar igenkänningsgraden med ca 30% genom att använda sig av 3D-formen istället för att bara använda en 2D-bild [133]. Precis som i tidigare nämnd teknik kan man genomföra mätningar i absoluta mått direkt i rådata. Givetvis fungerar sensorn även nattetid, och kan även användas för att till viss grad se genom vegetation och persienner.

När det gäller just passagekontroller och ansiktsigenkänning (med personens vetskap och samverkan) har tekniken redan börjat användas [111], och marknaden har börjat acceptera den som trovärdig. När det gäller mer generell igenkänning i övervakningskameror så är tekniken ännu inte så väl beprövad, och algoritmer utvecklas fortfarande för att fungera robust. Viss funktionalitet som tidigare varit ett svårt problem för vanliga övervakningskameror, såsom att upptäcka kvarglömda väskor, blir betydligt lättare med stöd från avståndsinformationen. Eftersom ljusförhållandena i kamerornas närmiljö ofta är svår och framförallt varierar över dygnet tillför en sådan här teknik att robustheten i alla avseenden ökar.

Man kan även tänka sig att använda dessa sensorer för mer dynamisk och mobil spaning. Exempelvis är Polisen mycket intresserad av att operativt kunna se genom vegetation och persienner (Figur 97), samt att kunna se på långa avstånd, utan att upptäckas. På senare år har systemen krympt och några har till och med blivit handburna. Tekniken har blivit billigare och det är bara en tidsfråga innan dessa system tar ett stort steg ut på marknaden. Fastmonterade på fordon är det också rimligt att systemen kan komma i tillämpning snart, eftersom flera väl fungerande försök har visats exempelvis genom vinnarna av DARPAs Urban challenge [102] och genom de försöksbilar som är under utveckling [134].



Figur 97. Bilden visar ett rum med och utan persienner neddragna (3 mm glipor). I båda fallen står en person i rummet, vilket inte syns på fotona. Men i 3D-data till höger syns personen (rödmarkerad) tydligt både med och utan persienner. Bild FOI.

Ett alltmer växande hot är terroristhotet som kan uppträda på många olika sätt. Om man exempelvis ser en raketgevärsskytt på långt håll rakt framifrån kan det vara svårt att se det som ett hot. Här kan en 3D-sensor bidra till informationen enligt Figur 98, som visar hur data insamlat rakt framifrån även innehåller information om vapnets utseende, eftersom man direkt kan rotera data.

Figur 98. Ett terroristhot (raketgevärsskytt) som är svårt att upptäcka rakt framifrån. Den vänstra bilden visar raketgeväret, medan i hotsituationen i de mittre bilderna är det svårt att uppfatta hotet. I perspektivbilden till höger ses samma data som i tredje bilden, men uppvridet åt sidan för att illustrera informationsinnehållet i 3D-data. Bilder FOI.

8 Diskussion

Detta projekt som denna rapport utgör slutrapport för har under tre år följt och utgjort en del av utvecklingen inom området 3D-avbildande laserradarsystem. Under denna period har sensorerna blivit mindre och billigare men kanske framförallt fler. En mängd nya koncept har tagits fram och som bland annat visas i denna rapport så utnyttjar de ett antal olika principer för att mäta avstånd. En del är snabba, medan andra är högpresterande, och kanske till och med registrerar full vågform i varje pixel. Det gemensamma är att de ger underlag till en avståndsdiskriminering, en robust mål-igenkänning samt för vissa system även ger en möjlighet till högupplöst mätning på långt avstånd.

Vi har inom projektet haft nära kontakt med ett antal internationellt kända laboratorier där det utvecklas state-of-the-art-system. Många av dessa kontakter har kommit till och existerar genom personliga kontakter, och bygger på att vi inom FOI har visat en mycket stor och eftertraktad kompetens inom området. Vi är för närvarande inbjudna till flera NATO-grupper, vi har bilaterala samarbeten med Air Force Research Laboratories i USA och med FGAN-FOM i Tyskland, och vi har därtill även samarbete med TNO i Holland och DRDC i Kanada. Dessa nätverk ger oss tillgång till information och kunskap som annars inte skulle gå att få tag på redan nu, och skapar oss möjlighet att på ett tillförlitligt sätt kunna beskriva framtiden inom detta sensorområde, såsom görs i denna rapport.

8.1 Prestandavärdering

Vi har inom projektet tagit fram metoder för att värdera 3D-avbildande laserradar-system för vissa tillämpningar, men kanske framförallt har vi identifierat behoven av fortsatt arbete inom vissa områden. Prestandavärderingen har visat att det är möjligt att genomföra en beräkningsbaserad värdering av hela kedjan från datainsamling till måligenkänningsresultatet. Vi har exemplifierat detta för de fall där signalbehandlings-metoderna varit väl utvecklade, vilket har varit för fordon i terräng, såväl öppet som i vegetation. För övriga fall har vi strukturerat metoderna så att vi så bra som möjligt kan svara på kommande frågor. Vi har även beskrivit konsekvenserna av den förväntade sensorutvecklingen för prestandan i andra tillämpningar såsom urban militär miljö och för civila säkerhetstillämpningar. Sammanfattningsvis kan man säga att vi i denna rapport har påvisat en god möjlighet att penetrera vegetation och att automatiskt hitta och identifiera mål i samma omgivning. Man kan analysera identifieringsprocessen på egen hand och då dra slutsatsen att om en god detektering och/eller segmentering är genomförd har vi ett mycket gott och robust underlag för en identifiering av fordon varhelst de är placerade.

8.2 Marknadens utveckling

Inom teknologiområdet märks intressant utveckling inom laser och detektorområdet liksom nya principer for 3D-avbildning utnyttjande våglängdsdiversitet. Man närmar sig alltmer den fysikaliska (och elektriska) upplösningsgränsen för konventionella time-of-flight-mätningar och man försöker därför hitta på nya tekniska lösningar. Gränsen för konventionell pulsad ladar ger pulslängder på ca 0,5 ns. Det finns exempelvis flera andra sätt att upp nå hög upplösning utan att komma i konflikt med elektriska bandbredds-begränsningar. Några av dessa är amplitud- och frekvens-

modulerade tekniker där man omvandlar mätningen från tidsplanet till att mäta fas eller frekvens. En annan möjlighet är att snabbt ändra polarisation eller fas under en puls och omvandla avståndsmätningen till ett problem att mäta intensitet. Man kan även använda optisk direktdetektion men med blandning och koherent detektion i den modulerande mikrovågssignalen.

Inom systemområdet märks stora framsteg inom syntetisk aperturlidar (SAL), multifunktionssystem samt multiapertursystem. Man talar om SAL-system som skall identifiera mål på 20-30 km för taktiskt bruk eller t.o.m. om rymdbaserade system med möjligheter att avbilda från geostationära satelliter. Multifunktionssystemen kombinerar passiv och aktiv avbildning för att kunna vara ”osynliga” så länge som möjligt.

Genom att kommersialiseringen har gjort sig mer gällande har civila tillämpningar blivit allt troligare och även allt viktigare. Detta kommer på sikt sannolikt gynna även militära sidan, eftersom produktutvecklingskostnaderna delas. I dagsläget är bilindustrin drivande, men man kan se ökat intresset även på andra områden såsom kortavståndsavbildningar för arkeologi, brottsplatsdokumentation och skapande av virtuella världar. Skogskartering är ett annat snabbt växande område och delar behovet av att klassificera landskapet, genom att bland annat separera träden från annan data.

På signalbehandlingssidan har man sett trenden att alltfler realtidssystem har dykt upp. Det sätter fokus på en utveckling mot många enklare algoritmer, applicerade i en serie av operationer, smart sammanvävda för minsta möjliga beräkningsbehov.

Allteftersom systemen ökar sin uppdateringsfrekvens och möjlighet att samla in i realtid så sätter det nya krav på signalbehandlingen. Exempelvis kräver det att man kan relatera flera datamängder till varandra, så att man på bästa sätt kan utnyttja den kombinerade informationen. 3D-data är synnerligen bra till detta, och med stöd av ett modernt positioneringssystem (GPS/ISN), finns en stor potential att fusionera data både snabbt och korrekt.

Genom att kombinera sensorer av olika slag kan man vinna mycket. Invisning och måligenkänning kan ske med samma system. Kraven blir istället höga på att fusionera data på rätt sätt. De system som bygger på att pixlarna är såväl passiva som aktiva, löser det genom enkel överlagring, men i övriga fall krävs kalibrering.

Eftersom det är en stor kostnad bakom sensorutveckling växer intresset för modellering. Modellering av aktiva system är ett svårt problem, men ett antal försök görs världen över. Fokus ligger på olika nivåer, där vissa angreppssätt är enkla prestandaprediktioner, medan andra försöker att simulera sensordata.

9 Publikationer

Under projektets gång har ett antal publikationer och dokument producerats:

- En doktorsavhandling, ”Ground Object Recognition using Laser Radar Data - Geometric Fitting, Performance Analysis, and Applications” [1], försvarades av Christina Grönwall 2006.
- 12 rapporter, däribland 3 examensarbeten [2-13]
- 4 publicerade tidskriftsartiklar [14-17]
- 19 konferensbidrag och presentationer [18-36]
- 7 interna rapporter [37-43]

[1] C. Grönwall, "Ground Object Recognition using Laser Radar Data - Geometric Fitting, Performance Analysis, and Applications", PhD thesis, Department of Electrical Engineering. Linköping: Linköping University, 2006.

[2] A. Wiklund, "Registration approaches for noisy 3D data representing natural scenes", FOI. Linköping, FOI-R--1994--SE, 2006.

[3] H. Larsson, "Presentation of LIDAR data from NATO field trial in Huntsville Alabama, USA okt. 2005", FOI. Linköping, FOI Memo 1645, 2006.

[4] C. Grönwall och F. Gustafsson, "Modeling of laser radar systems", Dep. of Electrical Engineering, LiU. Linköping, LiTH-ISY-R-2743, 2006.

[5] C. Grönwall och F. Gustafsson, "3D content-based model matching using geometric features", Dep. of Electrical Engineering, LiU. Linköping, LiTH-ISY-R-2726, 2006.

[6] C. Freyhult, "Visualisation and detection using 3-D laser radar and hyperspectral sensor", FOI. Linköping, Technical Report, FOI-R--2125--SE, Nov 2006.

[7] T. Chevalier, P. Andersson, C. Grönwall och G. Tolt, "Methods for ground target detection and recognition in 3-D laser data", FOI. Linköping, Scientific Report, FOI-R--2150--SE, Dec 2006.

[8] T. Chevalier, P. Andersson, et al., "Årsrapport 3D-laser 2005", FOI. Linköping, User Report, FOI-R--1807--SE, Dec 2005.

[9] K. Chan, "Registration of 3-D laser radar data with hyperspectral imagery for target detection", FOI. Linköping, Technical Report, FOI-R--2101--SE, Nov 2006.

[10] R. Forchheimer, "Laserbaserade avståndskameror - Sammanställning av tekniska metoder och system", Linköping University, Dept. of Electrical Engineering. Linköping, Sweden Jan 2005.

[11] C. Grönwall, F. Gustafsson och M. Millnert, "Ground target recognition using rectangle estimation", Dept. of Electrical Engineering, Linköpings Universitet. Linköping, Sweden, Technical Report, LiTH-ISY-R-2735, March 2006.

[12] T. Chevalier, "Samverkande sensorer - Illustrerat exempel med hyperspektral kamera och 3D-laserradar", FOI. Linköping, User Report, FOI-R--2325--SE, Sept 2007.

[13] H. Larsson, T. Chevalier och F. Gustafsson, "3-D structure and reflectance measurements - A system analysis of Lidar Optech ILRIS-3D", FOI. Linköping, Technical report, FOI-R--2116--SE, Sept 2007.

[14] C. Grönwall, F. Gustafsson och M. Millnert, "Ground target recognition using rectangle estimation", *IEEE Transactions on Image Processing*, 15(11):3400-3408, 2006.

[15] C. Grönwall, O. Steinvall, F. Gustafsson och T. Chevalier, "Influence of laser radar sensor parameters on range-measurement and shape-fitting uncertainties", *Optical Engineering*, 46(106201, 2007.

[16] M. Henriksson, "Detection probabilities for photon-counting avalanche photodiodes applied to a laser radar system", *Applied optics*, 44(24):5140-5147, 2005.

[17] H. Larsson, O. Steinvall, T. Chevalier och F. Gustafsson, "Characterizing laser radar snow reflection for the wavelengths 0.9 and 1.5 um", *Optical engineering*, 45(11):116201-01-116201-11, 2006.

[18] G. Tolt och H. Larsson, "Waveform analysis of lidar data for targets in cluttered Environments", Vol. 6739, sid. 6739-10, presenterad vid *SPIE Europe Remote Sensing*, Florence, Italy, September 17 - 20, 2007.

[19] O. Steinvall, "Recent activities in laser sensing at FOI", sid. 7, presenterad vid *14 th Coherent Laser Radar Conference*, Snowmass, Co, USA, July 8-13, 2007.

[20] T. Chevalier, P. Andersson, C. Grönwall, A. Linderhed och G. Tolt, "Concepts for segmentation and recognition of 3-D laser data", sid. 65-68, presenterad vid *SSBA, Swedish Symposium on Image Analysis*, Umeå, 15-16 March, 2006.
[21] T. Chevalier, O. Steinvall och H. Larsson, "Performance of laser penetration through forest vegetation", Vol. 6550, sid. 65500Q, presenterad vid *SPIE Defence & Security Symposium, Laser Radar Technology and Applications XII*, Orlando, FL, USA, 4 May, 2007.
[22] C. Grönwall och P. Andersson, "Least squares fitting of articulated objects", sid. 121-124, presenterad vid *SSBA 2005, Swedish symp. on image analysis*, Malmö, Sweden, March 10-11, 2005.
[23] C. Grönwall, P. Andersson och F. Gustafsson, "Least squares fitting of articulated objects", sid. 116-121, presenterad vid *CVPR 2005, Workshop on advance 3D image analysis for safety and security*, San Diego, CA, USA, June 25, 2005.
[24] H. Larsson, O. Steinvall, et al., "Characterizing laser radar snow reflection for the wavelengths 0.9 and 1.5 um", Vol. 5791, sid. 293-307, presenterad vid *SPIE Defense & Security Conference on Laser Radar Technology and Applications X*, Orlando, FL, USA, April, 2005.
[25] D. Letalick, T. Chevalier och H. Larsson, "3-D Imaging of Partly Concealed Targets by Laser Radar", sid. 11-1--11-11, presenterad vid *RTO-MP-SET-094*, Berlin, Tyskland, Oct 12-13, 2005.
[26] O. Steinvall, "High resolution laser sensors for airborne applications", sid. 32, presenterad vid *FLYGTEKNIK 2007*, Stockholm, Sweden, Oct 15-16, 2007.
[27] O. Steinvall, "Laser Imaging and Mapping", presenterad vid *ICONO/LAT*, St Petersburg, Russia, May 11-15, 2005.
[28] O. Steinvall, "Laser techniques and methods for urban warfare", presenterad vid *FMV workshop on urban warfare*, Stockholm, May 18-19, 2005.
[29] O. Steinvall, "Review of laser sensing devices and systems", Vol. 5989, sid. 26-43, presenterad vid *SPIE Remote Sensing*, Brugge, Belgium, Sept 19-22, 2005.
[30] O. Steinvall, P. Andersson, M. Elmqvist och M. Tulldahl, "Overview of range gated imaging at FOI", Vol. 6542, sid. 6542-16, presenterad vid *SPIE Defense and Security 2007, Infrared Technology and Applications XXXIII*, Orlando, FL, USA, April 9-13, 2007.
[31] O. Steinvall och T. Chevalier, "Range accuracy and resolution for laser radars", Vol. 5988, sid. 73-88, presenterad vid *SPIE Remote Sensing*, Brugge, Belgium, Sept 19-22, 2005.
[32] O. Steinvall, T. Chevalier och H. Larsson, "Data collection and simulation of high range resolution laser radar for surface mine detection", Vol. 6214, sid. 85-102, presenterad vid *SPIE, Defence and security symposium, laser radar technology and applications XI*, Orlando, FL, USA, 19 April, 2006.
[33] O. Steinvall, H. Larsson, et al., "Performance of 3D laser radar through vegetation and camouflage", Vol. 5792, sid. 129-142, presenterad vid *SPIE Defense & Security Conference on Laser Source and System Technology for Defense and Security*, Orlando, FL, USA, April, 2005.
[34] G. Tolt, P. Andersson, et al., "Registration and change detection techniques using 3D laser scanner data from natural environments." Vol. 6396, sid. 10, presenterad vid *SPIE Europe, Optics and photonics in security and defence 2006, Electro-optical remote sensing II*, Stockholm, Sweden, Sep 11-14, 2006.
[35] O. Steinvall, "3 D imaging in urban environments", presenterad vid *Workshop on Spectral Imaging for Defence Applications*, EDA's premises, Brussels, Nov 6, 2007.
[36] O. Steinvall, "Utvecklingstrender inom laser-radarområdet-rapport från CLR konferensen Snowmass, USA 2007," i *Avdelningsseminarium*. Linköping: FOI, 2007.
[37] S. Björklund, "SensorComb, en Matlab-toolbox för att kombinera sensorer.Utvecklingsläge." FOI. Linköping, Internal report, FOI-D--0293--SE, 2007.
[38] C. Grönwall och J. Landgård, "Analysis of laser radar data for UAV and seeker applications", FOI. Linköping, Internal Report, FOI-D--0246--SE, 2006.
[39] H. Larsson, "Besök hos Optech Incorporated i Toronto, träning av och diskussion kring Optech ILRIS-3D", FOI. Linköping, Internal report, FOI-D--0262--SE, 2006.
[40] H. Larsson, "Mätrapport mobil kran, Kvarn", FOI. Linköping, Internal report, FOI-D--0260--SE, 2006.
[41] H. Larsson, P. Nilsson, T. Chevalier och R. Persson, "Mätrapport samverkande sensorer Ströplahult Norra maj 2006", FOI. Linköping, Internal report, FOI-D--0621--SE, 2006.
[42] C. Grönwall och P. Andersson, "Spin-Images för detektion och igenkänning", FOI, Sensor Technology, Internal Report, FOI-D--0198--SE, Dec 2004.
[43] H. Larsson, F. Gustafsson, T. Chevalier och K. Karlsson, "Mätdokumentation för penetration- och reflektionsmätning mot hårt mål med olika vegetation avseende årstider, Lidbacken 2004", FOI. Linköping, Internal Report, FOI-D--0188--SE, 2004.

10 Referenser

[44] Websida: Sigma Space Corporation: *Sigma main page*, "http://www.sigmaspace.com/sigma/". Kontrollerad: 22 Nov 2007.

[45] X. Michalet, O. H. W. Siegmund, et al., "Detectors for single-molecule fluorescence imaging and spectroscopy", *Journal of Modern Optics*, 54(2-3):239-281, 2007.

[46] L. Ramesh, K. Shrestha och Slatton, "Coastal Area Tactical-mapping System (CATS)", ONR, Annual report, www.onr.navy.mil/obs/reports/docs/06/obshrest.pdf, 2006.

[47] M. W. Roth, J. C. Hunnell, K. E. Murphy och A. E. Scheck, "High-Resolution Foliage Penetration with Gimbaled Lidar", Vol. 6550, sid. 65500K, presenterad vid *SPIE D&S*, Orlando, FL, USA, april, 2007.

[48] B. Stann, B. C. Redman, W. Lawler, M. Giza och J. Dammann, "Chirped amplitude modulation ladar for range and Doppler measurements and 3-D imaging", Vol. 6550, sid. 655005, presenterad vid *SPIE D&S*, Orlando, FL, USA, april, 2007.

[49] D. F. Pierrotteta, F. Amzajerdianb, B. L. Meadowsb, R. Estesb och A. M. Noeb, "Characterization of 3-D imaging lidar for hazard avoidance and autonomous landing on the Moon", Vol. 6550, sid. 655008, presenterad vid *SPIE D&S*, Orlando, FL, USA, april, 2007.

[50] G. Heidelmeyer, B. Eilmus och U. Klingauf, "Correlation between LIDAR and radar reflux intensity and the accuracy of the associated elevation information", Vol. 6550, sid. 655009, presenterad vid *SPIE D&S*, Orlando, FL, USA, april, 2007.

[51] A. K. Vadlamani och M. Uijt de Haag, "Aerial Vehicle Navigation over Unknown Terrain Environments using Inertial Measurements and Dual Airborne Laser Scanners or Flash LADAR", Vol. 6550, sid. 65500B, presenterad vid *SPIE D&S*, Orlando, FL, USA, April, 2007.

[52] M. Uijt de Haag, D. Venable och M. Smearcheck, "Use of 3D laser radar for navigation of unmanned aerial and ground vehicles in urban and indoor environments", Vol. 6550, sid. 65500C, presenterad vid *SPIE D&S*, Orlando, FL, USA, April, 2007.

[53] Websida: *US National Institute of Standards, committee*, "http://www.astm.org/cgibin/SoftCart.exe/COMMIT/COMMITTEE/E57.htm?L+mystore+abyi2803+1194120686".

[54] C. E. Keffer, T. J. Papetti och E. Johnson, "Advanced Measurements Optical Range (AMOR) ladar test facility", Vol. 6550, sid. 65500E, presenterad vid *SPIE D&S*, Orlando, FL, USA, April, 2007.

[55] P. Gatt, S. Johnson och T. Nichols, "Dead-Time Effects on Geiger-Mode APD Performance", Vol. 6550, sid. 65500I, presenterad vid *Orlando D&S*, Orlando, FL, USA, April, 2007.

[56] M. Vaidyanathan och et.al., "Jigsaw Phase III: A Minituarized Airborne 3-D Imaging Laser Radar with Photon-Counting Sensitivity for Foliage Penetration", Vol. 6550, sid. 65500N, presenterad vid *SPIE D&S*, Orlando, FL, USA, April, 2007.

[57] A. Ullrich, M. Hollaus, C. Briese, W. Wagner och M. Doneus, "Utilization of full-waveform data in airborne laser scanning applications", Vol. 6550, sid. 65500S, presenterad vid *SPIE Defense & Security Symposium, Laser Radar Technology and Applications XII*, Orlando, FL, USA, April, 2007.

[58] J. C. van den Heuvel, H. H. P. T. Bekman, F. J. M. van Putten och L. H. Cohen, "Identification of Littoral Targets with a Laser Range Profiler", Vol. 6550, sid. 65500R, presenterad vid *SPIE D&S*, Orlando, FL, USA, April, 2007.

[59] J. C. van den Heuvel, H. H. P. T. Bekman, F. J. M. van Putten och L. H. Cohen, "Detection of Small Sea-Surface Targets with a Search Lidar", Vol. 6550, sid. 65500V, presenterad vid *SPIE D&S*, Orlando, FL, USA, April, 2007.

[60] A. Bushboom och V. Sequeira, "Container Integrity Verification using Laser Triangulation", Vol. 6550, sid. 65500T, presenterad vid *SPIE Defence & Security Symposium*, Orlando, FL, USA, April, 2007.

[61] Y. Wang, S. S. R. Ogirala, B. Hu och H. Q. Le, "Multi-Static Networked 3D Ladar for Surveillance and Access Control", Vol. 6550, sid. 65500U, presenterad vid *SPIE D&S*, Orlando, FL, USA, April, 2007.

[62] O. Steinvall, T. Chevalier, P. Andersson och M. Elmqvist, "Performance modeling and simulation of range-gated imaging systems", Vol. 6542, sid. 654218, presenterad vid *SPIE D&S*, Orlando, FL, USA, April, 2007.

[63] Personlig kommunikation med. I. Baker, "SELEX", 2007.

[64] J. Beck, M. Woodall, R. Scritchfield, M. Ohlson och L. Wood, "Gated IR Imaging with 128x128 HgCdTe Electron Avalanche Photodiode FPA", Vol. 6542, sid. 6542-17, presenterad vid *SPIE D&S*, Orlando, FL, USA, April, 2007.
[65] J. Beck, C. Wan, et al., "The HgCdTe Electron Avalanche Photodiode", *IEEE LEOS NEWSLETTER*, 20(5):8-12, 2006.
[66] J. Rothmana, G. Perraisa, et al., "High performance characteristics in pin MW HgCdTe e-APDs", Vol. 6542, sid. 6542-19, presenterad vid *SPIE D&S*, Orlando, FL, USA, April, 2007.
[67] N. G. Coakley, A. M. Moloney och A. T. Schwarzbacher, "Optimisation of a Geiger mode avalanche photodiode imaging pixel based on a hybrid bulk SOI CMOS process", Vol. 6737, sid. 6737-30, presenterad vid *SPIE Europe Remote Sensing*, Florence, Italy, September 17 - 20, 2007.
[68] H. Mohseni, O. G. Memis, A. Katsnelson och S. Kong, "A novel SWIR detector with an ultra-high internal gain and negligible excess noise", Vol. 6737, sid. 6737-31, presenterad vid *SPIE Europe Remote Sensing*, Florence, Italy, September 17 - 20, 2007.
[69] R. A. Ismail, "Linear array ZnTe/Si heterojunction photodetector for laser detection and imaging applications", Vol. 6737, sid. 6737-32, presenterad vid *SPIE Europe Remote Sensing*, Florence, Italy, September 17 - 20, 2007.
[70] G. Rosenbush och T. Hong, "Super-resolution enhancement of flash ladar range data", Vol. 6736, sid. 6736-38, presenterad vid *SPIE Europe Remote Sensing*, Florence, Italy, September 17 - 20, 2007.
[71] M. P. Strand "3D as a foundation for intelligent underwater autonomous mine countermeasures systems", Vol. 6736, sid. 6736-27, presenterad vid *SPIE Europe Remote Sensing*, Florence, Italy, September 17 - 20, 2007.
[72] K. L. Lewis, "Challenges in military remote sensing", Vol. 6739, sid. 6739-23, presenterad vid *SPIE Europe Remote Sensing*, Florence, Italy, September 17 - 20, 2007.
[73] I. Clark, "Exploitation of EO Technologies from the EMRS DTC", Vol. 6739, sid. 6739-24, presenterad vid *SPIE Europe Remote Sensing*, Florence, Italy, September 17 - 20, 2007.
[74] Websida: *CLR-conference program*, "http://space.hsv.usra.edu/CLRC/presentations.html". Snowmass, CO, USA, Kontrollerad: Nov 15 2007.
[75] Websida: SiTek Electro Optics: *SiTek main page*, "http://www.sitek.se/". Partille, Kontrollerad: 22 Nov 2007.
[76] Websida: *The Nobel Prize in Physics 2005, The Royal Swedish Academy of Sciences*, "http://www.kva.se/KVA_Root/swe/awards/nobel/nobelprizes/press/phyread05.asp". Stockholm, Sweden, Kontrollerad: Nov 15 2007.
[77] A. Eriksson, M. Henriksson, P. Jonsson, L. Sjökvist och O. Steinvall, "Ultrakorta laserpulser i verkanslaser och sensortillämpningar", FOI. Linköping, FOI-R--2071--SE, Dec 2006.
[78] A. E. Johnson, "Spin-Images: A Representation for 3-D Surface Matching", PhD Thesis, Robotics Institute. Pittsburgh, Pennsylvania: Carnegie Mellon University, 1998. (robotics.jpl.nasa.gov/people/johnson/thesis/thesis.html)
[79] M. Ordaz, E. Whittenberger, D. Waagen och D. Hulsey, "A statistical analysis of 3D structure tensor features generated from LADAR imagery", Vol. 6234, sid. 623408, presenterad vid *SPIE Defense & Security Symposium, Automatic Target Recognition XVI*, Orlando, FL, USA, April, 2007.
[80] J. Sun, Q. Li, W. Lu och Q. Wang, "Target recognition of laser radar using correlation filter with in-plane rotation invariance", Vol. 6787, sid. 67871F, presenterad vid *MIPPR 2007: Multispectral Image Processing*, 2007.
[81] J. Sun, Q. Li, W. Lu och Q. Wang, "Correlation detection filter for imaging laser radar", Vol. 6279, sid. 62792Z, presenterad vid *SPIE 27th International Congress on High-Speed Photography and Photonics*, 2007.
[82] J. Savage, C. Coker, et al., "Irma 5.2 multi-sensor signature prediction model ", Vol. 6564, sid. 656403, presenterad vid *SPIE Dfense & Security Symposium, Modeling and Simulation for Military Operations II*, Orlando, FL, USa, April, 2007.
[83] R. J. Grasso, G. F. Dippel och L. E. Russo, "A model and simulation to predict 3D imaging LADAR sensor systems performance in real-world type environments", Vol. 6303, sid. 63030H, presenterad vid *SPIE Atmospheric Optical Modeling, Measurement, and Simulation II,*, 2006.
[84] R. L. Espinola, B. Teaney, et al., "Active imaging system performance model for target acquisition", Vol. 6543, sid. 65430T, presenterad vid *SPIE Defense & Security Symposium, Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XVIII*, Orlando, FL, USA, April, 2007.

[85] C. Witte, K. Jäger, M. Hebel och W. Armbruster, "A novel segmentation method for object tracking and recognition", Vol. 6569, sid. 65690D, presenterad vid *SPIE Defense & Security Symposium, Acquisition, Tracking, Pointing, and Laser Systems Technologies XXI*, Orlando, FL, USA, April, 2007.
[86] R. Craig, I. Gravseth, et al., "Processing 3D flash LADAR point-clouds in real-time for flight applications", Vol. 6555, sid. 65550D, presenterad vid *SPIE Sensors and Systems for Space Applications*, Orlando, FL, USA, April, 2007.
[87] G. Bouchette, P. Iles, et al., "Rapid automatic target recognition using generic 3D sensor and shape-from-motion data", Vol. 6566, sid. 656619, presenterad vid *SPIE Defense & Security Symposium, Automatic Target Recognition XVII*, Orlando, FL, USA, April, 2007.
[88] J. H. Dixon och A. D. Lanterman, "Information-theoretic bounds on target recognition performance from laser radar data", Vol. 6234, sid. 623419, presenterad vid *SPIE Defense & Security Symposium, Automatic Target Recognition XVI*, Orlando, FL, USA, April, 2007.
[89] P. García-Martínez, J. J. Vallés, J. García, C. Ferreira och H. H. Arsenault, "Improved invariant optical correlations for 3D target detection", Vol. 6696, sid. 66960Q, presenterad vid *SPIE Applications of Digital Image Processing XXX*, 2007.
[90] M. G. Taylor, "Coherent Detection for Fiber Optic Communications Using Real Time Digitial Signal Processing", presenterad vid *14th Coherent Laser Radar Conference*, Snowmass, Co, USA, July 8-13, 2007.
[91] Websida: Tyréns: *Tyréns main page*, "http://www.tyrens.se". Kontrollerad: 21 Nov 2007.
[92] Websida: ISPRS Working Group III/3: *Processing of point clouds from laser scanners and other sensors*, "http://www.itc.nl/isprswgIII-3/resources_links.html". Kontrollerad: Nov 20 2007.
[93] G. S. Cheok, W. C. Stone och A. Lytle, "Standards requirements for LADARs?" Vol. 5791, sid. 250-261, presenterad vid *SPIE Defense and Security Symposium, Laser Radar Technology and Applications X*, Orlando, FL, USA, March, 2005.
[94] Websida: Mesa Imaging AG: *Mesa Imaging products*, "http://www.mesa-imaging.ch/prodviews.php". Kontrollerad: 20 Nov 2007.
[95] Websida: Metris: *Metris main page*, "http://www.metris.com/". Kontrollerad: Nov 20 2007.
[96] Websida: Scientific Material Corp: *Monoblock Laser Products*, "http://scientificmaterials.com/Monoblockproducts.htm". Kontrollerad: Nov 16 2007.
[97] Websida: 3rdTech: *3rdTech Main page*, "http://www.3rdtech.com". Kontrollerad: Nov 20 2007.
[98] Websida: Faro: *Faro main page*, "http:// www.faro.com". Kontrollerad: 20 Nov 2007.
[99] Websida: Optech Inc: *Optech main page*, "http://www.optech.ca/". Kontrollerad: 20 Nov 2007.
[100] Websida: PMDTechnologies Gmbh: *PMDTec main page*, "http://www.pmdtec.com/e_index.htm". Kontrollerad: 20 Nov 2007.
[101] Websida: Advanced Scientific Concepts: *Portable 3D Camera* "http://www.advancedscientificconcepts.com/camera1.html". Kontrollerad: Nov 16 2007.
[102] Websida: 3DLM: *3DLM StreetMapper*, "http://www.3dlasermapping.com/en/mobile/streetmapper/home.htm". Kontrollerad: 20 Nov 2007.
[103] Websida: Canesta Inc.: *Canesta main page*, "http://www.canesta.com/". Kontrollerad: 20 Nov 2007.
[104] Websida: Airborne Hydrography AB: *AHAB main page*, "http://www.airbornehydro.com/". Kontrollerad: 20 Nov 2007.
[105] Websida: *TopEye AB*, "http://www.topeye.com".
[106] Websida: Toposys: *Toposys main page*, "http://www.toposys.com/". Kontrollerad: 21 nov 2007.
[107] Websida: Digpro geographic IT: *Digpro main page*, "http://www.digpro.se/ ". Kontrollerad: 21 Nov 2007.
[108] Websida: LK Scandinavia AB: *LKSAB main page*, "http://www.lksab.se/". Kontrollerad: 21 Nov 2007.
[109] Websida: WSP Sverige: *WSP Sverige: Mät- och kartteknik*, "http://www.wspgroup.se/sv/Tjanster/Services-Container/Mat-och-kartteknik/". Kontrollerad: 21 Nov 2007.
[110] Websida: Riegl *Riegl laser measurement systems*, "http://www.riegl.com/". Kontrollerad: 20 Nov 2007.
[111] Websida: 3DFocus AB: *3DFocus main page*, "http://www.3dfocus.se". Kontrollerad: 21 Nov 2007.

[112] Websida: 3D Scanners Norden AB: *3D Scanners Norden main page*, "www.3dsnorden.se". Kontrollerad: 21 Nov 2007.
[113] C. Grönwall, T. Carlsson (later Chevalier) och F. Gustafsson, "Performance analysis of measurement error regression in direct-detection laser radar imaging", *ICASSP*, 2003.
[114] C. Grönwall, T. Chevalier, et al., "Methods for recognition of natural and man-made objects using laser radar data", Vol. 5412, sid. 310-320, presenterad vid *SPIE Defense & Security Conference on Laser Radar and Applications IX*, Orlando, FL, USA, 12-16 April, 2004.
[115] M. Elmqvist, "Automatic Ground Modelling using Laser radar Data", Linköping University. Linköping, Master's Thesis, LiTH-ISY/EX-3061, 2001.
[116] O. Steinvall, L. Klasén, et al., "Grindad Avbildning - fördjupad studie", FOI, Sensor Technology. Linköping, Scientific Report, FOI-R--0991--SE, Nov 2003.
[117] J. Busck och H. Heiselberg, "Gated viewing and high-accuracy three-dimensional laser radar", *Applied Optics*, 43(24), 2004.
[118] L. J. Sjöqvist, M. Henriksson, P. Jonsson och O. K. Steinvall, "Time of flight range profiling using time-correlated single photon counting", Vol. 6738, sid. 6738-23, presenterad vid *SPIE Europe Remote Sensing*, Florence, Italy, Sept, 2007.
[119] P. Andersson, "Automatic Target Recognition From Laser Radar Data – Applications to Gated Viewing and Airborne 3D Laser Radar", Swedish Defence Research Agency, FOI. Linköping, Scientific Report, FOI-R--0829--SE, 2003.
[120] A. M. Wallace, R. C. W. Sung, et al., "Detecting and characterising returns in a pulsed ladar system", *IEEE Proc. Vision, Image and Signal Processing*, 153(2):160-172, 2006.
[121] C. Niclass och E. Charbonm, "A Single Photon Detector Array with 64*64 Resolution and Millimetric Depth Accuracy for 3D Imaging", presenterad vid *IEEE International Solid-State Circuits Conference*, 2005.
[122] O. K. Steinvall, P. Andersson och M. Elmqvist, "Image quality for range gated systems during different ranges atmospheric conditions", Vol. 6396, sid. 6396-7, presenterad vid *SPIE Europe Remote Sensing*, Stockholm, Sept, 2006.
[123] O. K. Steinvall, "Reduktion av turbulensfädning hos laserkommunikationslänkar", FOI. Linköping, Scientific Report, FOI-R--0200--SE, 2001.
[124] R. C. Harney, "Information-based approach to performance estimation and requirements allocation in multisensor fusion for target recognition", *Optical Engineering*, 36(3):789-798, 1997.
[125] A. N. Vasile och R. M. Marino, "Pose-Independent Automatic Target Detection and Recognition using 3-D Ladar Data", *Lincoln Laboratory Journal*, 15(1), 2005.
[126] S. Jacquemond och S. Ustin, "Leaf optical properties: a state of the art", sid. 223-232, presenterad vid *8th International Symposium Physical Measurements & Signatures in Remote Sensing*, Aussois, France, 2007.
[127] O. Steinvall, T. Carlsson (later Chevalier), et al., "Laser Based 3-D Imaging. New Capabilities for Optical Sensing", FOI, Sensor Technology, FOI-R--0856--SE, April 2003.
[128] B. W. Schilling, S. R. Chinn, A. D. Hays, L. Goldberg och C. W. Trussell, "End-pumped 1.5 µm monoblock laser for broad temperature operation", *Applied Optics*, 45(25), 2006.
[129] S. M. Kay, *Fundamentals of Statistical Signal Processing, Volume 2: Detection Theory*, ISBN: 0-13-504135-X. Harlow, UK: Prentice-Hall, 1998.
[130] D. Letalick, H. Larsson, M. Carlsson och A.-C. Gustavsson, "Lasersensorer för strid i bebyggelse", Swedish Defence Research Agency, FOI. Linköping, Technical report, FOI-R--1431--SE, December 2004.
[131] J. Beck och K. Brorsson Läthén, "Visualisering av brottsplatser", Department of Science and Technology, vol. Master of Science in Media Technology and Engineering. Linköping: Linköping University, 2006, sid. 78. (http://www.diva-portal.org/diva/getDocument?urn_nbn_se_liu_diva-6274-1__fulltext.pdf)
[132] P. Nastell, "Realiserbarhetsstudie Teknisk och Personell Bevakning", Svenska Kraftnät, Slutrapport May 30 2002.
[133] L. Carlsson, M. Karlsson, et al., "Sensorer för smyganpassad UCAV", FOI. Linköping, Technical report, FOI-R--2134--SE, December 2006.
[134] Websida: Nyteknik: *Polisens drömbil kör själv*, "http://www.nyteknik.se/nyheter/fordon_motor/bilar/article44052.ece". H. Abrahamsson, Kontrollerad: Nov 15 2007.
[135] A. Sigfridsson, "Mätning av stamdiameter med markstående scanner", Sveriges Lantbruksuniversitet, Arbetsrapport 153, 2005.
[136] T. Chevalier, T. Winzell, et al., "Optroniska System 2004", FOI, Sensor Technology Nov 2004.

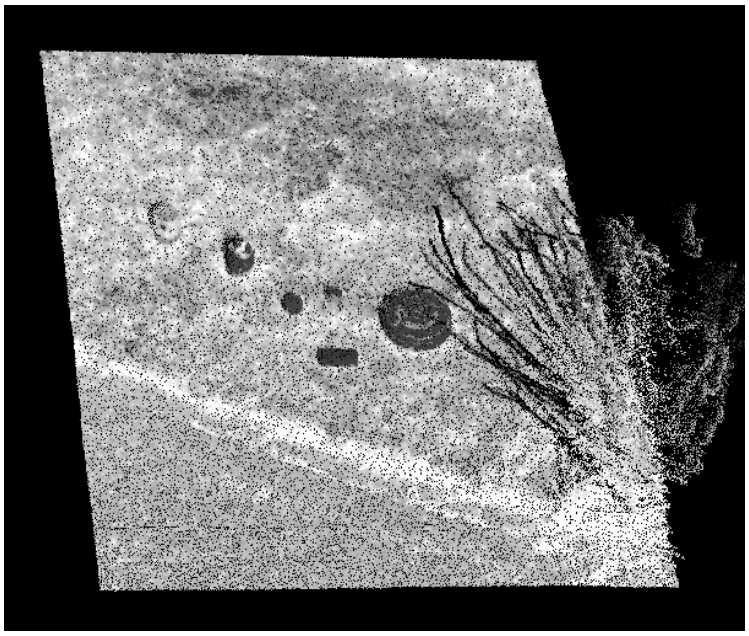
[137] S. Sjökvist, S. Abrahamson, et al., "MOMS multi optical mine detection system - initial report", FOI. Linköping, FOI-R--1721--SE, 2005.
[138] R. Hintz et al., "LADAR System Architectures for Military Applications", NATO SET 077/RTG45, To be published.
[139] S. Nilsson, D. Axelsson, et al., "Teknisk värdering av nya sensorförmågor för strid i begyggelse - slutrapport", FOI. Linköping, Technical Report, FOI-R--2138--SE, December 2006.
[140] S. Nilsson, M. Gustafsson, et al., "Radar sensorer för urban miljö - slutrapport", FOI. Linköping, Technical Report, FOI-R--2137--SE, December 2006.
[141] D. Letalick et.al., "Värdering av avancerade sensorer för användning i det skadebegränsade arbetet", FOI. Linköping, FOI Dnr 06-417, 28 Feb 2006.
[142] D. Letalick, P. Andersson, et al., "MOMS - Progress report 2006", FOI. Linköping, Technical Report, FOI-R--2147--SE, December 2006.
[143] H. Larsson, "Mätrapport Laserradarmätningar av skog vid Remmingstorp", FOI. Linköping, Internal Report, FOI-D--0267--SE, Sept 2006.

Bilaga A. Mätningar

Detta appendix innehåller en komplett förteckning över de mätningar som utförts inom projektet samt en del mätningar som har bäring på projektet men som helt eller delvis har finansierats från annat håll.

A.1 Minor (2005-01-18)

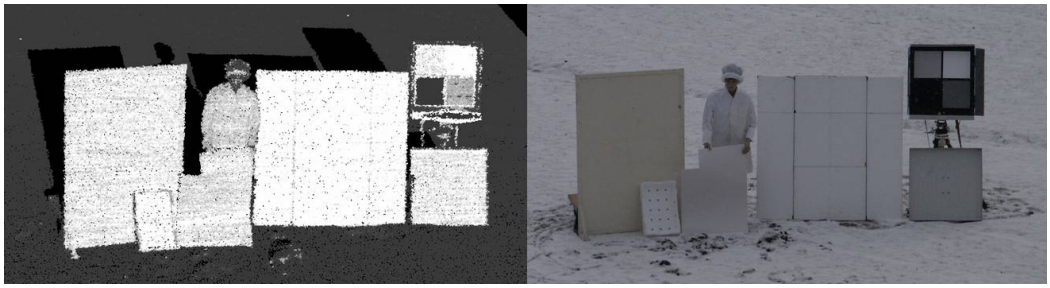
De första mätningarna på minor och små föremål med laserradar. Vi undersökte vad vi kan lösa upp både i avstånd och storlek med ILRIS.



Figur 99. Minor mätta med ILRIS. Dessa syntes väl både geometriskt och i intensitet.

A.2 Vitt scenario vid 1,5 µm (2005-01-28)

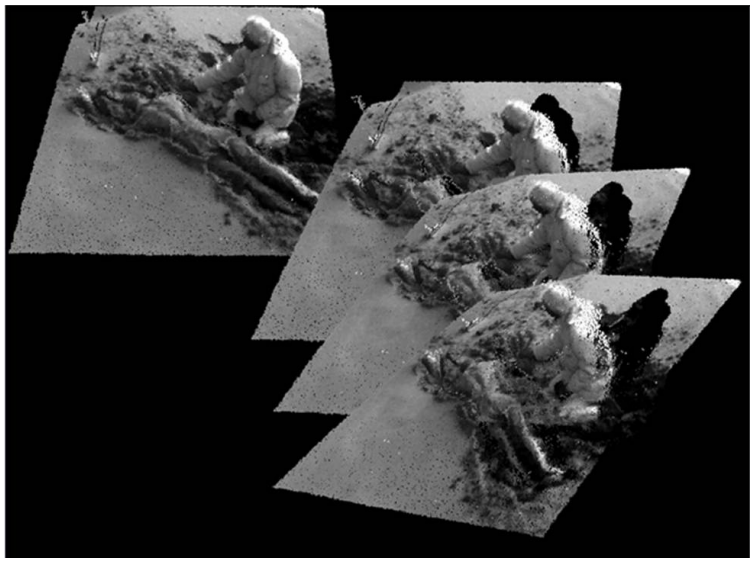
Tidigare hade det gjorts omfattande mätningar på snöreflektion vid 1,5 µm. Detta var kompletterande mätningar till ett konferensbidrag och en artikel [17, 24] om snö-reflektion. Syftet med dessa mätningar var att visa hur saker i förgrunden framträder i kontrast med snön som blir svart vid 1,5 µm. Mätningar utfördes både med ILRIS och Riegl.



Figur 100. Vitt scenario, överst intensitetsbild vid 1.5 µm och underst en visuell bild.

A.3 Jämförelse och komplettering med IR vid snömätning (2005-02-14)

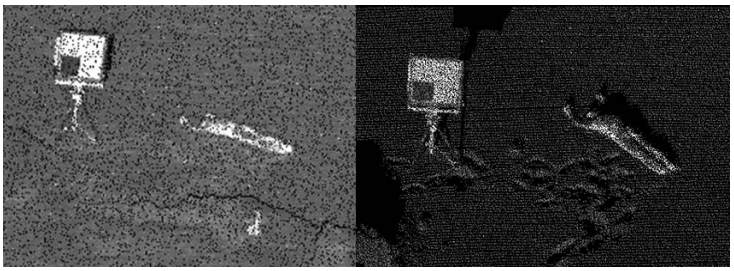
Detta var också mätningar som var kompletterande till artiklarna om snöreflektion [17, 24]. 3-D jämfördes med IR (3-5 μm) avseende kontrast och fusionerades med IR. Mätningarna utfördes med ILRIS.



Figur 101. IR-texturerat punktmoln.

A.4 Spår i snö (2005-02-15)

Mätningens syfte var att visa att 3-D information är användbart vid sökning efter mänsklig aktivitet. Detta är särskilt belysande då djupinformationen presenteras i en annan vinkel än den insamlade. Denna mätning användes som ett exempel i ett konferensbidrag [24] på mänsklig aktivitet i snö. Mätningarna utfördes med ILRIS.



Figur 102. Illustration av mänsklig aktivitet i snö. Då punktmolnet vrids kommer fotspåren i snön tydligt fram.

A.5 Mätning av gran- och tallskog åt Sveriges Lantbruksuniversitet (SLU) (2005-02-08--10)

Syftet med dessa mätningar var att samla in underlag för mätning av träds diameter i såväl gran- och tallskog. Data samlades in med ILRIS och användes i ett examensarbete på Sveriges Lantbruksuniversitet [135]. Mätningarna utfördes med ILRIS.

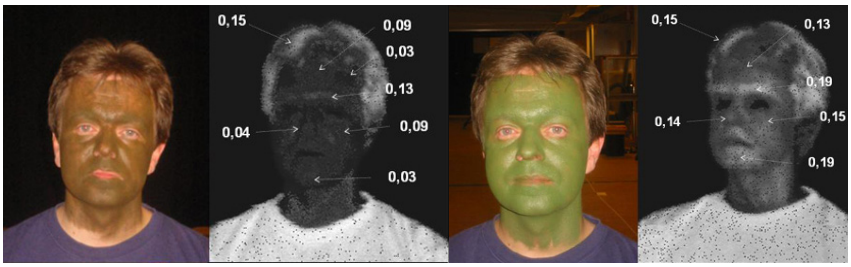
Figur 103. Granskog insamlad med ILRIS.

A.6 Kamouflagenät (februari och april 2005)

Kamouflagenät mättes avseende penetration och reflektion och har avrapporterats i hemlig rapport.

A.7 Ansiktsfärg (2005-03-15)

Vi hade året innan studerat reflektans av mänsklig hud [43, 136] och ville se hur militär ansiktsfärg påverkade reflektionen. Mänsklig hud är absorberande vid 1,5 µm och därför lågt reflekterande. Kamouflagefärgen höjde reflektionen, vilket kan vara en fördel då dessa reflektionsvärden bättre överensstämmer med naturens. Mätningarna utfördes med ILRIS, och finns avrapporterat i [8].



Figur 104. mätning av militär kamouflagefärg.

A.8 Förprov inför MOMS i Eksjö (2005-05-11)

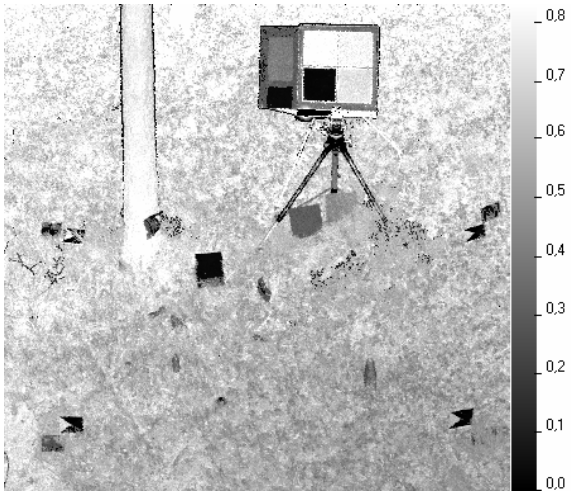
De första mätningarna utfördes av den så kallade gräsrutan, som vi sedan har fortsatt att mäta minor i inom MOMS-projektet (E3084). Testarean används fortfarande (hösten 2007). Dessa mätningar var förprov inför en kampanj i Eksjö i maj 2005. Status kontrollerades både på ILRIS och Riegl. ILRIS hade varit på en kalibrering och reparation och status på ILRIS diagnostiserades till dålig. Vi började efter detta diskutera en uppgradering av ILRIS.

A.9 Mätning av hus i FOIs omgivning (2005-05-13)

Mätning både med ILRIS och Riegl för att belysa styrkan med data i 3-D i urban miljö. Figur 45 är från denna mätning.

A.10 Mätkampanj SWEDEC i Eksjö (2005-05-17--18)

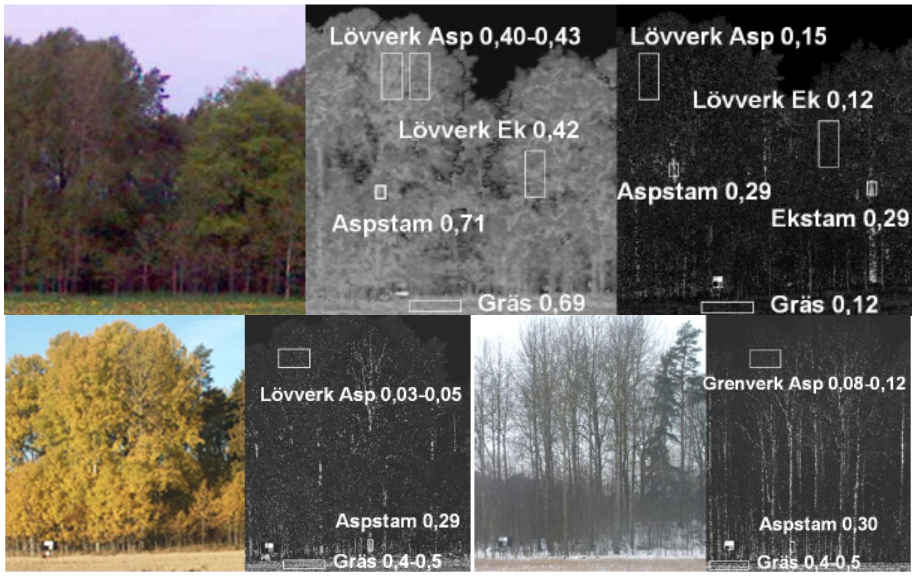
ILRIS deltog som en aktiv sensor bland många passiva sensorer. Reflektans och spatiella fenomen undersöktes med ILRIS. Riegl användes för att dokumentera provområdet. Mätningarna finns avrapporterade i flera rapporter [137]. Datamängderna från ILRIS har använts omfattande inom MOMS för att utröna spatiella systembegränsningar och algoritmutveckling inom 3-D.



Figur 105. Mätning av minor .

A.11 Bakgrundsmätningar (2005-05-26)

Olika trädridåer hade tidigare mätts under höst och vinter och detta var den avslutande sommarmätningen. Syftet var att undersöka hur reflektansen förändrades med årstiderna och också titta på penetrering av skog, hur långt in det skulle kunna vara möjligt att detektera mål från en markbunden laserradar. Gran, tall, björk, asp samt ek undersöktes. Mätningar utfördes både med ILRIS och Riegl för att erhålla två olika våglängder.



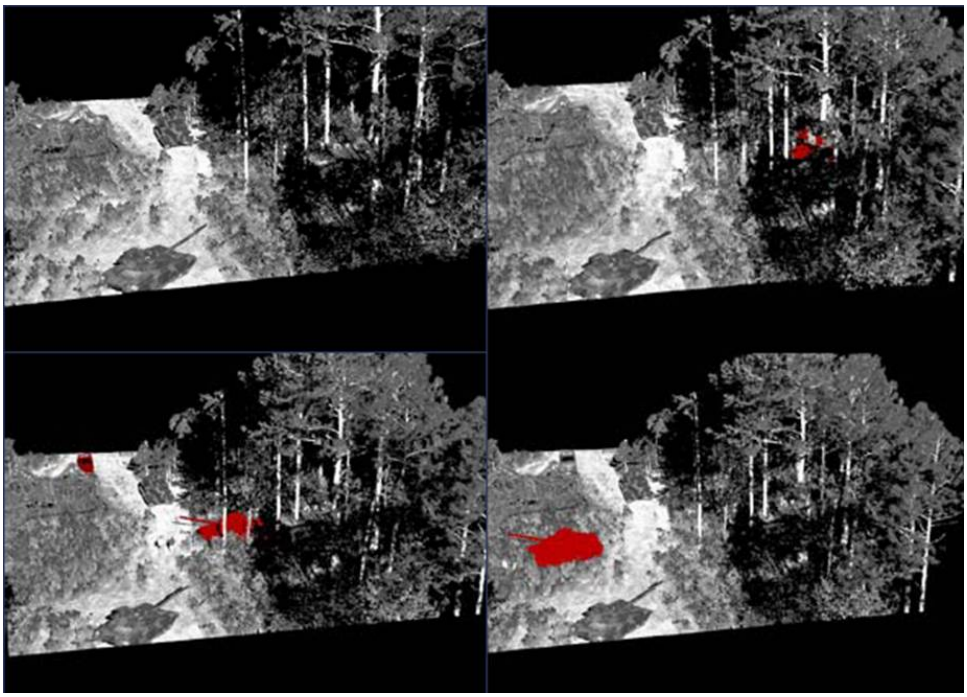
Figur 106. Mätning av reflektans hos vegetation under årstidsvariationer.

A.12 Leveranskontroll ILRIS (2005-09-27--29)

I juni tvingades vi att på nytt skicka ILRIS på reparation. Efter ett kostnadsförslag tog vi beslutet att lösa in vår gamla enhet och köpa en ny. Vi fick den nya enheten levererad i slutet på september 2005. Under några dagar utfördes leveranskontroll och upplärning av systemet innan den skickades iväg till Huntsville

A.13 Huntsville (2005-10-17--28)

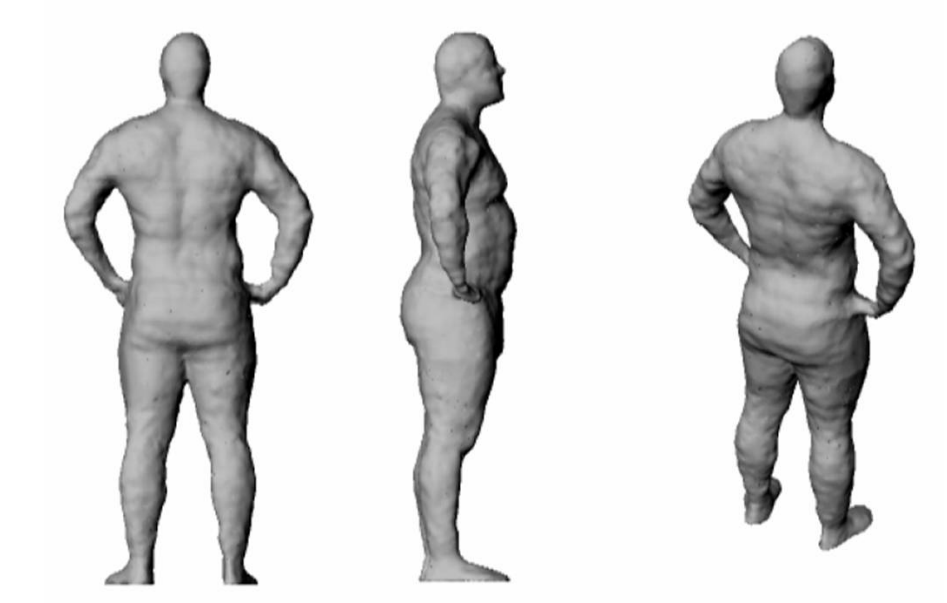
Inom NATO-gruppen N-Dimensional Eye safe Imaging LADAR (NDEAL) NATO SET-077/RTG45 utfördes en mätkampanj vid Redstone Arsenal, Alabama, USA och projektet deltog med manskap och ILRIS. Övriga nationer och forskarteam var USA, US Air Force (både AFRL och Eglin), US Navy (Night Vision), US Army (AMRDEC), CIDA Spanien och DRDC Kanada. Syftet med mätningarna var att samla in gemensamma data från olika Lidarutrustningar och utbyta erfarenhet. Mätningarna sammanfattades som en milstolpe för projektet första kvartalet 2006 [3]. NATO-gruppen har också satt samman en rapport [138].



Figur 107. Fyra olika scener för förändringsdetektion fångade med ILRIS i Huntsville, USA. Bild FOI.

A.14 CAD-modell av människa (2005-11-17 samt 2006-03-03)

Mätning av människa som figurerat mål åt THz-radar. Mätningarna utfördes först med Riegl som för dessa ändamål är för dålig avseende upplösning. Personen mättes senare om med ILRIS, då med ett bättre resultat. Som vi kan se i har även ILRIS svårt att lösa upp detaljer som till exempel fingrar, tår och öron etc. Modellen illustrerar en individ som stått mål vid mätningar med THz-radar. Mätningen har avrapporterats i [139, 140].



Figur 108. CAD-modell av människa. Bild FOI.

A.15 Platsen för Linköpingsmorden (2005-12-01)

Mätning av platsen för Linköpingsmorden. Data användes till ett examensarbete om visualisering av brottsplatser [131]. Avståndsdata från laserskanner kombinerades med 2D-foto och projicerades på en cylinder. Tekniken gör att det går att mäta avstånd i en 2D-bild och tala om vad som faktiskt går att se från en viss punkt. Kan ett vittne verkligen ha sett det han/hon såg från en beskriven position? Mätningarna utfördes med Riegl.

Figur 109. Till vänster visas avståndsbilden och i mitten 2D-fotot, vilka båda har projicerats på en cylinder. Till höger visas ett 2D-foto vari det går att mäta avstånd direkt.

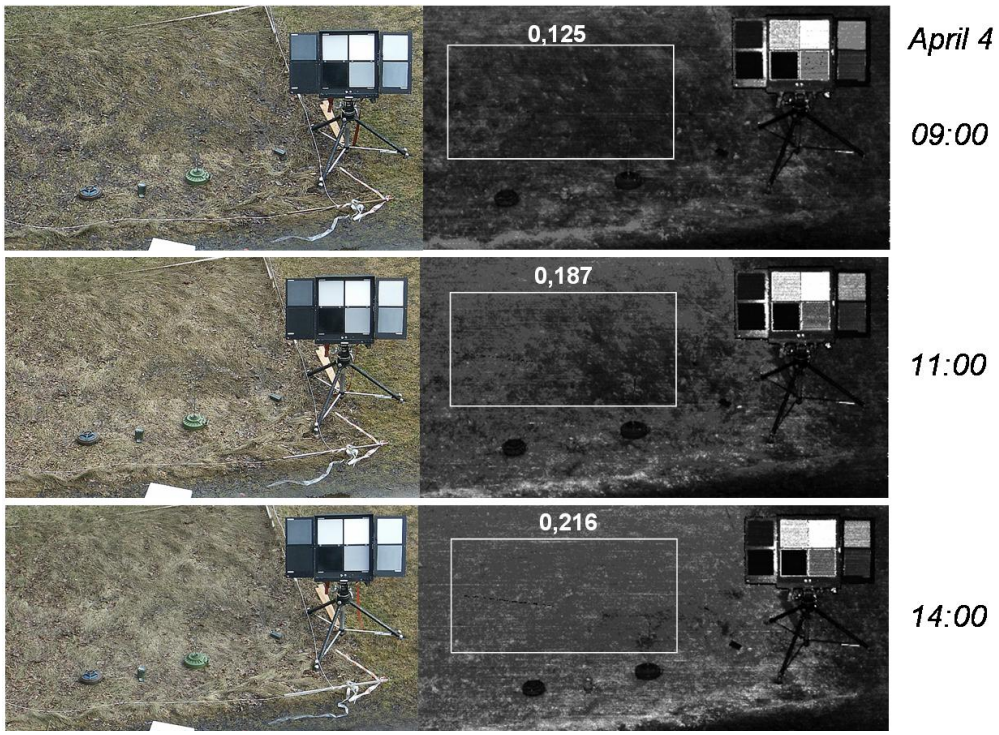
A.16 Brandförsök i modelltunnel på Sveriges Provningsanstalt (2006-02-16 samt 2006-02-23)

Mätning genom rök och eld med skannade laserradar (ILRIS), gated viewing (GV), termovision samt video. Laserradar visade sig kunna se genom eld och lättare rök och kan vara ett komplement till IR-sensorer vid bränder. Mätningarna låg till grund för en ansökan till ett forskningsprojekt via Räddningsverket [141]. Denna fick senare avslag.

Figur 110. Punktmoln från ILRIS till vänster (målet syns bakom elden och lättare rök) och en visuell bild till höger.

A.17 Minor, mätning av geometri och reflektans (feb 2006-nov 2006)

Under perioden feb 2006 till november 2006 gjordes mätningar av minor och bakgrund i gräsrutan på FOI. Totalt utfördes 80 mätningar under 35 olika dagar för att mäta på ett antal fast placerade minor och följa dessa under alla årstiderna. Reflektansmätningarna är avrapporterade [142] och data används fortfarande 2007 för fortsatt analys av fenomen och algoritmutveckling inom detektion av små skylda mål.



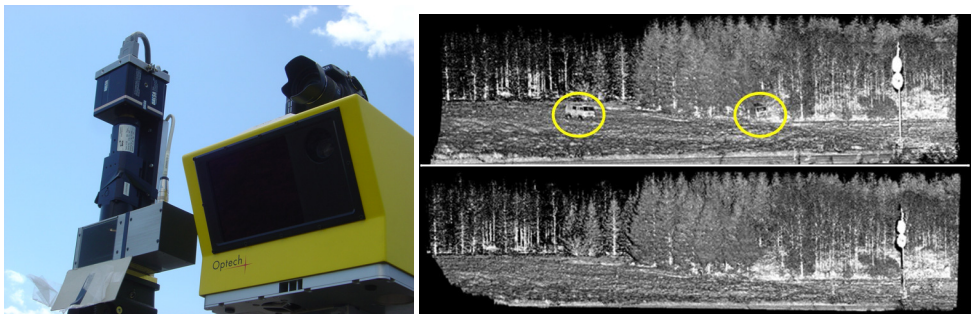
Figur 111. Mätning av reflektion i gräsrutan. Marken torkar upp några timmar efter regn och en markant höjning visas av reflektansvärdena.

A.18 ILRIS prestandamätningar (feb 2006-mars 2006)

Mätningarna för kontroll av ILRIS prestanda resulterade i en rapport [13]. Denna rapport är ett samlat dokument om ILRIS och dess kringutrustning och dess användning på FOI och tar upp fördelar/nackdelar med ILRIS, dess möjligheter/begränsningar, mätning med 3D, mätning av reflektans mm.

A.19 Ströplahult Norra (2006-05-23--24)

ILRIS och en Imspec (hyperspectral sensor) mätte tillsammans både större skylda mål (militära fordon) i skog samt minor. Mätningar för optisk sensorkalibrering utfördes också för att kunna fusionera data. Data från mätningarna har bland annat använts till två examensarbeten [6, 9]. Beskrivning av mätningarna finns i separat rapport [41].



Figur 112. Till vänster en bild av de båda systemen som användes Imspec och ILRIS och till höger två intensitetsbilder från ILRIS som visar på mätning av förändringsdetektion.

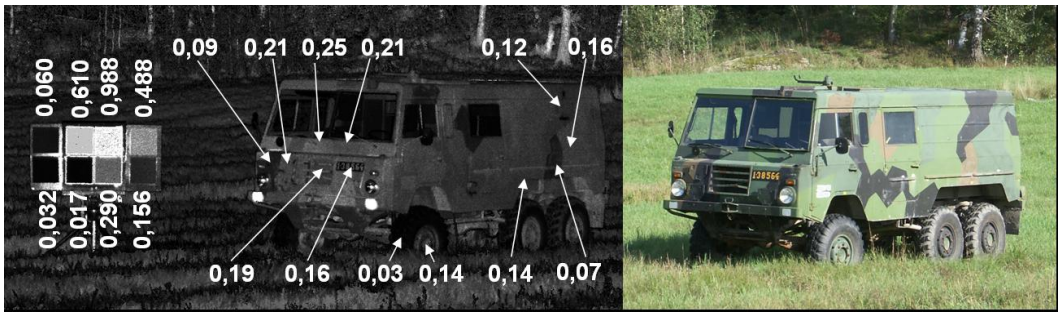
A.20 Mätning från mobil kran (2006-06-08)

ILRIS monterades i ett vridbord hängande i en mobil kran på 55 m höjd. Scener samlades in för att skapa en datamängd av fordon både i vegetation och i urban miljö, med ett synfält registrerat uppifrån, för att utveckla metoder för detektion av fordon, förändringsdetektion och även sammanslagning av scener såväl från en position som från placering av sensor på olika positioner. I samband med proven gjordes även ett antal datainsamlingar av minor för projektet MOMS. Beskrivning av mätningarna finns i separat rapport [40].

Figur 113. ILRIS monterad i den mobila kranen.

A.21 Försök med grindad avbildning (2006-08-22--24)

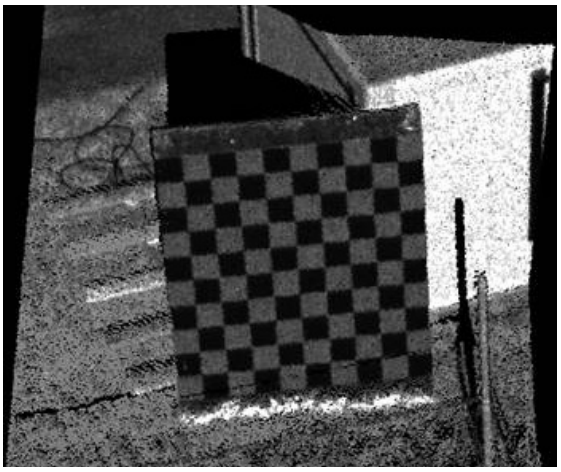
ILRIS användes för att dokumentera ground truth vid försök med grindad avbildning. Ett par mätningar av fordon skyld av rök från rökgranat gjordes också. Reflektansmätning av Terrängbil 13 gjordes också.



Figur 114. Reflektansmätning av Terrängbil 13.

A.22 Samverkande sensorer, underlag för optisk kalibrering (2006-09-25)

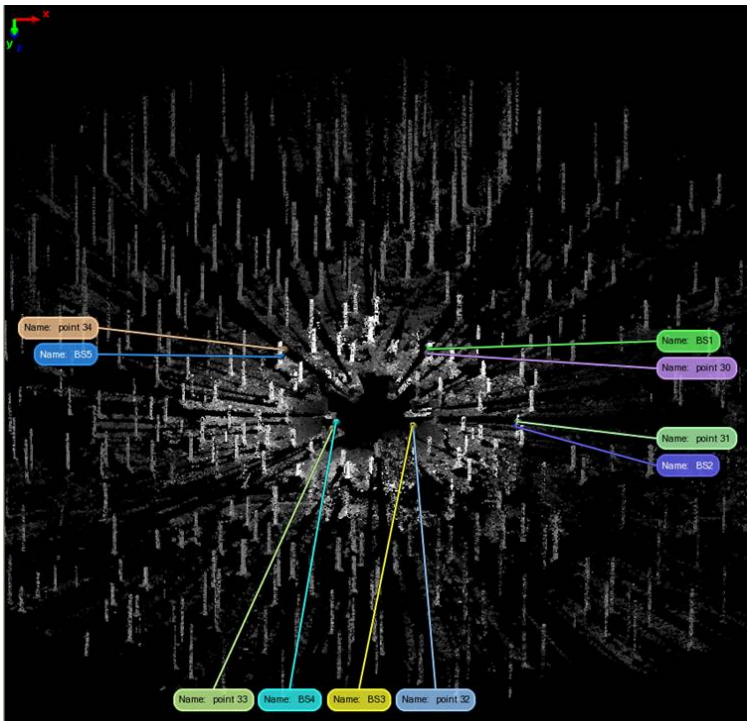
Dessa mätningar var kompletterande mätningar för optisk sensorkalibrering (se Avsnitt A.19) som en del till examensarbete [9]. Mätningar utfördes både inomhus och utomhus med ILRIS stående i två fasta positioner och målet på en mängd olika positioner.



Figur 115. Målet som mättes var en 1 m^2 stor schackmönstrad platta.

A.23 Mätning av skog i Remmingstorp (2006-09-11--20)

Mätningen utgjorde en del av projektet ”Påbyggnad av träddatabas samt detaljmätning med markstående laserskanner på Remmingstorp” på Sveriges Lantbruksuniversitet i Umeå. Området Remmingstorp har tidigare laserskannats från det flygburna systemet Topeye. Mätningen utfördes på uppdrag av SLU och bestod i att dokumentera 6 provytor granskog om vardera 80×80 m med laserradar. ILRIS användes som mätutrustning. Mätningarna finns dokumenterade i separat mätrapport [143]. På uppdrag från SLU har dessa datamängder också georefererats under 2007.



Figur 116. Bilden visar ”Provyta 4” med kontrollpunkter utsatta.

A.24 Vågform (2006-10-05 samt 2006-10-09)

ILRIS analoga utgångar utnyttjades för att studera vågformen vid penetration. Mina användes som mål bakom skyl. Signaler samlades in med oscilloskop för fortsatt analys av avfaltningsalgoritmen. Resultatet blev till ett konferensbidrag [18], och del i MOMS-rapporten [142].

A.25 Mätning av elkabel/elvajer (2006-12-07--18)

På uppdrag utfördes mätningar av elkabel/elvajer och dessa har avrapporterats i en hemlig rapport.

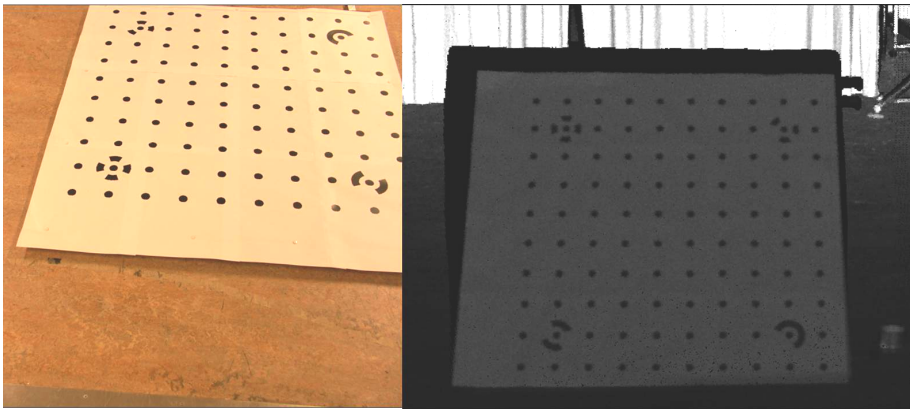
A.26 Rhyzeliusgården Linköping (2006-12-18)

Efter kontakt med Linköpings stift ordnades en demomätning av Rhyzeliusgården i Linköping. Mätningen gjordes med ILRIS. Med på denna demo var förutom stiftet även Östergötlands länsmuseum och Riksantikvarieämbetet. Syftet var att visa på möjligheten att dokumentera gamla byggnader med laserradar och då särskilt dess stensättning, vilket lagen säger att så måste göras då till exempel rappningen tas ner på gamla kyrkor. 3D fusionerades med foto för färgtexturerad 3-D modell. Resultatet från dessa mätningar var till belåtenhet och resulterade i ett uppdrag från Linköpings stift (Älvestads kyrka kapitel A.29). Vi har fortfarande en dialog med Riksantikvarieämbetet om samarbete. Vidare har vi option på att ingå i ett pilotprojekt med laserskanning av Flistad kyrka, utanför Linköping, med trolig start någon gång 2008.

Figur 117. Punktmoln av Rhyzeliusgården i Linköping texturerad med färg. Bild FOI.

A.27 Kalibrering sensorfusionering (2006-12)

ILRIS, IMSPEC samt stillbildskamera mätte samma vyer. Datamängderna användes för att utvärdera mjukvaran Photomodeler vilket är en programvara för sensorkalibrering.

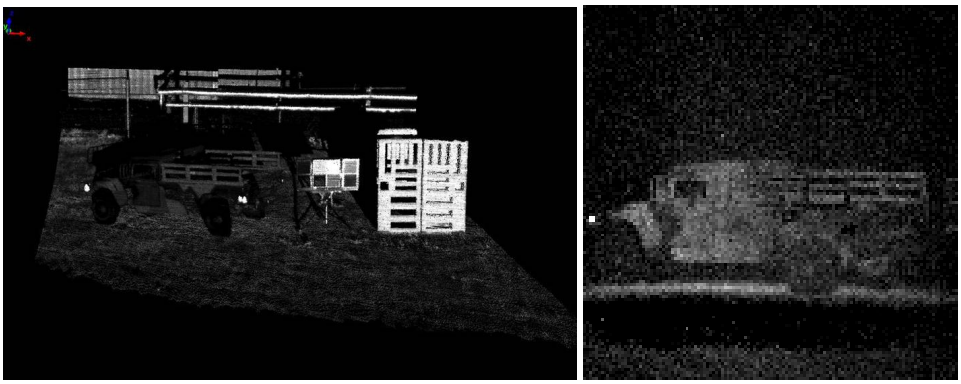


Figur 118. Samma må mätt med stillbildskamera till vänster samt ILRIS till höger. (Bildexemplen visar inte samma vy).

A.28 Jämförande mätningar mellan skannande laserradar och ladar med 3D-FPA (2007-02-01--07)

Som en del av ett möte med Air Force Research Laboratory (AFRL) i Dayton, Ohio, USA utfördes ett fältförsök. Under 5 mätdagar registrerade vi samma scener både med ILRIS och AFRL´s senaste system från Advanced Scientific Concepts (se kapitel 4.1). Mätningarna har inte avrapporterats tidigare, utan blir istället en del i kommande arbete som mer inriktas mot dynamiska mätningar. Data samlades in både från marknivå (lab i lastbil) och från AFRL´s horisontlabb på femte våningen, se Figur 119. Målområdena var de samma från båda platserna. Målobjekten ställdes både öppet och skylt. Eftersom

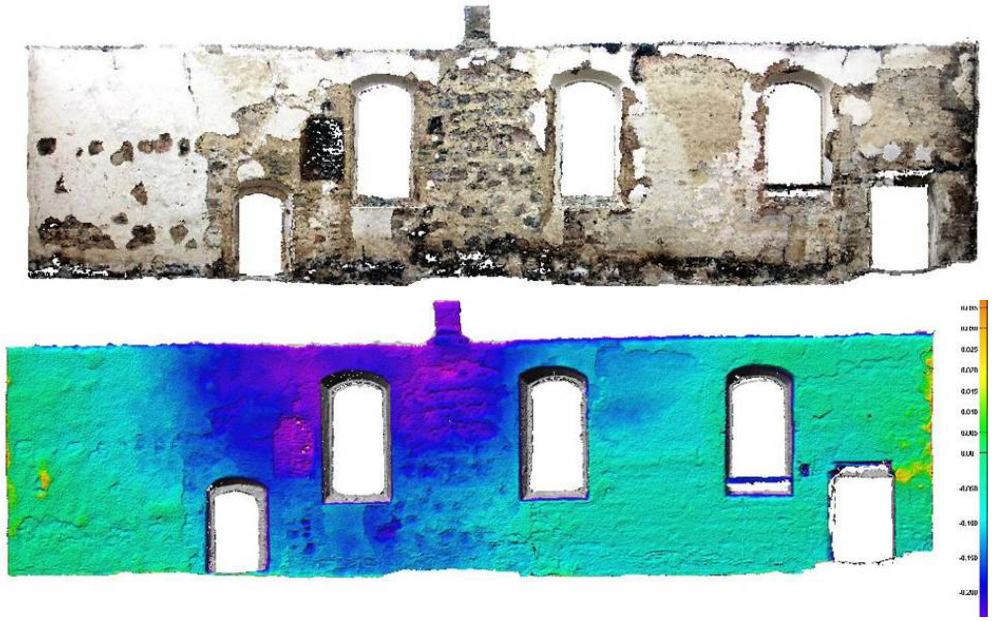
AFRL´s sensor klarar av att mäta upp till ett par kilometer i gynnsamma förhållanden utfördes även mätningar över längre avstånd där ILRIS inte deltog. ILRIS mätte på nära håll (50-100m) det hangarområde som AFRL ofta nyttjar som målområde och detta blev till en modell innehållande över 12 miljoner mätpunkter .



Figur 119. Mätexempel från marknivå, HUMVEE med reflektansmål och geometriskt mål. Data från ILRIS till vänster och rådata från AFRL´s sensor till höger (Tid för mätningen 2007-02-02 09:02)

A.29 Älvestad kyrka (2007-04-27)

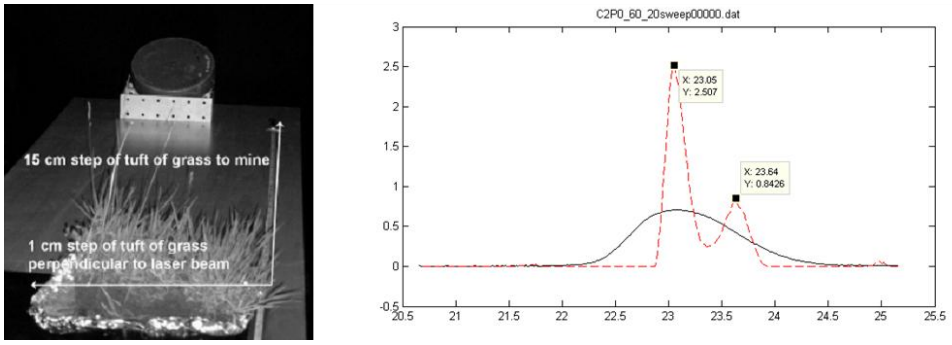
I april brann Älvestad kyrka utanför Linköping. På uppdrag från Linköpings stift mättes kyrkans väggar inifrån och då särskilt den södra väggen där både intressanta målningar och stensättning kommit i dager efter branden. Då ILRIS var på reparation i Toronto användes Rieglskannern för dessa mätningar. Uppdraget bestod i att visa vad laserradartekniken kan tillföra dokumentation av stensättning. Till stiftet har levererats tre CAD-ritningar av den södra väggen i skala 1:40 (konturritning, färgtexturerad ritning som visar väggens stensättning samt en felkarta som tydligt visar väggens krökning), se Figur 120.



Figur 120. Översta bilden visar den färgtexturerade modellen av den södra väggen i skala 1:40 och den nedre bilden är den så kallade felkartan som visar väggens krökning. Färgfiltreringen visar ortogonala avståndet från betraktaren från grönt till violett. Färgskalan visar totalt 30 cm djup.

A.30 Vågform (2005-05-25)

ILRIS analoga utgångar utnyttjades för att studera vågformen vid penetration. Mina användes som mål bakom en grästuva. Signaler samlades in med oscilloskop för metodbeskrivning analys till ett konferensbidrag [18].



Figur 121. Mätuppställning till vänster med en mina placerad bakom en grästuva. Till höger visas en graf med detektorns pulssvar i svart och den röda kurvan är den avfaltade signalen. I exemplet är avståndet mellan tuva och mina 60 cm. Detektorn kan inte lösa upp de båda ekona (svart signal), men med avfaltning visas två tydliga ekon med 60 cm avstånd.

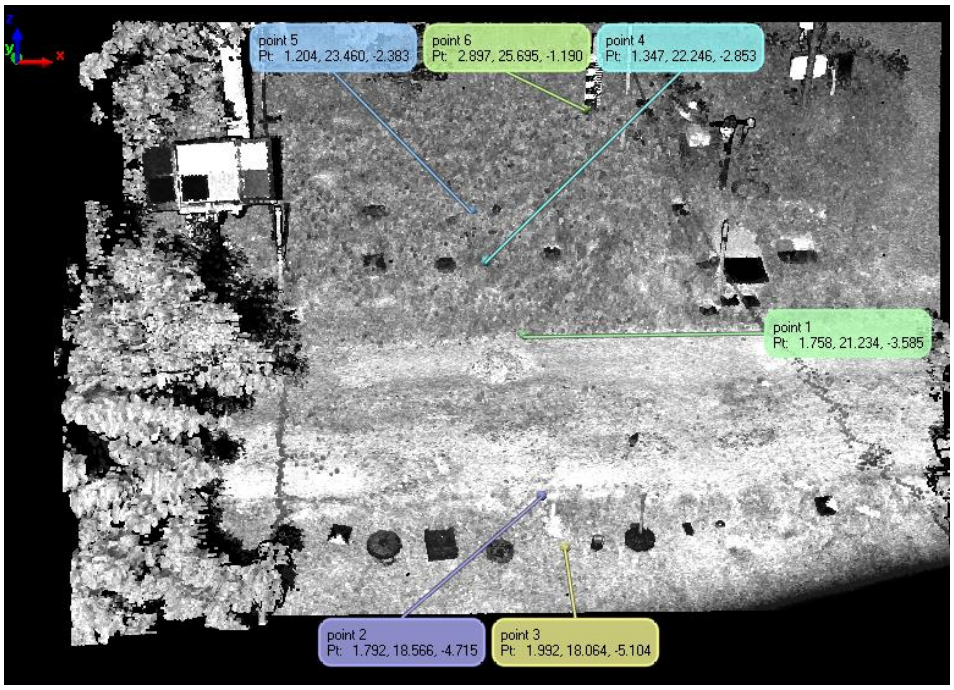
A.31 Förändringsdetektion av personbil (2007-05-31)

TAIS-projektet *Prerunners* eftersökte datamängder för analys av förändringsdetektion. En personbil mättes flera gånger med små förflyttningar mellan varje mätning. Datamängden har än i november 2007 inte används.

Figur 122. Mätning av förändringsdetektion på en personbil. Små förflyttningar gjordes mellan varje mätning.

A.32 Mätning inom MOMS tillsammans med FFI (2007-06-12--13)

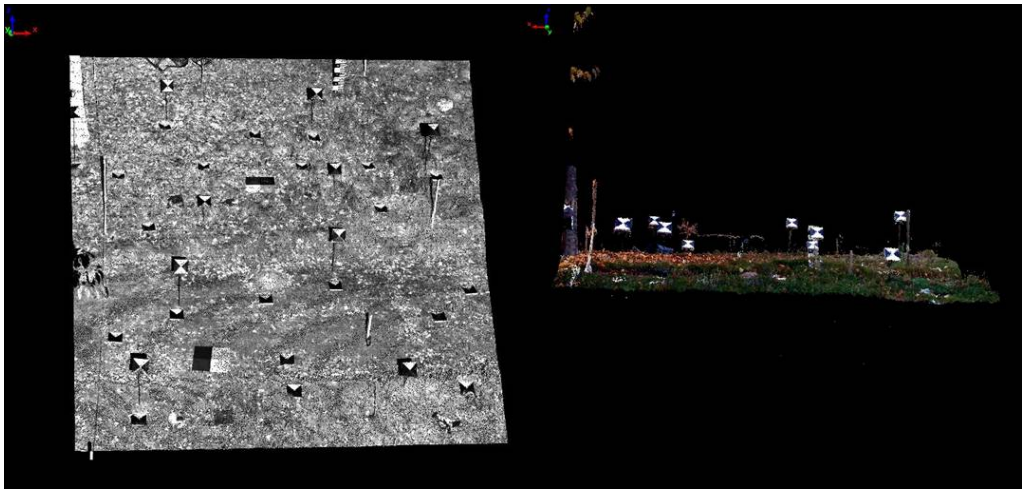
Under stor del av 2006 användes ILRIS vid mätningar mot ”Gräsrutan” med minor för att studera spatiella fenomen samt mäta reflektion (Se kapitel A.17) under lång tid och flera årstider. SC3000 mätte också för att studera termiska egenskaper. Under våren 2007 deltog även andra sensorer för fenomenanalys vid andra våglängder. ILRIS var efter fältförsöket i Huntsville först i Sverige och vände för att sedan repareras i Toronto (byte av galvanometer) och deltog därför inte under vårens mätningar. Dessa mätningar med FFI var i huvudsak passiva och FFI kompletterade denna sensorarsenal med ett par utrustningar inom SWIR. ILRIS mätte ”Gräsrutan” avseende reflektans och även en geometrisk avbildning av provområdet.



Figur 123. Geometrisk avbildning av provområdet ”Gräsrutan”.

A.33 Förprov inför Eksjökampanjen (2007-10-04--05 samt 2007-10-11)

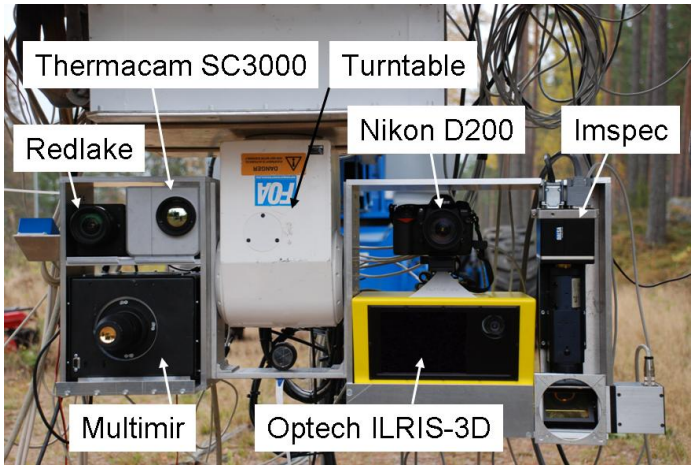
Inför MOMS-försök på SWEDEC i Eksjö tillverkades en fixtur vari fyra passiva sensorer, ILRIS och en stillbildskamera monterades. Fixturen förbereddes för placering både på stativ och även för montering i vridbord som i sin tur skulle placeras i en teleskopbomlift vid försöken i Eksjö. Dessa mätningar var ett förprov för att titta på sensorernas teckningsgrad och också undersöka metod för optisk sensorkalibrering. Genom lite manuellt arbete bestämdes de geometriska kopplingarna mellan sensorerna och i och med detta kan sensorernas bilder kombineras, se exemplet i Figur 124.



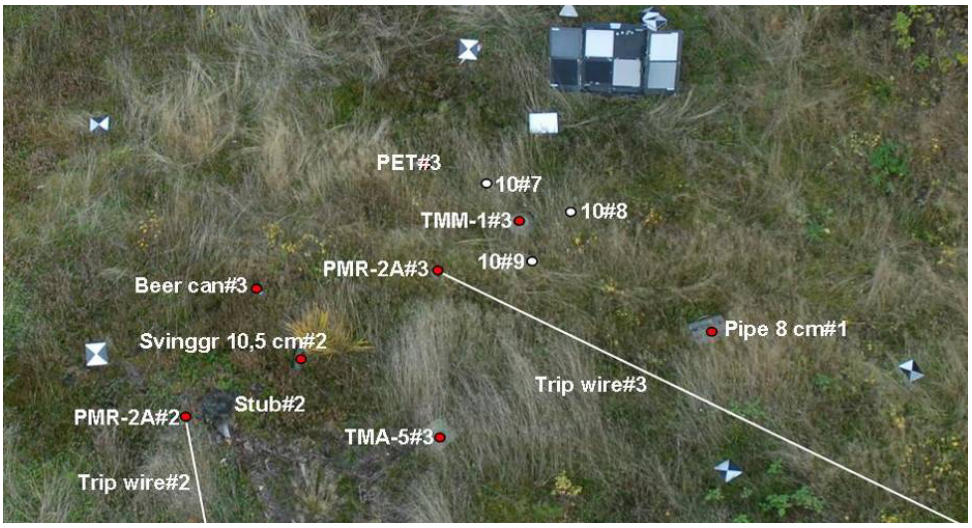
Figur 124. Till vänster intensitetsbild från ILRIS och till höger samma punktmoln, dock i annan vinkel, och med textur från CCD-kameran.

A.34 Mätning av minor, SWEDEC, Eksjö (2007-10-15--19)

Den tidigare använda fixturen (Förprov inför Eksjökampanjen) placerades nu monterad i ett vridbord som i sin tur placerades monterad i en teleskopbomlift. Syftet med mätningarna var att simulera en UAV med hjälp statiska mätningar på en konstant höjd av 15 m. Typfallen hygge, skog, väg samt ris mättes i de specificerade moderna anflygning och spaning. En mängd minor och klotterobjekt placerades ut i dessa typfall. Optisk sensorkalibrering utfördes på plats i ett par omgångar. Syftet med mätningarna var att utföra kontrollerade mätningar för att kunna fusionera data. Mätningarna gjordes även för fortsatt analys av fenomen inom MOMS.



Figur 125. De sensorer som var monterade i fixturen.



Figur 126. En schematisk bild som visar var minor fanns placerade i typfallet hygge.