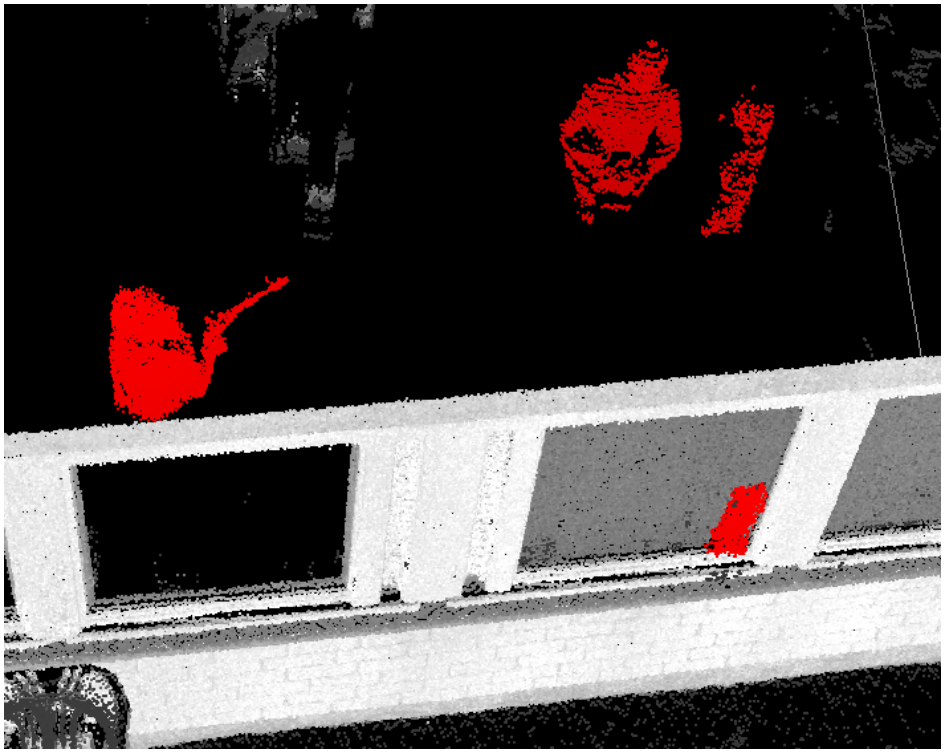
FOI-R--1431--SE
December 2004
ISSN 1650-1942
Teknisk rapport

Dietmar Letalick, Håkan Larsson, Marie Carlsson, Ann-Charlotte Gustavsson

Lasersensorer för strid i bebyggelse



Sensorteknik
581 11 Linköping

TOTALFÖRSVARETS FORSKNINGSINSTITUT

Sensorteknik
Box 1165
581 11 Linköping

FOI-R--1431--SE

December 2004

ISSN 1650-1942

Teknisk rapport

Dietmar Letalick, Håkan Larsson, Marie Carlsson, Ann-Charlotte Gustavsson

Lasersensorer för strid i bebyggelse

Utgivare
Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI
Sensorteknik
Box 1165
581 11 Linköping

Rapportnummer, ISRN
FOI-R--1431--SE

Klassificering
Teknisk rapport

Forskningsområde
4. Ledning, informationsteknink och sensorer

Månad, år
December 2004

Projektnummer
E3065

Delområde
42 Spaningssensorer

Delområde 2

Författare/redaktör
Dietmar Letalick
Håkan Larsson
Marie Carlsson
Ann-Charlotte Gustavsson

Projektledare
Stefan Nilsson

Godkänd av
Ove Steinvall

Uppdragsgivare/kundbeteckning
Försvarsmakten

Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig
Ove Steinvall

Rapportens titel
Lasersensorer för strid i bebyggelse

Sammanfattning (högst 200 ord)

Med en avbildande 3D-laserradar kan fjärrmätning av 3-dimensionella objekt göras med cm-noggrannhet. Detta kan utnyttjas till att ”se in” genom fönster och registrera vad som finns inne i en byggnad. Vi demonstrerar att detta är möjligt även då det finns fördragna gardiner (ej helt täta) eller persienner i fönstren. En förutsättning för en mätning är att en del av den belysande laserstrålningen kan tränga igenom och komma in i lokalen.

Med en 3D-laserradar monterad på en flygande plattform kan topografiska data mätas upp. Sådana sensorer är också användbara i urbana miljöer, inte minst för att det ger möjlighet till aktuell information. I en stadsmiljö kan 3-D-modeller för att avgöra vilka sektorer som kan bevakas från en viss punkt, alternativt avgöra vilka sektorer som är farliga ur hotsynpunkt.

Genom att studera vibrationer i byggnader och objekt med laservibrometri (koherent laserradar) kan rörelser och aktiviteter klarläggas. Tekniken kan användas för diskriminering av skenmål och verkansverifiering (om motorn i ett stridsfordon stannar efter en vapeninsats kan slutsatsen dras att fordonet är utslaget).

Nyckelord
laserradar, 3D-avbildning, vibrometri

Övriga bibliografiska uppgifter

Språk Svenska

ISSN 1650-1942

Antal sidor: 30 s.

Distribution enligt missiv

Pris: Enligt prislista

FOI1003 Utgåva 12 2002.11 www.signon.se Sign On AB

Issuing organization
FOI – Swedish Defence Research Agency
Sensor Technology
P.O. Box 1165
SE-581 11 Linköping

Report number, ISRN
FOI-R--1431--SE

Report type
Technical report

Programme Areas
4. C4ISTAR

Month year
December 2004

Project no.
E3065

Subcategories
42 Surveillance Sensors

Subcategories 2

Author/s (editor/s)
Dietmar Letalick
Håkan Larsson
Marie Carlsson
Ann-Charlotte Gustavsson

Project manager
Stefan Nilsson

Approved by
Ove Steinvall

Sponsoring agency
Swedish armed forces

Scientifically and technically responsible
Ove Steinvall

Report title (In translation)
Laser sensors for urban warfare

Abstract (not more than 200 words)

With an imaging 3D laser radar remote sensing of 3-dimensional objects can be done with cm accuracy. This can be utilized to “see through” windows and record objects inside a building. We demonstrate that this is possible even though the curtains are drawn (not completely compact) or with Venetian blinds down. A requirement for such a recording is that part of the transmitted laser illumination can penetrate into the room.

With an airborne 3-D laser radar topographical data can be measured. Such sensors are also useful in urban environments, especially because this gives the possibility for up-to-date information. In a MOUT scenario 3-D models can be used to determine which sectors can be covered from a particular position, alternatively which sectors that can be exposed to a threat.

By studying vibrations in buildings and objects with laser vibrometry (coherent laser radar) movements and activities can be detected. The technique can be used for discriminating decoys and for battle damage assessment.

Keywords
laser radar, 3-D imaging, vibrometry

Further bibliographic information

Language Swedish

ISSN 1650-1942

Pages 30 p.

Price acc. to pricelist

Innehåll

1 INLEDNING 5

2 MÄTUTRUSTNING 5

3 GENOMFÖRDA MÄTNINGAR 7

3.1 Resultat 8

3.1.1 Kalibrering och mätfel 8

3.1.2 Mätningar genom kamouflagenät 10

3.1.3 Mätningar genom fönster med solskyddsfilm 11

3.1.4 Mätningar genom fönster med persienner 12

3.1.5 Mätningar på människor 14

3.1.6 Mätningar genom gardiner 15

3.1.7 Mätningar på fordon 16

3.1.8 Mätningar på byggnader 17

3.2 Slutsatser 21

4 STIRRANDE 3D-LASERRADAR 22

5 FLYGBUREN 3D-LASERRADAR 25

6 VIBROMETRI 27

7 DISKUSSION 28

8 ERKÄNNANDE 29

9 REFERENSER 29

1 Inledning

I denna rapport beskrivs det arbete som har bedrivits med laserradar inom projektet *Teknisk värdering av nya sensorförmågor för strid i bebyggelse*. Syftet har varit att studera olika metoder att genomföra kontroll av byggnader med laserteknik.

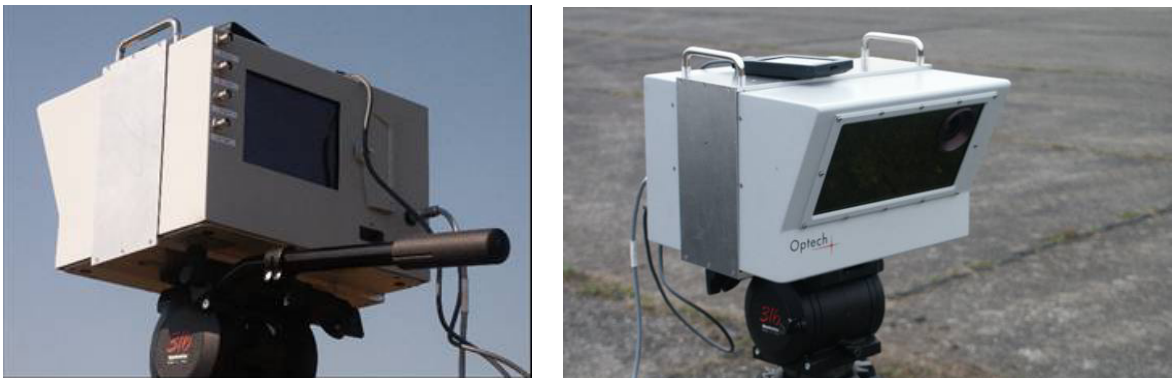
Laserradar är en i många avseenden unik sensorteknik som kan ge information om t.ex. 3D-målgeometri, vibrationer, polarisation, avstånd och hastighet. Tekniken erbjuder möjligheten att kombinera olika funktioner i samma system, som målutpekning och måligenkänning. FOI har stor erfarenhet av olika lasersystem och har demonstrerat flera system som rönt internationell uppmärksamhet, en översikt av området ges i [1] där bl.a. teknikval, kostnad och realiserbarhet beaktas. Tekniken för signal- och bildbehandling för flera olika applikationer beskrivs i [2-4].

Samverkan sker internationellt bl.a. inom NATO:s forskningsnätverk. Sverige deltar t.ex. i NATO SET-077/RTG 45 *"N-dimensional eyesafe ladar (N-DIEL) for military applications*", vilket löper över 3-år. Ett viktigt problemområde som studeras är "strid i bebyggelse". FOI medverkar vid prov och genom datautbyte inom främst 3D-avbildning, signalbehandling mm. för måligenkänning. En mätkampanj i urban miljö planeras till sommaren 2005.

Vidare finns ett avtal om informationsutbyte med US Air Force Research Laboratory (AFRL) – Wright Labs avseende laserradar och 3D-signalbehandling. Arbete med att utvidga detta samarbete till ett projektavtal pågår. Genom samarbetet får FOI bl.a. del av resultat från försök med stirrande 3D-laserradar.

2 Mätutrustning

Den 3D-laserradar som huvudsakligen använts för mätningarna är av typen ILRIS-3D från Optech Inc., [5], se figur 1. Det är en skannande 3D-laserradar bestående av en pulsad laser, en detektor och en avancerad mekanisk avlänkning av utgående och mottagen strålning. Våglängden är 1,5 µm och är sålunda ögonsäker. Tekniska data anges i tabell 1. För att mäta ett avstånd till ett objekt mäts gångtiden för en laserpuls, från sändaren till objektet och tillbaka till mottagaren ("time of flight", TOF). Med en noggrann avlänkning av laserstrålen mellan varje laserskott, både horisontellt och vertikalt, erhålls ett punktmoln i 3 dimensioner. För varje mätpunkt ges en x-, y-, och z-koordinat samt ett intensitetsvärde. En mer omfattande beskrivning av Optech ILRIS-3D har presenterats i en tidigare rapport [6].



Figur 1. Skannande 3D-laserradar ILRIS-3D från Optech, Inc.

För att få tillräcklig dynamik i den mottagna intensitetssignalen är mottagaren uppdelad i två kanaler, ”hög förstärkning” respektive ”låg förstärkning”. Vardera kanalen arbetar med 8 bitars dynamik. Svaga signaler, som måste förstärkas mer, registreras i den ”höga” kanalen, medan starka signaler registreras i den ”låga”. Med ILRIS-3D kan första eller sista eko registreras. Dessutom finns en utgång från respektive kanal (hög och låg) där vågformen från mottagaren kan registreras.

Tabell 1. Teknisk specifikation för den skannade laserradarn ILRIS-3D.

Parameter	**Specifikation**
Våglängd	1,5 µm
Maximalt mätavstånd	350 m (4 % reflektans) 800 m (20% reflektans)
Synfält	40° (±20°, horisontellt och vertikalt)
Divergens	0,2 mrad
Avståndsupplösning	1 cm
Vinkelupplösning	0,2 mrad
Samplingsfrekvens	2000 punkter/s
Storlek	30 x 30 x 20 cm

Några mätningar har också gjorts med en annan skannande laserradar; Riegl LMS-Z210 [7], se figur 2. Denna har större synfält i horisontalled, och har en RGB-kamera som är ensad med laserstrålen. Den arbetar också med en kortare våglängd (0,9 µm) jämfört med ILRIS-3D. I tabell 2 visas tekniska data för systemet. För bägge systemen gäller dock att de inte är användbara i ett militärtaktiskt perspektiv eftersom de är alldeles för långsamma. Dock är andra 3D-laserradarsystem under utveckling, vilka skulle kunna uppfylla de militära kraven.

Tabell 2. Tekniska data för skannande laserradar Riegl LMS-Z210.

Parameter	**Specifikation**
Våglängd	0,9 µm
Utsignal	x-, y-, z-koordinater, intensitet och RGB-värde
Maximalt mätavstånd	150 m (ρ=10%)
Synfält	horisontellt ±170°, vertikalt ±40°
Divergens	3,0 mrad
Avståndsupplösning	25 mm
Vinkelupplösning	± 0,1 mrad
Samplingsfrekvens	6500 Hz
Storlek	210mm × 435 mm (diameter x höjd)

Vid inledande mätningar på delvis dolda objekt såsom människor bakom persienner och fönster registrerades mätpunkter som inte motsvarade något fysiskt objekt. Dessa felaktiga registreringar, s.k. spökpunkter, registrerades ofta på ett kortare avstånd än bakomliggande objekt [8]. För att utröna orsaken till dessa spökpunkter genomfördes en serie grundläggande mätningar på olika idealiserade målobjekt.

Figur 2. Skannande laserradar Riegl LMS-Z210.

3 Genomförda mätningar

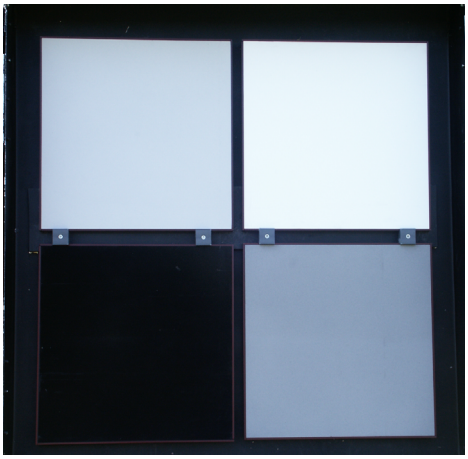
Ett mätprogram lades upp för att få fram ett underlag för användbarheten av 3D-laserradar i stadsmiljö. Här ingick bl.a. att göra mätningar genom fönster och skylande objekt såsom gardiner och maskeringsnät. Huvudsakligen har mätningar mot kalibreringsmål och personer bakom sådana skylande objekt genomförts:

- fönster med solskyddsfilm
- gardiner
- persienner
- fordon
- byggnader (se genom fönster in i byggnader)

För att underlätta mätningar på personer (det tog i allmänhet 2-5 minuter att genomföra en registrering) införskaffades en skyltdocka i naturlig storlek för att användas som målobjekt. Dockan (döpt till Kurt) är utrustad med rörliga leder och försedd med peruk.

Vidare anskaffades en persienn med vitlackerade aluminiumlameller, fyra tavelramar med glas (IKEA Fjällsta, 50 × 70 cm) samt solskyddsfilm (Biltema) i tre olika färger (grå, svart, brons). Solskyddsfilmen applicerades på glaset i tre av ramarna, medan den fjärde ramen bibehölls som den var, dvs med klarglas.

En kalibreringstavla med fyra fält med olika reflektans (1,7 %, 29 %, 61,9 % och 98,8 % vid 1500 nm) användes för att göra en absolutmätning av den reflekterade intensiteten, se figur 3. Referenstavlorna är mätta med spektrometer från 250-2500 nm. [6]. Denna tavla utnyttjades också för att i mätningarna mot gardiner och solskyddsfilm få olika bakgrunder med kända reflektanser.



Figur 3. Kalibreringstavla bestående av fyra fält med 1,7 %, 29 %, 61,9 % respektive 98,8 % vid 1500 nm.

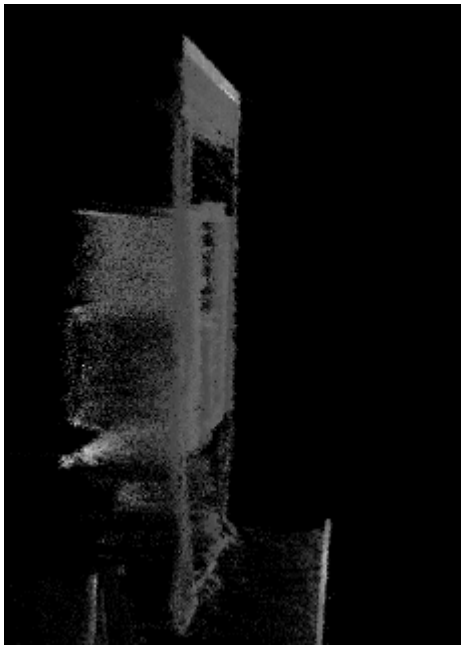
3.1 Resultat

3.1.1 Kalibrering och mätfel

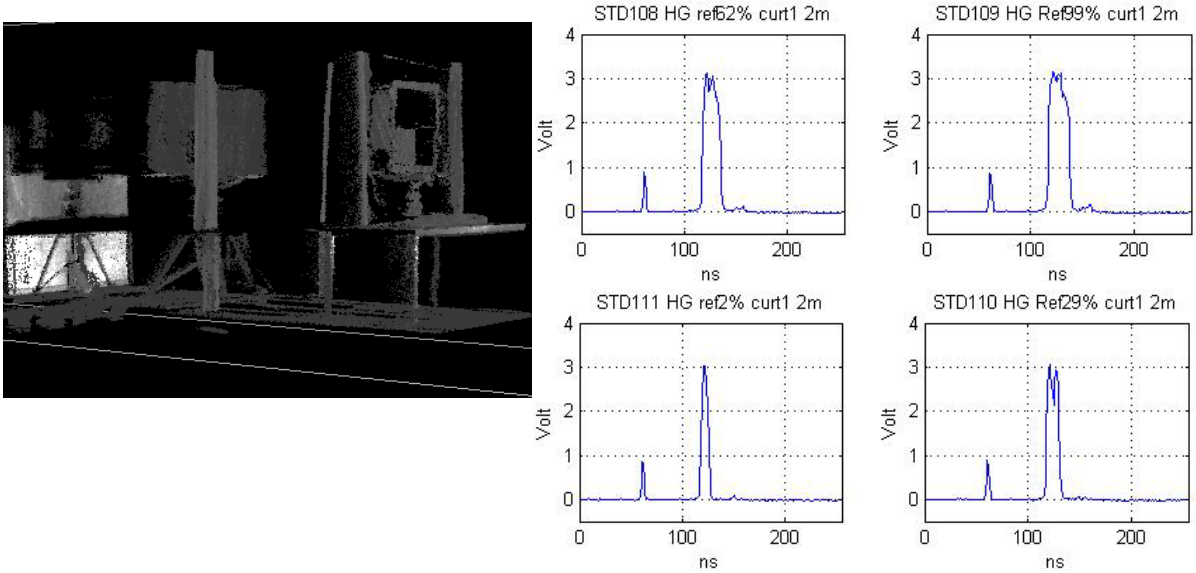
Som nämnts ovan registrerar mätsystemet ILRIS-3D felaktiga mätpunkter på för kort avstånd, då ett objekt är delvis skylt. För att utröna orsaken till dessa spökpunkter genomfördes en serie grundläggande mätningar på några enkla mål, exempelvis en kalibreringstavla som placerades på olika avstånd bakom ett nät.

Även gardiner användes vid mätningar för att studera uppkomsten av spökpunkter. Gardinerna hängdes upp på olika avstånd framför kalibreringstavlan och vågformen från de bägge utgångarna på ILRIS-3D registrerades med oscilloskop. Med ett avstånd på 50 cm mellan gardin och kalibreringstavla registreras ett stort antal spökpunkter bakom gardinen, se figur 4. Med en avståndslucka på 2 m mellan gardinen och kalibreringstavlan var det möjligt att lösa upp pulssvaren från de tre referensytorna med högst reflektans (29 %, 62 % och 99 %), se figur 5. Pulssvaret från 2 %-referensen är för svag för att ge ett ”sista eko”, varför punktmolnet från den ytan istället placerats på gardinen. Med ett avstånd på 1,8 m mellan gardin och kalibreringstavla var det inte möjligt att lösa upp pulssvaren.

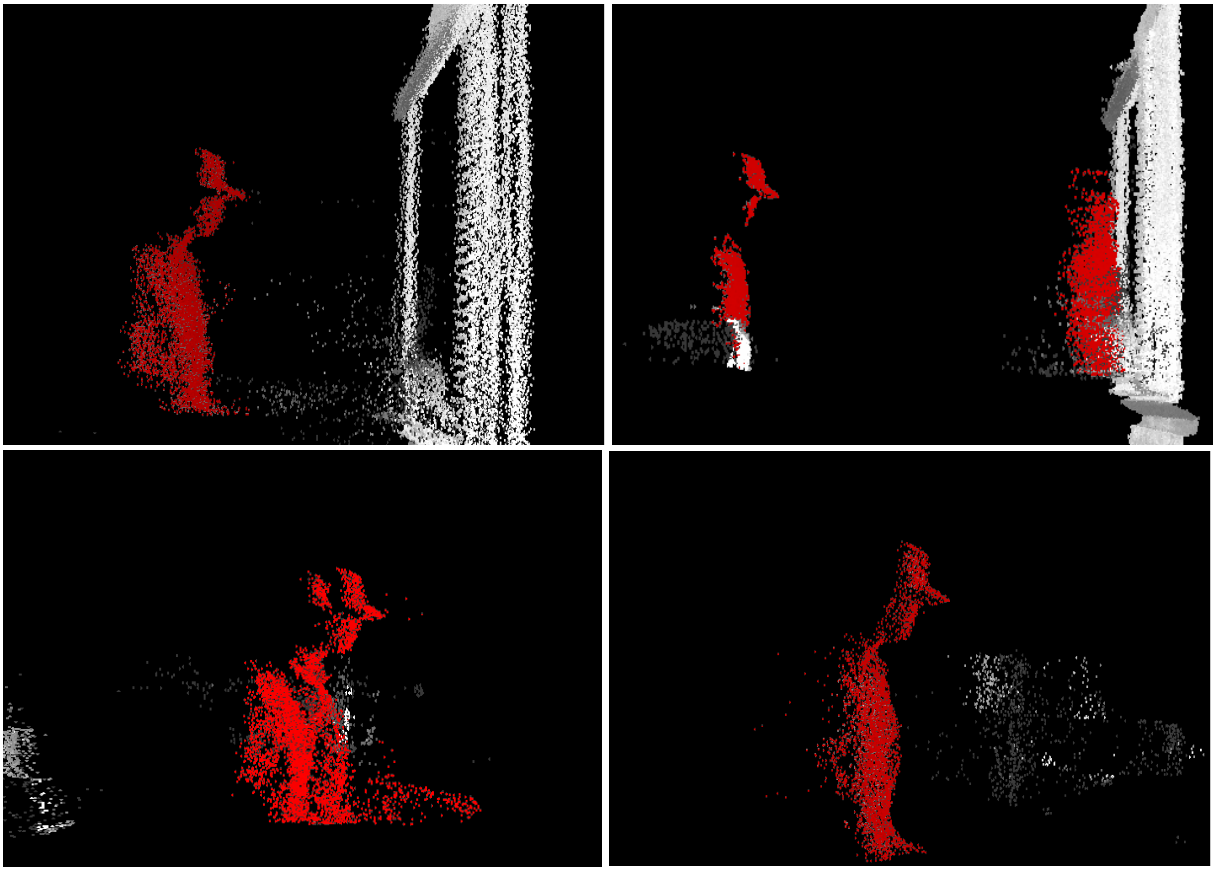
Med ILRIS-3D placerad utomhus gjordes ett antal mätningar genom ett fönster, där skyltdockan Kurt var placerad på olika avstånd från fönstret, se figur 6. Då Kurt var placerad endast 50 cm från fönstret syntes många spökpunkter mellan Kurt och fönstret. Vid 150 cm mellan fönstret och Kurt har punktmolnet som representerar Kurt spridits ut så att vissa punkter hamnar på rätt avstånd (ca 150 cm) medan vissa punkter hamnar som en siluett precis innanför fönstret. Detta beror på att laserradarsystemet inte lyckas att lösa upp första och sista ekot. Vid 250 cm avstånd mellan fönstret och Kurt syns punktmolnet som härrör från Kurt på två avstånd. Vid 450 cm avstånd mellan fönstret och Kurt, syns Kurt tydligt (ILRIS-3D kan här lösa upp första och sista ekot).



Figur 4. Punktmolnet från en gardin sedd från sidan (laserradarn tittar från höger). Kalibreringstavlan står 50 cm bakom gardinen (utanför vänster bildkant) och vi ser spökpunkter bakom gardinen, eftersom ILRIS-3D ej förmår lösa upp bägge objekten med så kort avstånd emellan.



Figur 5. Till vänster visas punktmolnet från ett mätscenario (betraktat från höger) där först en gardin är upphängd i taket framför kalibreringstavlan som är monterad på ett stativ. Längst bak (i vänster bildkant) står en vit skärm. Oscilloskopkurvorna till höger visar pulssvaren från respektive referensyta. Pulssvaret från 2%-ytan är för svagt för att kunna detekteras. Därför klassificeras svaret från gardinen som "sista eko". För de tre övriga ytorna ses både svaret från gardinen och referensytan.

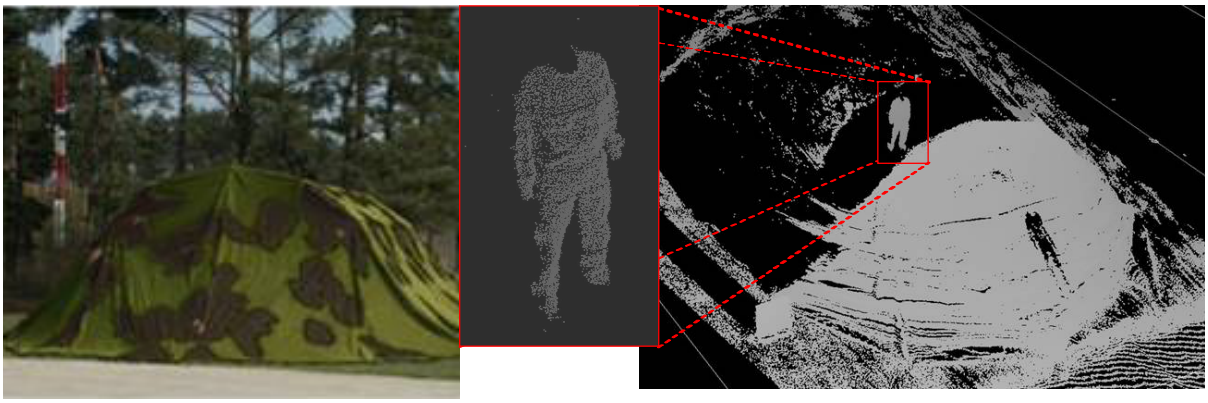


Figur 6. Överst till vänster visas dockan Kurt på ett avstånd av 50 cm från fönstret. Vi ser tydliga spökpunkter mellan Kurt och fönstret. Överst till höger visas Kurt 150 cm från fönstret. Vi ser ett tydligt punktmoln strax innanför fönstret på felaktigt avstånd (ILRIS-3D kan här inte lösa upp första och sista ekot). Nederst till vänster visas Kurt 250 cm från fönstret; här är han uppdelad i två punktmoln på olika avstånd, pga. falska ekon. Nederst till höger syns Kurt 450 cm från fönstret, tydligt och utan falskekon.

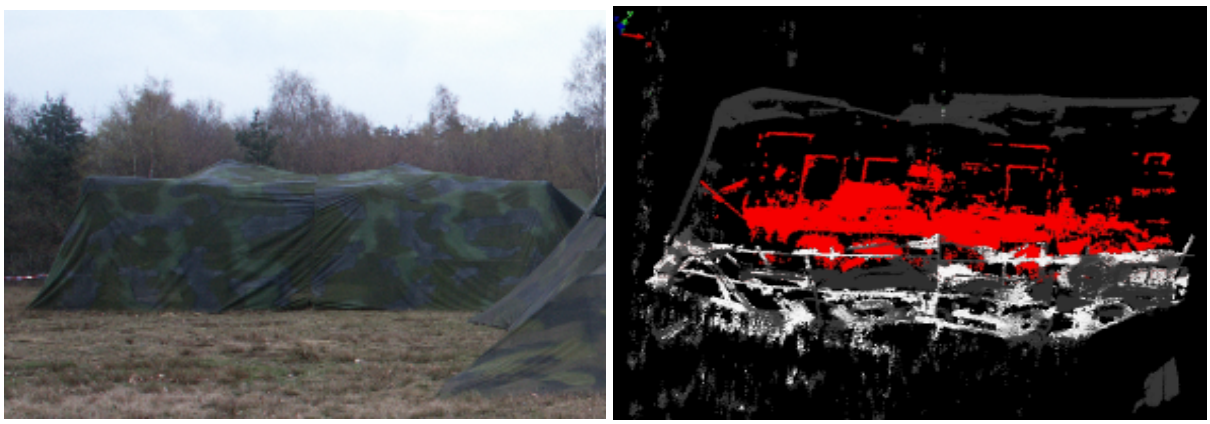
3.1.2 Mätningar genom kamouflagenät

Figur 7 visar ett exempel från en mätning på kamouflagenät (”fordonsgarage”) där en person har placerats under nätet. Personens kläder syns väl medan ansiktet har ”fallit bort”. Att ansiktet inte syns under nätet beror på att huden har lägre reflektans än t.ex. kläderna. Pulssvaret från ansiktet ligger under den tröskelnivå som krävs för detektion (det ”sista eko” som överstiger tröskelnivån i dessa mätpunkter härrör därför från nätet), medan signalen från kläderna ligger över denna nivå. Ett flertal mätningar på olika typer av maskeringsnät har gjorts där nätet lagts över olika typer av fordon, bl.a vid en fältmätkampanj[1] i NATO-regi i Zutendaal, Belgien. I samtliga fall har det varit möjligt att ”se igenom” nätet [9].

[1] NATO RTO SCI-145 / CDT *Sensors and Sensor Denial by Camouflage, Concealment and Deception*.



Figur 7. T.v. en visuell bild av ett kamouflagenät ("fordonsgarage"). En person står mitt under nätet. T.h. visas motsvarande laserradarbild. Notera att inget svar registrerats från personens ansikte, pga. låg reflektans. Eftersom det är sista ekot som har registrerats, avtecknar sig personen som en "skugga" på nätets framsida.

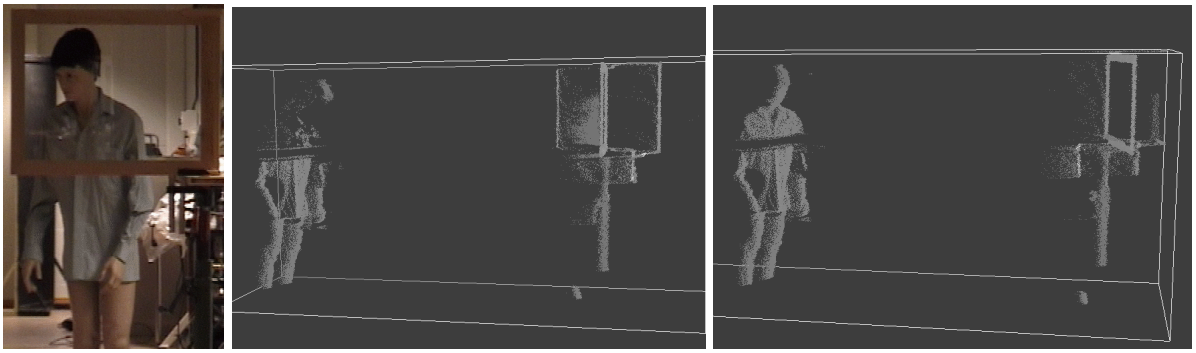


Figur 8. Bilden t.v. visar en del av ett Patriot-skenmål. I 3D-laserradarbilden t.h., som visar samma del av skenmålet, har punktmolnet vinklats så att det ses något uppifrån. Den 4-axlade lastbilen under nätet har färglagts i rött för att öka tydligheten.

3.1.3 Mätningar genom fönster med solskyddsfilm

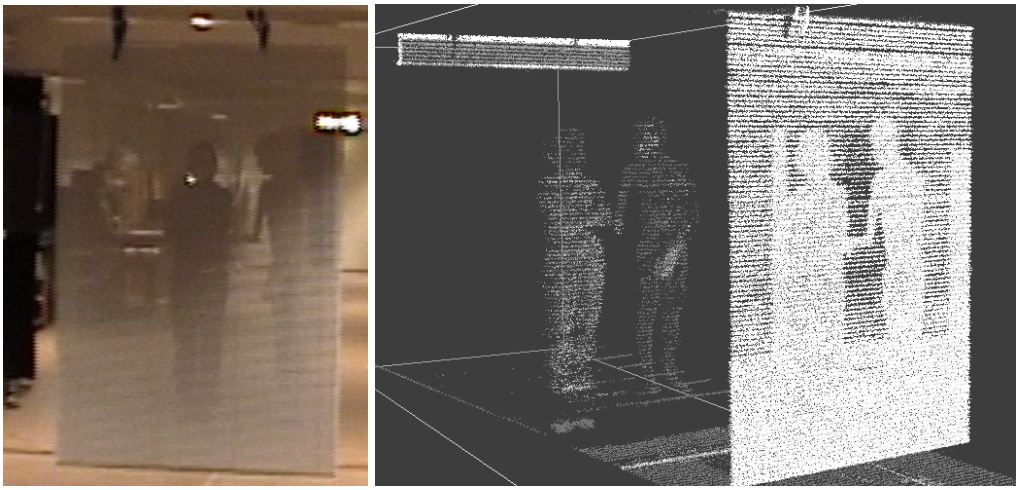
En serie mätningar på solskyddsfilm (Biltema) genomfördes, där tre typer av solskyddsfilm (grå, brons, svart) applicerats på glas (fönster). Enligt specifikationen angavs dämpningen för samtliga tre typer något oprecist till 10 % för värmestrålning och 80-90 % för synligt ljus. Vid mätningarna placerades kalibreringstavlan, respektive skyltdockan bakom samtliga fönster, på ett avstånd av 2 m. Därvid noterades en viss skillnad i hur fönstret respektive det bakomliggande objektet kunde lösas upp. Denna skillnad beror förmodligen på en skillnad i transmission. Det visade sig också att infallsvinkeln mot den rena glasrutan hade betydelse för förekomsten av spökpunkter; vid normalt infall kunde en betydande mängd spökpunkter noteras, medan en infallsvinkel på ca 79º medförde att objekten kunde avbildas utan fel, se figur 10.

Figur 9. Mätning på skyltdockan bakom tre typer av solskyddsfilm; från vänster: grå, brons respektive svart. Den del av dockan som syns genom fönstret motsvarar en liggande bröstbild.



Figur 10. Mätning på docka bakom ett rent fönsterglas. Till vänster en visuell bild, i mitten en laserradarbild med normal infall, till höger med 79° infallsvinkel. Notera att antalet spökpunkter till vänster om (bakom) glasrutan är tämligen stort vid normalt infall, medan dockan avbildas ganska felfritt vid snedare infall.

3.1.4 Mätningar genom fönster med persienner

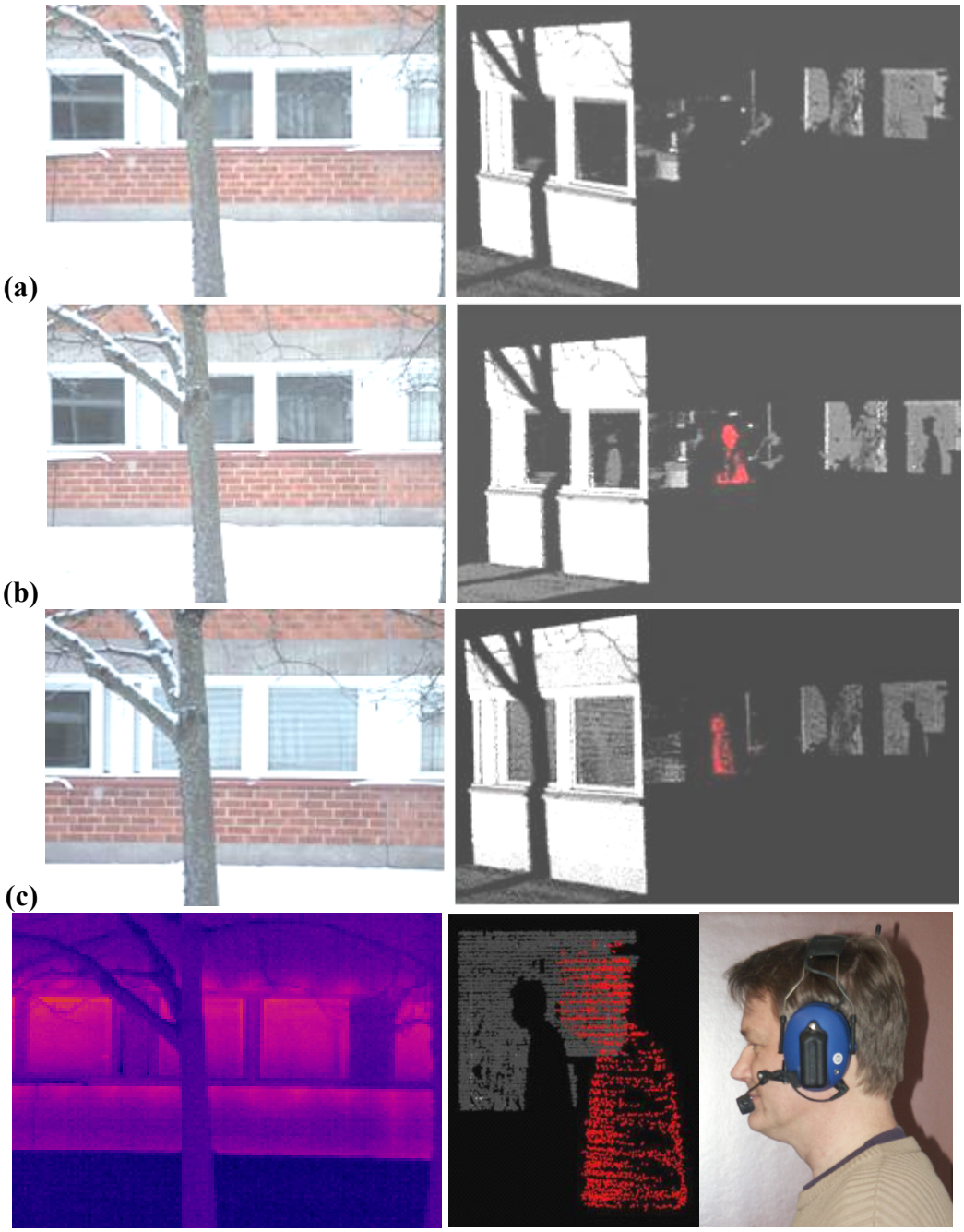


Figur 11. 3D-registrering av människor bakom persienner. Bilden till vänster visar ett visuellt foto av en scen med två personer (den högra är en skyltdocka), där persiennerna är nedfällda och vinklade 45° (springa mellan lamellerna ca 8 mm). Scenen är belyst bakom persiennen, varför silhuetterna av personerna är synliga. Till höger visas en 3D-laserradarbild av samma scen.

Ett antal mätningar mot en nedfälld persienn gjordes inomhus, se figur 11. Bakom persiennen ställdes två personer (den ena en skyltdocka) och persiennlamellerna ställdes i olika vinklar. Som bäst klarade Optech ILRIS-3D en lutning av persiennlamellerna på ca 60°, vilket gav en avståndslucka på ca 2 mm mellan varje lamell. Samma mätningar upprepades med personerna

utbytta mot kalibreringstavlan bakom persiennen. Relativt god detaljupplösning erhölls trots de nedfällda persiennerna.

Tidigare genomförda mätningar mot persienner illustreras i figur 12, där en person i ett rum bakom nedfällda persienner kan ses tydligt, speciellt avtecknas skuggan av personen på den bortre väggen.

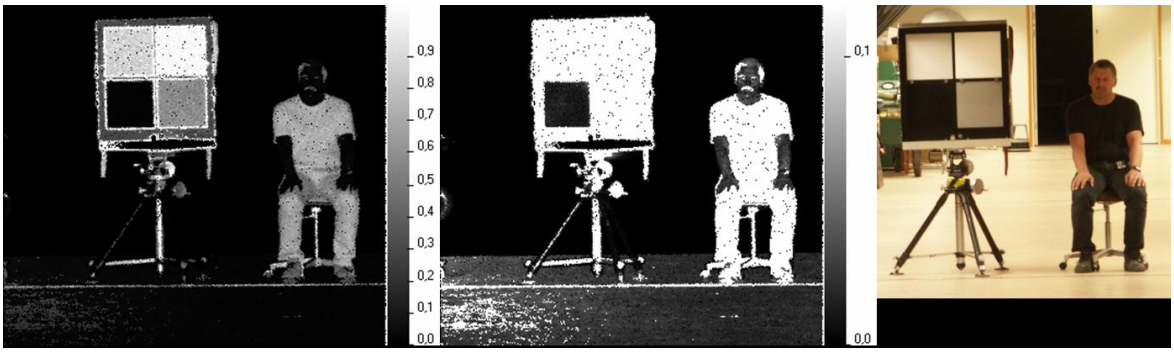


Figur 12. Till vänster visas visuella foton, till höger registreringar med 3D-laserradar ILRIS-3D. I (a) visas ett tomt rum, i (b) samma rum med en person och uppdragna persienner. I (c) visas samma rum med neddragna persienner, vinklade ca 60 º (springa mellan lamellerna 2-3 mm). De delar av 3D-punktmolnet som tillhör personen har rödmarkerats för tydlighets skull. Underst i mitten visas en förstoring av 3D-bilden från laserradarn och t.h. ett visuellt foto av personen. Underst t.v. en IR-registrering av samma scen; då IR-strålningen ej transmitteras genom glas går det inte att se in i rummet.

3.1.5 Mätningar på människor

Reflektion från hud vid 1,5 µm är intressant att studera exempelvis för tillämpningar såsom upptäckt av människor i skymda miljöer och för ansiktsigenkänning. I figur 13 och figur 14 visas exempel på inledande mätningar av reflektion från mänsklig hud och kläder. Hud har lägre reflektion än hår och textilier. I

tabell 3 sammanfattas reflektionsvärden på personen. I tabellen kan vi utläsa att reflektionen från mänsklig hud ligger långt under reflektionen på kläder.



Figur 13. Till vänsteroch i mitten visas en intensitetsbild (reflektion) vid våglängden 1,5 µm och till höger en visuell bild av en person. Man ser att kläder och hår reflekterar mer än bar hud vid den aktuella våglängden (1,5 µm). Den vänstra intensitetsbilden är presenterad med hela dynamiken utnyttjad för intensiteten (16 bitar). I den mellersta bilden utnyttjas endast ca 10 % av dynamiken i det lägre reflektionsområdet där mänsklig hud har sina reflektionsvärden. Kontrasten i ansiktet framträder därför i den mittersta bilden bättre. Jämför även figur 14.

Tabell 3. Mätning av reflektion mot mänsklig hud och kläder.

Uppmätt region	Reflektion	σ_{refl}	Antal punkter
Hår längst upp	0,0515	0,0076	57
Hår sidan	0,2120	0,0680	11
Panna	0,0491	0,0503	101
Ögonbryn	0,2771	0,1461	15
Näsa	0,0233	0,0065	38
Kindkota	0,0449	0,0083	30
Mustasch	0,3673	0,0695	37
Haka	0,0884	0,1144	19
Hals	0,0500	0,0268	20
Arm	0,0339	0,0081	225
Hand	0,0337	0,0078	70
Skor	0,2482	0,1033	48
Byxa	0,3019	0,0570	903
Tröja	0,3325	0,0844	2263

Figur 14. Mätning av reflektion från ansikte och kläder med ILRIS-3D vid 1,5 µm våglängd. Vi kan se att hår och mustasch har en betydligt högre reflektion än vad huden har.

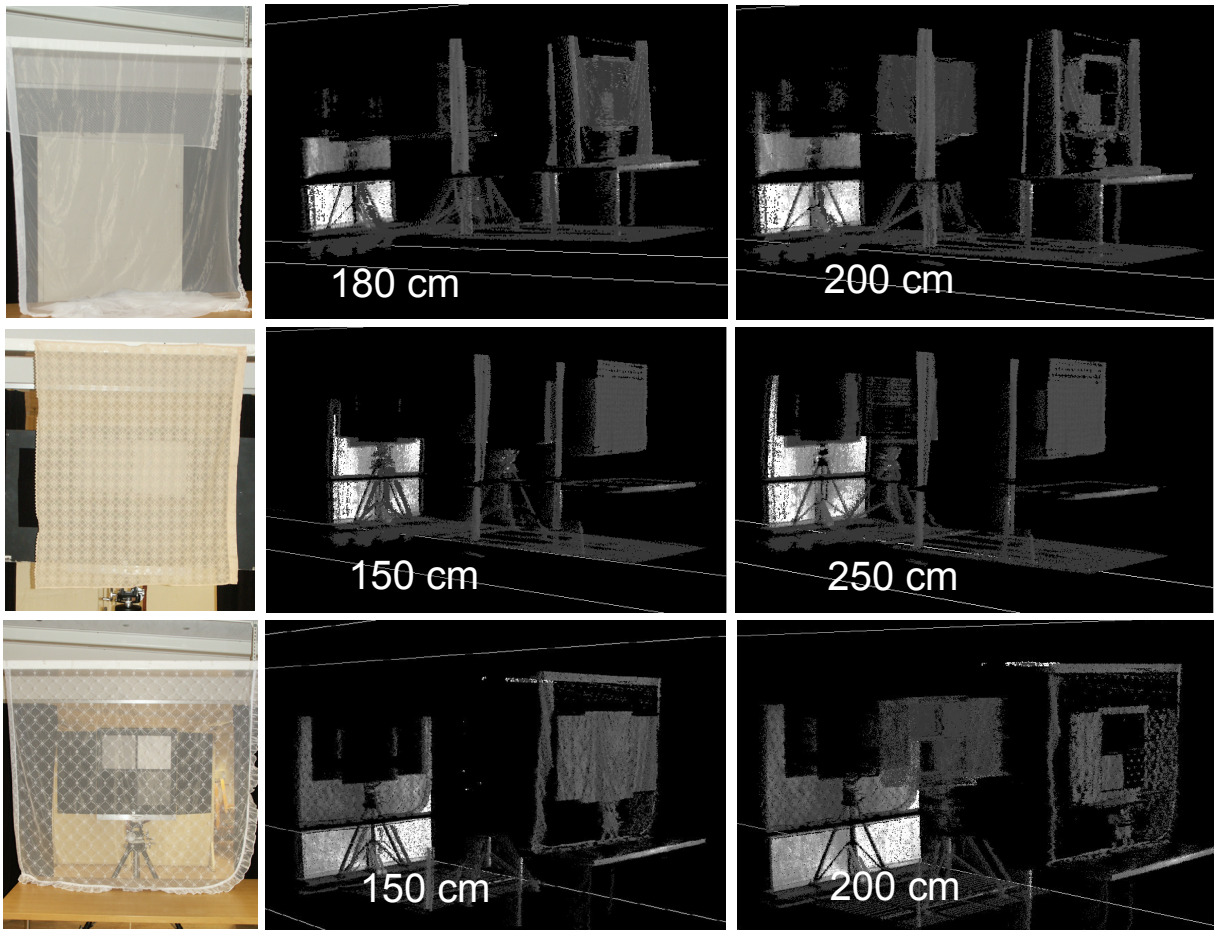
3.1.6 Mätningar genom gardiner

Mätningar genom gardiner har visat att typen av textilier, dvs. maskstorleken, har stor betydelse för möjligheten att ”se igenom” med laserradarn. Tunnare och glesare gardiner ger stor möjlighet för laserradarn att avbilda det som finns bakom.

En testuppsättning bestående av sex olika gardiner med variationer i mönster, material och tjocklek undersöktes. Bl.a. studerades tunna ”myggnäts”-gardiner av syntetmaterial, med och utan spetsmönster, se figur 15 överst respektive nederst. En av bomullsgardinerna hade lite glesare rutor och tätare vävt mönster, se figur 15 mitten, och en var tunn, tätvävd och omönstrad. Mätavståndet mellan laserradarn och gardinen var 17,70 m eller 50 m och avståndet mellan kalibreringstavlan och gardinen varierades mellan 50 cm upp till 5 m.

Som väntat var det de tunna och glesvävda syntetgardinerna var de som gav bäst ”genomsläpp”. Genom den tunna tätvävda bomullsgardinen var det svårt att se något av kalibreringstavlan.

När avståndet mellan gardinen och kalibreringstavlan var cirka två meter kunde man se att kalibreringstavlans olika fält avbildades lite förskjutna i djupled i förhållande till varandra. Vid mätavstånd 50 m uppstod spökbilder av kalibreringstavlan framför den tunna myggnätsgardinen. (Detta noterades också vid mätningen på skyltdockan bakom gardinerna). Genom att studera vågformen på ett oscilloskop kunde konstateras att signalen från gardin och kalibreringstavla kom lite tidigare, jämfört med signalen från bara gardinen. Detta fenomen kunde inte noteras när den mönstrade bomullsgardinen (bild14, mitten) användes. Vid avståndet 50 cm mellan gardin och kalibreringstavla blev det mycket spökpunkter mellan gardinen och kalibreringstavla.



Figur 15. Resultat från mätningar på gardiner. Scenen är betraktad från höger, och består av en gardin, en kalibreringstavla och bakom den en vit skärm. Överst en syntetgardin med homogena maskor, relativt finmaskig. I mitten en bomullsgardin med invävt mönster och högre täckningsgrad. Underst en syntetgardin med låg täckningsgrad. Avståndssiffrorna anger avståndet mellan gardin och kalibreringstavla. Vi ser att laserradarn penetrerar samtliga gardiner och ger en bild av den bakomliggande kalibreringstavlan, men att den mellersta gardinen ger minst transmission.

3.1.7 Mätningar på fordon

I en scen med personer i en bil, visade det sig att personerna i bilen kunde avbildas mycket bra med 3D-laserradarn. Även i besvärliga ljusförhållanden, exempelvis spegling i glaset, som gjorde det omöjligt att visuellt se in genom rutorna, kunde laserradarn avslöja att två personer satt i fordonet.

Figur 16. Till vänster ett visuellt foto och till höger en laserradarbild av ett fordon med två personer i. Föraren bär mask för ansiktet och en passagerare sitter i det högra baksätet.

Figur 17. Till vänster ett visuellt foto och till höger en laserradarbild av ett fordon med två personer i. Reflexer i rutorna i kombination med de tonade rutorna i baksätet gör det mycket svårt att se något av personerna i fordonet i den visuella bilden. I laserradarbilden framträder både passagerare och förare docktydligt (för tydligheten har dessa rödmarkerats).

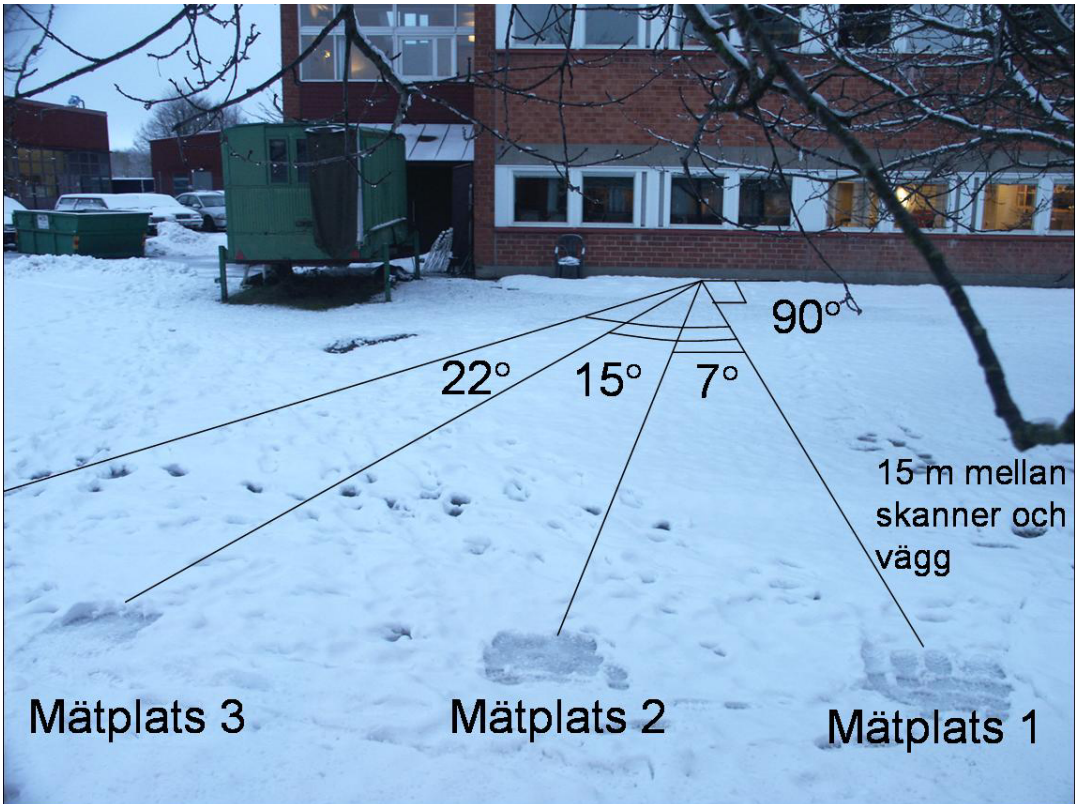
3.1.8 Mätningar på byggnader

Mätningar i stadsmiljö har genomförts huvudsakligen med Rieglskannern, som ju har ett synfält på ± 170°. Eftersom denna skanner har en ensad RGB-kamera erhålls direkt en textur i 3D-bilden. I figur 18 visas en panoramavy från Kryddbodtorget i Gamla Linköping och i figur 19 visas en vy från Universitetet i Linköping. På grund av att ett skannande system har använts blir rörliga objekt, såsom människor, distorderade.

Figur 18. 3D-avbildning av en stadsmiljö (Kryddbodtorget i Gamla Linköping) genererad med Rieglskannern. T.h. visas ett utsnitt ur scenen, sedd i den riktning som markeras av pilen i bilden t.v.

Figur 19. 3D-avbildningav en stadsmiljö (Hus Origo, Universitet i Linköping) genererad med Rieglskannern.

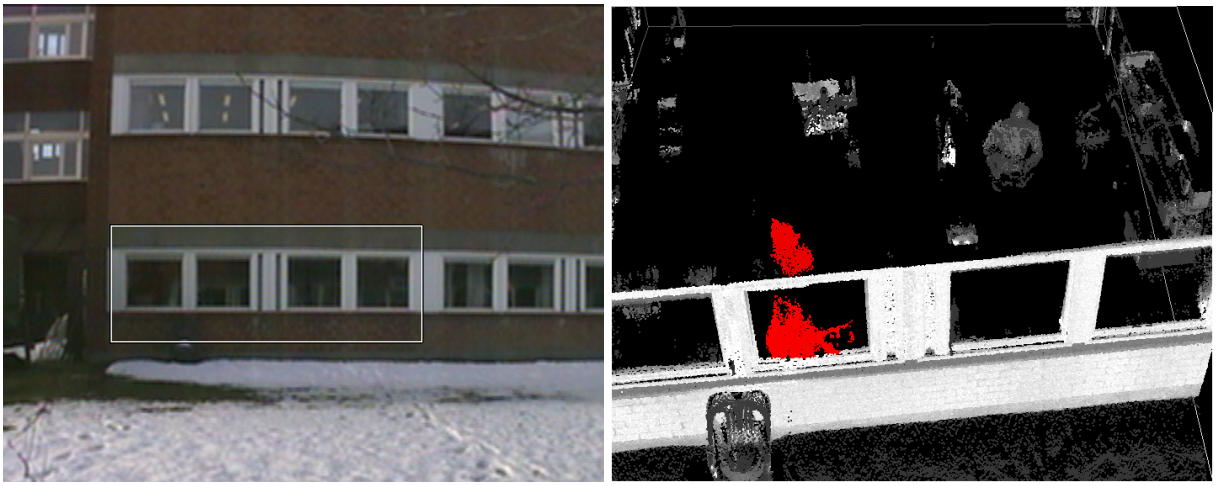
Ett ”kidnappningsscenario” i urban miljö har skannats in med laserradar, se figur 21. Mätförfarandet utfördes enligt figur 20, där laserskannern förflyttades i sidled mellan fyra positioner. På så sätt erhöll vi olika azimutvinklar mot fönstren. Två personer samt en skyltdocka (Kurt) bärandes en annan liten docka placerades i rummet. Rummet täcker de fyra nedersta vänstra fönstren.



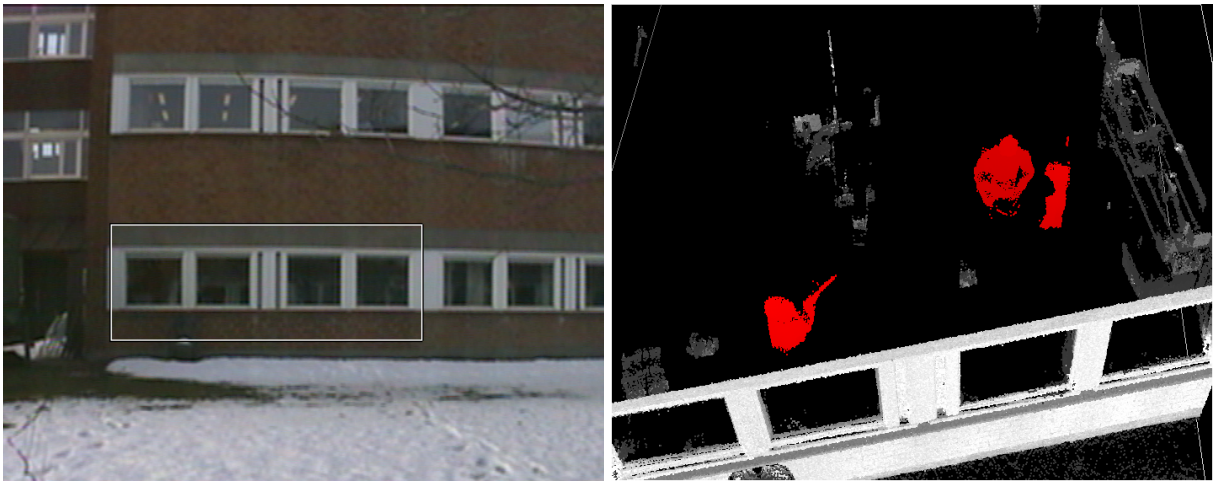
Figur 20. Mätuppställningen vid avbildningen av "kidnappningsscenariot". De fyra vänstra fönstren på markplanet användes för detta scenario.

Kidnappningsscenariot mättes från fyra olika platser för att få olika azimutvinklar. Från mätplats 1 var det normalt infall mot det tredje fönstret från vänster. I detta fönster var en person (avstånd 2 m mellan personen och fönstret) samt Kurt, med en docka i famnen, placerad (avstånd 2,5 m mellan Kurt och fönstret). En person var placerad i andra fönstret från vänster (avstånd 0,7 m från fönstret). Från mätplats 2, se figur 22, blir infallsvinkel mot ser vi att personen i fönster 2 avbildas med stort antal spökpunkter. Från mätplats 3, se figur 23, blir infallsvinkeln mot fönster 2 och 3 ca 15° respektive 7°, och här syns alla personer bra i rummet. Även med ett scenario med persiennerna nere i fönster 3 och 4 kan vi se 3 personer, se figur 24. Av denna mätning framgår, liksom från tidigare mätningar på glasruta, att det är att föredra att betrakta en glasruta med en infallsvinkel som är något skild från normalt infall. Detta minskar problemet med spökpunkter.

Figur 21. ”Kidnappningsscenariot” i visuella bilder. Överst till vänster ett foto från utsidan genom det andra fönstret från vänster. Överst till höger en bild inifrån rummet av kvinnan bakom det andra fönstret. Nederst till vänster syns skyltdockan med en docka på armen samt den andra kvinnan (synliga genom det tredje fönstret från vänster). Nederst till höger en bild inifrån rummet ut genom fönstret, där laserradarn kan skönjas på ett stativ.



Figur 22. Scenen med ”kidnappningsscenariot”, från mätplats 2. Samtliga persienner är uppdragna.



Figur 23. Scenen med "kidnappningsscenariot", från mätplats 3. Alla persienner är uppdragna.

Figur 24. Scenen med "kidnappningsscenariot", från mätplats 2. Persiennerna i de bägge högra fönstren är neddragna och vinklade.

3.2 Slutsatser

Orsakerna till förekomsten av spökpunkter har studerats. Slutsatsen blev att dessa felaktiga mätpunkter orsakas av att mottagarelektroniken i det använda laserradarn (ILRIS-3D) ej förmår att lösa upp multipelekon från näraliggande objekt, dvs. då objekten ligger närmare än ca 2 m. Detta avstånd motsvarar vad som anges i specifikationen som avståndsupplösning. Sålunda förklaras spökpunkterna av att ILRIS-3D använts i en mätsituation som den ej är konstruerad för att klara. En slutsats av detta är att en 3D-laserradar som skall användas för att se genom fönster och liknande måste ha en upplösningsförmåga mellan påföljande ekon som är ca 50 cm eller bättre. Detta bör kunna åstadkommas genom att välja en kortare pulslängd på den belysande laserpulsen, samt utforma mottagaren med snabbare elektronik. Det finns idag kommersiella system på marknaden som klarar detta, exempelvis Leica HDS3000 [10], som uppges ha en avståndsnoggrannhet på 4 mm och en pulslängd på 250 ps (Den arbetar i grunden dock endast med första eko).

Vid fältmätningar på maskeringsnät har vi kunnat visa att 3D-laserradar kan penetrera kamouflagenät bra. Samtliga nät som var representerade vid mätkampanjen i Zutendaal penetrerades i en eller annan form. Vi bör dock ha i åtanke att vi hade de allra bästa

förutsättningarna för penetration (korta avstånd, ingen skylning av näten, i de flesta fall ingen ytterligare kamouflering under näten). I ett annat arbete [11] visas också hur 3D-laserradar kan penetrera vegetation, i vissa fall kunde ekon registreras från objekt ca 25-30 m in en skogsdunge.

Vid operationer i urban miljö skulle en UGV med 3D-laserradar kunna användas för att undersöka fönster och detektera eventuella människor i mörka rum bakom persienner och gardiner, se figur 25. Medan det kan vara svårt att lösa en sådan uppgift med passiva EO-sensorer, kan 3D-laserradarn utnyttjas för att se människor i rummet eller detektera kikarsikten och annan optik.

Figur 25. Ett exempel på en operation i urban miljö för att spana av fönster och lokalisera människor i byggnader. (Bilden är modifierad efter ett original från www.arl.army.mil/wrmd).

4 Stirrande 3D-laserradar

De mätsystem som är tillgängliga vid FOI och som har använts vid mätningarna som redovisas i denna rapport är av skannande typ, dvs. laserstrålen skannas över mätobjektet och bildpunkterna mäts en efter en med en enkelelementsdetektor. Internationellt[2] pågår en utveckling av matrisdetektorer, (fokalplansmatriser, *FPA, focal plane array*) där varje matriselement är en avståndsmätare vilket gör att en hel scen, eller ett helt objekt, kan mätas upp momentant, med endast en belysande laserpuls. I en sådan stirrande 3D-laserradar, där detektorn utgörs av en matrisdetektor, belyser lasern hela detektorns synfält. Detta medför att högre laserenergi går åt än för ett skannande system, men i gengäld behöver inte lasern pulsas så snabbt, eftersom det räcker med en puls per bild. En stirrande laserradar kan göras mycket kompakt och robust, ungefär i storlek som en handkikare. Vid Air Force Research Laboratory (AFRL) i USA drivs en sådan utveckling (*flash ladar*) [12], se figur 26. Genom ett samarbete mellan FOI och AFRL får FOI tillgång till data från den stirrande laserradarn. Ett exempel på bild med en stirrande FPA-sensor visas i figur 27, där en man placerats bakom nedfällda persienner. Den aktuella stirrande laserradarn registrerar samtidigt (med en belysande laserpuls) 20 avståndsluckor. Efter registrering kan man stega sig igenom dessa avståndsluckor och visa dem i sekvens.

[2] T.ex. i USA (Rayteheon, AFRL, m.fl.) och Storbritannien (BAE).

Figur 26. Stirrande 3D-laserradar med fokalplansmatris. Linjalen är graderad i tum. (Från AFRL).

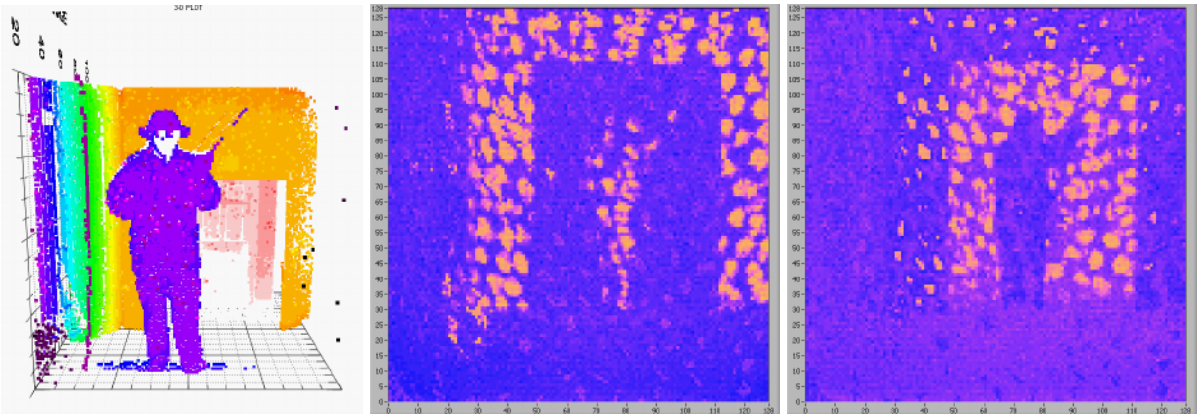
(a) (b) (c)

Figur 27. Visuell bild av en scen med en man i ett rum (a), samma scen med nedfällda persienner (60 % täckning). I (c) visas en bild från en stirrande 3D-laserradar av samma scen; bilden utgörs av innehållet i en av de 20 avståndsluckorna som registreras. (Från AFRL).

(a) **(b)**

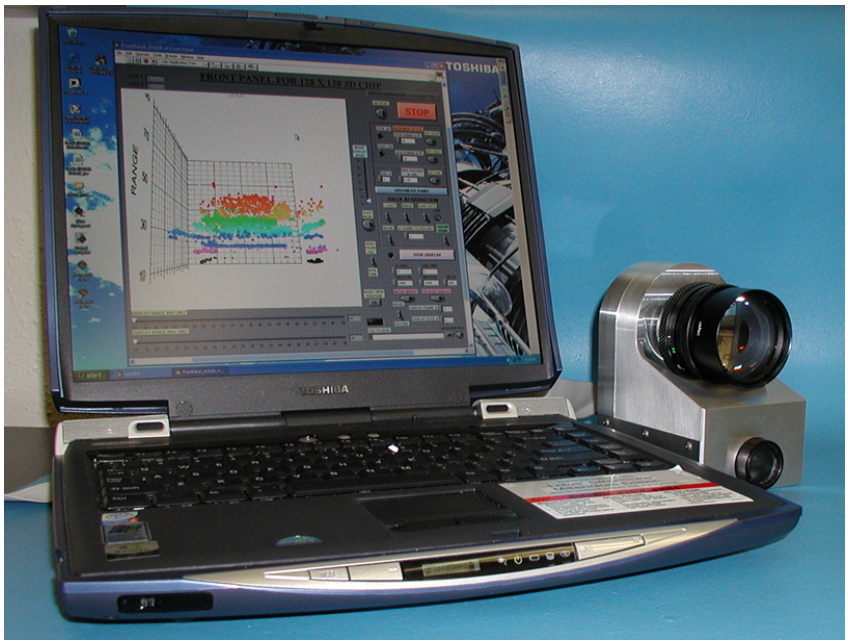
Figur 28. Visuell bild av en scen utan maskeringsnät (till vänster) och med ett upphängt maskeringsnät (till höger). (Från AFRL).

Med stirrande 3D-laserradar kan också och dynamiska scener med rörliga objekt registreras. En bildtakt på 20-50 Hz kan uppnås, vilket alltså möjliggör 3D-bilder i videotakt. I figur 29 visas en bildruta ur en rörlig videosekvens av en man som rör sig bakom ett maskeringsnät. Vid varje tidpunkt har en speciell avståndslucka valts ut, exempelvis den lucka där mannen befinner sig (figur 29 b), respektive den bakomliggande väggen (figur 29 c).



(a) **(b)** **(c)**

Figur 29. 3D-registreringar med en stirrande laserradar. Bilderna är enstaka bildrutor som valts ut ur rörliga videosekvenser. Till vänster (a) visas en avståndskodad 3D-bild av scenen i figur 28 a, utan maskeringsnät. Till höger visas två avståndsluckor ur en videosekvens med maskeringsnätet upphängt som i figur 28 b. I (b) visas en avståndslucka som innehåller mannen. I (c) har avståndsluckan placerats på den bakre väggen, och mannen avtecknas i silhuett mot väggen. Notera att sekvenserna utan och med maskeringsnät har registrerats vid olika tillfällen, varför mannens rörelser ej är helt identiska i bägge fallen. (Från AFRL).

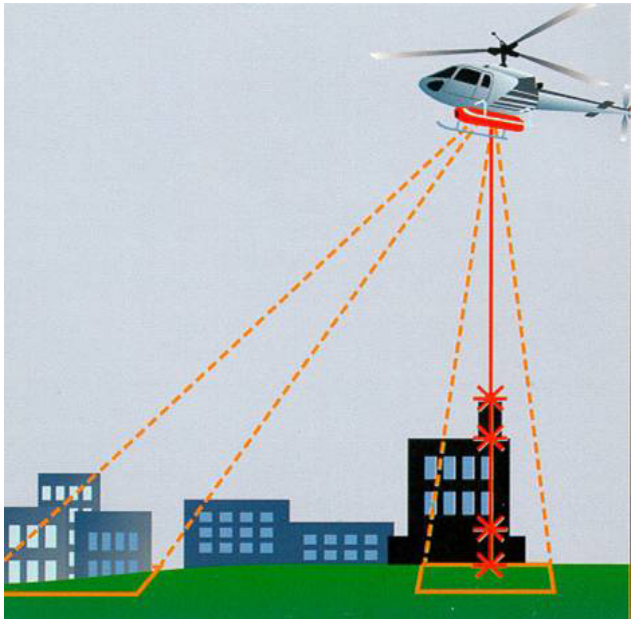


Figur 30. Exempel på en kompakt stirrande 3D-laserradar. Enheten till höger innehåller en pulsad lasersändare (lilla aperturen) samt mottagare med FPA-detektor.

5 Flygburen 3D-laserradar

Med en 3D-laserradar monterad på en flygande plattform kan topografiska data från ett geografiskt område mätas upp, se figur 31. Sådana sensorer är också användbara i urbana miljöer, inte minst för att det ger möjlighet till aktuell information [13]. Exempelvis kan vissa byggnader ha blivit raserade, vilket inte framgår av kartmaterial och GIS-databaser. Sådana förändringar kan skapa nya möjligheter eller risker i den stridstekniska situationen.

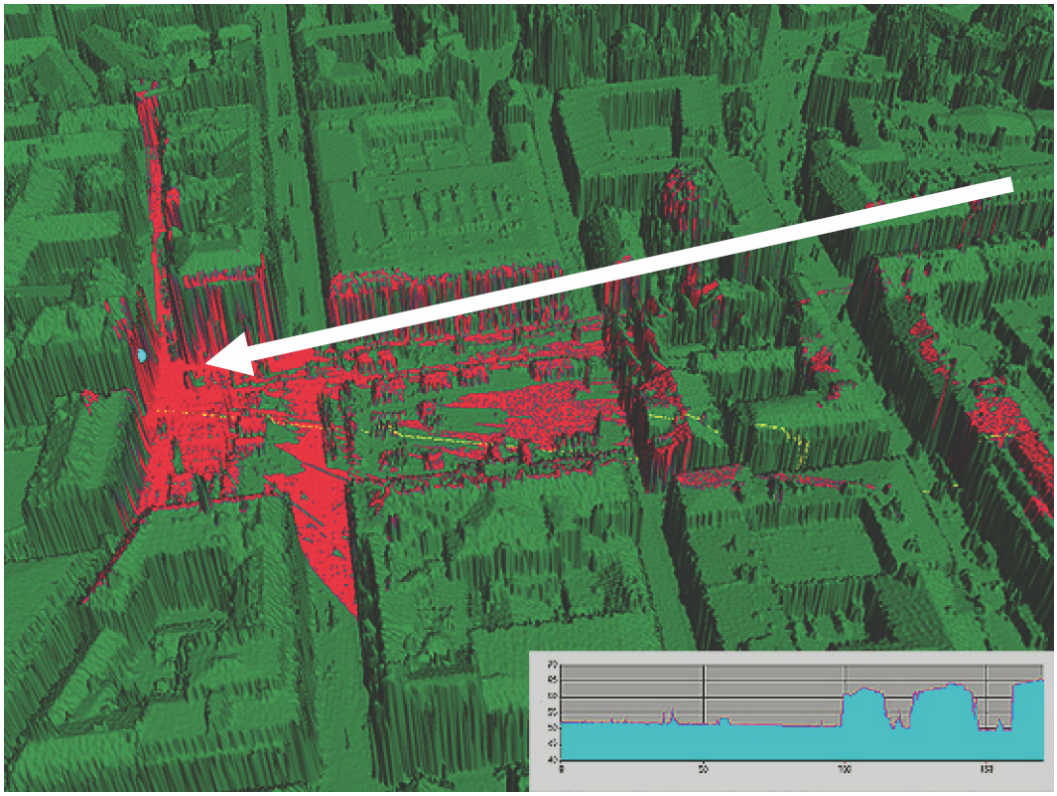
Dagens flygburna system är av skannande typ, men även här kan vi förvänta oss en utveckling mot stirrande system. Om en stirrande sensor kombineras med någon typ av skanner, kan det momentana synfältet svepas över ett större spaningsområde. Detta minskar väsentligt den frekvens som skannersystemet måste arbeta vid, jämfört med dagens enkelelementsdetektorer.



Figur 31. Exempel på ett flygburet laserradarsystem för topografisk kartering.

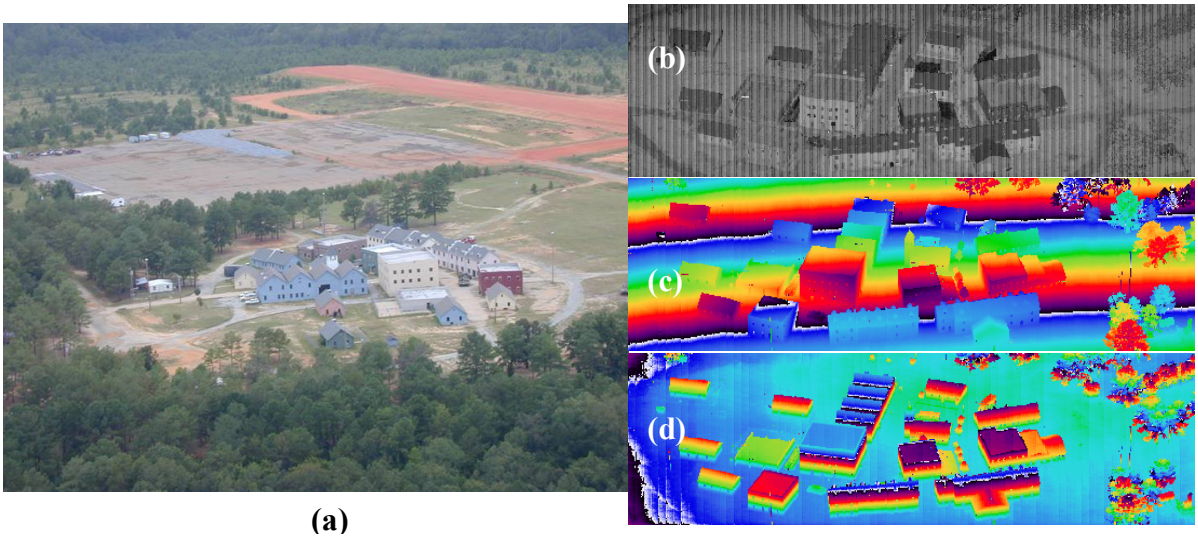
Dessa data kan användas till att generera aktuella 3D-kartor av området. Sådana modeller kan användas i ett stort antal tillämpningar, exempelvis [14]:

- Övning
- Uppdragsplanering och repetition
- Visualisering
- Systemtester och systemevaluering
- Simulering
- Prediktion av siktlinjer (se figur 32)
- Utvärdering av uppdrag
- Hotanalys
- Analys av tillgänglighet
- Precisionsnavigering
- Sensorsimulering



Figur 32. Exempel på hur en 3D-modell av stadsmiljö kan användas för att visualisera siktlinjer. En prickskytt har placerat sig i den blåa punkten vid pilen. De rödmarkerade områdena visar de områden till vilka skytten har fri sikt. Alternativt kan det röda området visa det område som kan bevakas från en observationspunkt som placerats i den blå punkten. (Från [14])

Figur 33. 3D-modell av centrala Norrköping som genererats med ett flygburet skannande laserradarsystem (Topeye).



Figur 34. Till vänster (a) en visuell bild av ett område med urban miljö. Till höger visas bilder från en flygburen laserradar; (b) visar en intensitetsbild, (c) visar en färgkodad avståndsbild och (d) visar en omprojektion av 3D-bilden, där höjden över marken har färgkodats. (Från AMRDEC, USA)

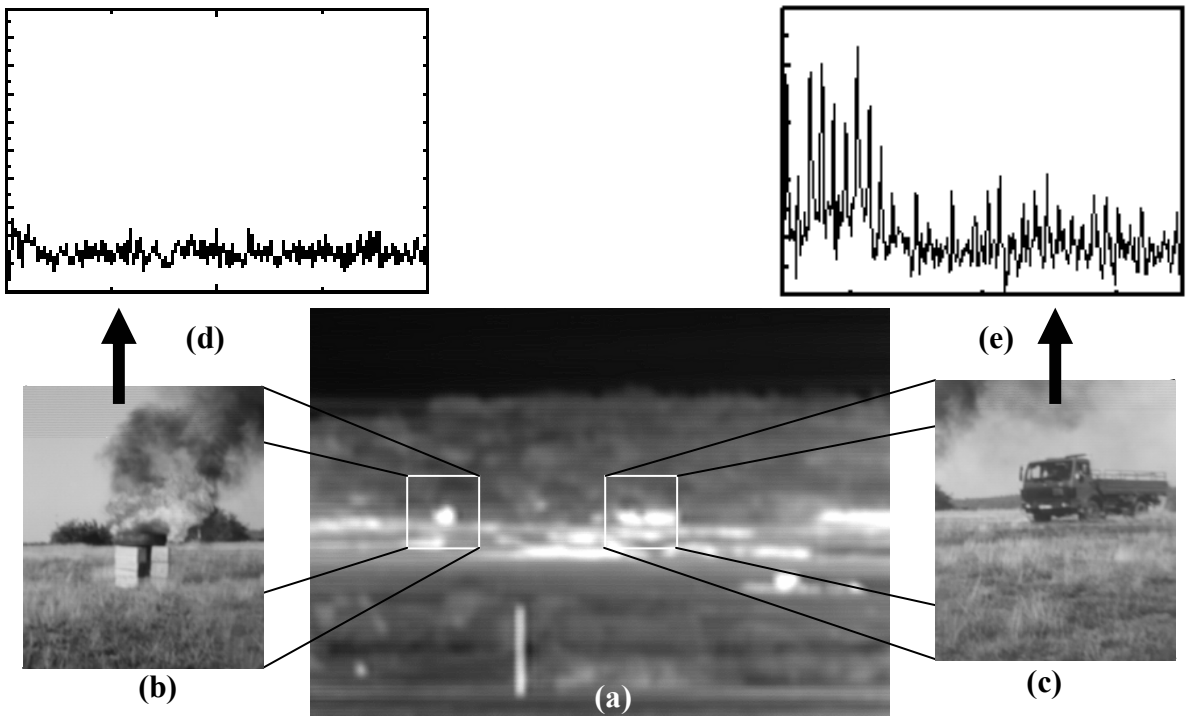
6 Vibrometri

Med en teknik som benämns *koherent laserradar* kan Dopplerskiftet i den reflekterade laserstrålningen detekteras, vilket också gör det möjligt att mäta ett frekvensskift orsakat av ett vibrerande objekt [15, 16]. På grund av resursbrist har det inte varit möjligt att använda det laservibrometrisystem som var tänkt att utnyttjas i detta projekt. Därför kan vi inte redovisa några fältmätningar från stadsmiljö. Tidigare registrerade vibrometridata från sex olika fordon (T72, Strv121, Strf90, tgb11, Bv206 och Tglb30) har analyserats med hjälp av Empirical Mode Decomposition (EMD) [17] och Hilbertspektrum i ett försök att klassificera fordonen. Resultaten visar att EMD-metoden kunde klassificera fler observationer korrekt jämfört med tidigare studerade wavelet-metoder. En utförligare beskrivning ges i [18]. En speciell laserradarteknik där den mottagna Dopplersignalen återkopplas in i sändarlasern kan ge mycket hög känslighet. Denna teknik uppges kunna användas för fjärravlyssning och mätning av rörelser i storleksordningen nm [19].

Möjligheten att med laservibrometri kunna skilja skenmål från verkliga mål illustreras i figur 35, där en lastbil med motorn på tomgång uppvisar ett helt annorlunda vibrationsspektrum jämfört med ett skenmål. I en IR-bild kan dock signaturerna för dessa bägge objekt te sig ganska lika. Om behovet endast är att skilja ett vibrerande objekt från ett stillastående, kan betydligt enklare signalbehandling användas jämfört med om kravet är att kunna genomföra exempelvis igenkänning baserat på vibrometrispektrum. Samma teknik kan användas för verkansverifiering, dvs. undersöka om ett objekt slutar att vibrera efter bekämpning (om exempelvis motorn i ett stridsfordon stannar efter en vapeninsats kan man dra slutsatsen att fordonet är utslaget). Ett glesare sökmönster kan användas för detektion av vibrerande objekt. Ett objekt som har lokaliserats kan sedan undersökas noggrannare med ett tätare sökmönster.

Tal kan fjärravlyssnas genom att mäta vibrationer, t.ex. genom kooperativ avlyssning av ett retroreflekterande membran, som fungerar som mikrofon. Möjligen kan laservibrometri även användas exempelvis för att avgöra om det finns människor i en lokal.

En möjlig utveckling är en kombinerad detektormatris med både element för direktdetektion och koherent detektion. Detta skulle ge möjlighet att med samma detektor mäta 3-D och vibration (mikrodoppler).



Figur 35. Laservibrometri kan exempelvis användas för att skilja verkliga mål från skenmål. I (a) visas en IR-bild av en scen med en uppvärmd metallåda (b) och en lastbil med motorn på tomgång(c). Motsvarande vibrometrispektrum för metallådan visas i (d) respektive (e). Skenmålet kan tydligt skiljas från lastbilen genom att studera frekvensspektrum för vibrationerna. (Från FGAN-FOM)

7 Diskussion

Med en avbildande 3D-laserradar kan fjärrmätning av 3-dimensionella objekt göras med cm-noggrannhet. Exempelvis kan detta utnyttjas till att ”se in” genom fönster och registrera vad som finns inne i en byggnad. Det har visats att detta är möjligt även då det finns fördragna gardiner (ej helt täta) eller persienner i fönstren. Detta är av värde för att få en uppfattning om huruvida det finns människor inne i en lokal eller hur lokalen ser ut. En förutsättning för en detta är att en del av den utsända laserstrålningen kan tränga igenom hindret och komma in i lokalen.

Dagens skannande 3D-laserradarsystem är ej funktionella i realtidstillämpningar, men det pågår en utveckling av stirrande 3D-sensorer (fokalplansmatriser, FPA, med signalbehandling på detektorchipet), vilka har en potential att kunna användas vid militära operationer i stadsmiljö. Speciellt skall noteras att kravet på ögonsäkerhet kan uppfyllas genom att använda en laservåglängd på omkring 1,5 µm. De nya FPA-detektorerna utvecklas också för denna våglängd.

I stadsmiljö kan 3D-modeller användas för att avgöra vilka sektorer som kan bevakas från en viss punkt, alternativt avgöra vilka sektorer som är farliga ur hotsynpunkt. Databaser för sådana modeller, speciellt vid operationer i miljöer med bristfälligt eller inget kartunderlag (internationella insatser) kan genereras med en 3D-laserradar monterad på en UAV. En

markbaserad, eller handhållen, 3D-laserradar kan användas för att lokalt uppdatera en sådan modell, och utnyttjas för att avgöra om några förändringar har genomförts på en byggnad, t.ex. befästningar eller andra fältarbeten.

Genom att studera vibrationer i byggnader och objekt med laservibrometri (koherent laserradar) kan rörelser och aktiviteter avslöjas. Möjligen kan även aktiviteter under mark detekteras (tunnlar och avlopp). Tekniken kan användas för verkansverifiering, t.ex. om motorn i ett stridsfordon stannar efter en vapeninsats kan slutsatsen dras att fordonet är utslaget. Det finns också möjlighet att kan fjärravlyssna tal genom att mäta vibrationer.

8 Erkännande

Vi tackar Richard Richmond, AFRL, Joseph Grobmyer, AMRDEC, samt Peter Lutzmann, FGAN-FOM, för bildmaterial som har använts i denna rapport.

9 Referenser

1 O. Steinvall, T. Carlsson, C. Grönwall, H. Larsson, and L. Klasén, “Laser Based 3-D Imaging, New Capabilities for Optical Sensing- Technical overview and research problems”, FOI-R--0856--SE, teknisk rapport, 2003.

2 O. K. Steinvall, L. M. Klasen, C. A. Gronwall, U. Söderman, S. Ahlberg, Å. Persson, M. Elmqvist, H. Larsson, D. Letalick, P. Andersson, T. Carlsson, and M. Henriksson, “3D laser sensing at FOI: overview and a system perspective,” Proc. SPIE Vol. 5412, p. 294-309, *Laser Radar Technology and Applications IX*; G. W. Kamerman; Ed., 2004.

3 C. A. Grönwall, T. R. Chevalier, Å. Persson, M. Elmqvist, S. Ahlberg, L. M. Klasén, and P. Andersson, “Methods for recognition of natural and man-made objects using laser radar data,” Proc. SPIE Vol. 5412, p. 310-320, *Laser Radar Technology and Applications IX*, G. W. Kamerman; Ed.2004.

4 L. M. Klasen, P. Andersson, H. Larsson, T. R. Chevalier, and O. K. Steinvall, “Aided target recognition from 3D laser radar data,” Proc. SPIE Vol. 5412, p. 321-332, *Laser Radar Technology and Applications IX*, G. W. Kamerman; Ed., 2004.

5 http://www.optech.on.ca/prodilris.htm

6 T. Svensson, H. Larsson, L. Klasén M. Henriksson, T. Carlsson, I. Nedgård, D. Letalick, M. Elmquist, G. Carlsson och S. Cronström, ”Prov i Kvarn med passiva och aktiva optroniska sensorsystem”, FOI-R--0740--SE, teknisk rapport, 2002.

7 http://www.riegl.com/

8 G. S. Cheok, S. Leigh, A. Ruhkin, “Calibration experiment of a laser scanner”, NISTIR 6922, 2002.

9 D. Letalick and H. Larsson, ” 3-D laser radar imaging or concealed targets,” Presented at NATO RTO SET-099 RSM-03/MSE “Joint SCI/SET CDT – Results and Lessons Learned”, FOI-SH--0001--SE (2004)

10 http://hds.leica-geosystems.com/products/HDS3000_specs.html

11 O. Steinvall, H. Larsson, F. Gustafsson, T. Chevalier, Å. Persson, and L. Klasen, “Characterizing targets and backgrounds for 3 D laser radars,” presented at SPIE Security and Defence 2004, *Military Remote Sensing*, London, 2004.

12 R. Stettner, H. Bailey, and R. D. Richmond, “Eye safe laser radar focal plane array for three-dimensional imaging,” Proc. SPIE Vol. 5412, *Laser Radar Technology and Applications IX*, 2004

13 J. E. Grobmyer, Jr., T. Lum, and R. E. Morris, “LADAR MOUT Evaluation (LAME) conducted at the McKenna MOUT site, Fort Benning, Georgia,” Proc. SPIE Vol. 4719, pp. 113-123, *Infrared and Passive Millimeter-wave Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing*, R. Appleby, G. C. Holst, D. A. Wikner; Eds., 2002.

14 S. Ahlberg, M. Elmqvist, P. Hermansson, J. Jacobsson, Å. Perssonoch U. Söderman, “Syntetiska omgivningar och sensorsimulering - verksamhetsrapporter 2001”, FOI-R--0292—SE, Teknisk rapport, 2001.

15 C. Karlsson, F. Å. A. Olsson, D. Letalick Dietmar, and M. Harris “All-fiber multifunction continuous-wave coherent laser radar at 1.55 micrometer for range, speed, vibration, and wind measurements,” Appl. Opt., Vol. 39, No. 21, pp. 3716-3726, 2000.

16 D. Letalick, T. Carlsson, H. Habberstad, and M. Henriksson, “Target recognition by vibration frequency analysis - a comparison of laser vibrometry and acoustic methods.” Proc. SPIE Vol. 5086, *Laser radar technology and applications VIII*, 2003.

17 N. E. Huang, Z. Shen, S. R. Long, M. C. Wu, H. H. Shih, Q. Zheng, N-C. Yen, C. C. Tung och H. H. Liu. “The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis”, Proc. R. Soc. Lond. A (1998) 454, 903-995.

18 I. Nedgård, “A comparison of analysis methods for vehicle classification by laser vibrometry”, FOI

19 K. Abe, K. Otsuka, and J.-Y. Ko, “Self-mixing laser Doppler vibrometry with high optical sensitivity: application to real-time sound reproduction,” New J. of Phys., Vol. 5, pp. 8.1-8.9, 2003.