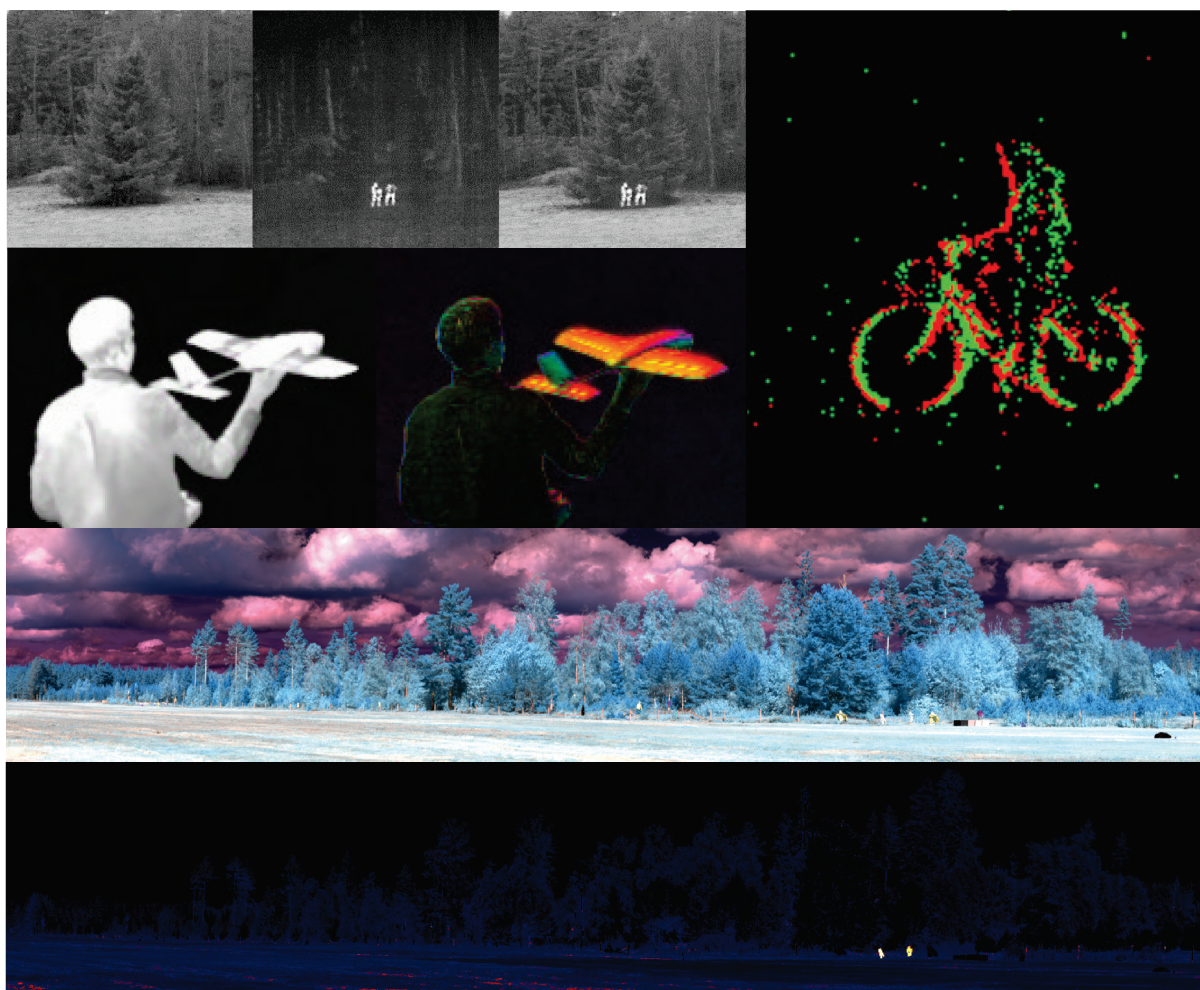


JOHAN ERIKSSON, MARIA AXELSSON, DAVID GUSTAFSSON,
DAVID BERGSTRÖM, JOHAN BERNELAND, ANDREAS BRORSSON,
CARL BRÄNNLUND, ALEXANDER FORSMAN, HANNA HAMRELL,
LUDWIG HOLLMANN, VERA HÅKANSSON, BRITTA LEVIN,
JOHAN RIDEG, DANIEL SVEDBRAND, THOMAS SVENSSON,
ERIK VALLDOR, NICLAS WADSTRÖMER



Johan Eriksson, Maria Axelsson, David
Gustafsson, David Bergström, Johan Berneland,
Andreas Brorsson, Carl Brännlund, Alexander
Forsman, Hanna Hamrell, Ludwig Hollmann, Vera
Håkansson, Britta Levin, Johan Rideg, Daniel
Svedbrand, Thomas Svensson, Erik Valldor,
Niclas Wadströmer

Avancerade spaningssensorer 2021- 2023

Slutrapport

Titel	Avancerade spaningssensorer 2021-2023 – Slutrapport
Title	Advanced Reconnaissance Sensors 2021-2023 – Final report
Rapportnr/Report no	FOI-R--5553--SE
Månad/Month	Januari
Utgivningsår/Year	2024
Antal sidor/Pages	54
ISSN	1650-1942
Uppdragsgivare/Client	Försvarsmakten
Forskningsområde	Sensorer och signaturanpassning
FoT-område	Sensorer och signaturanpassning
Projektnr/Project no	E51513
Godkänd av/Approved by	Christian Jönsson
Ansvarig avdelning	Telekrig

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

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

Sammanfattning

Den här rapporten sammanfattar resultaten från det treåriga forskningsprojektet *Avancerade spaningssensorer* som har pågått från 2021 till 2023. Arbetet har genomförts inom Försvarmaktens samlingsbeställning för forskning och teknikutveckling inom Sensorer och signaturanpassning (FoT SoS, AT.9220423). Projektet har studerat passiv elektrooptisk teknik inom områdena mörkerförmåga, hyperspektral avbildning samt polarimetrisk avbildning. Dessa teknikområden har sedan tidigare bedömts bidra till nya eller förbättrade förmågor till Försvarmakten. Teknikerna kan också utgöra potentiella hot mot egna förband och är därför viktiga att studera. Projektet har också utforskat möjligheter med ny sensorteknologi inom händelsebaserad (neuromorfisk) avbildning för tillämpningar inom spaning och övervakning.

Resultat från utvärderingar samt teknik- och metodutveckling inom en rad olika tillämpningsområden presenteras i rapporten. Hyperspektrala och polarimetriska sensortechniker och signalbehandlingsmetoder visas, var för sig och i samverkan, ge ökad möjlighet till detektion och igenkänning genom att öppna för materialklassificering respektive diskriminering utifrån geometriska ytegenskaper. Nya digitala mörker-sensortechniker skapar möjligheter att automatiskt bearbeta bildinformation, vilket bland annat demonstrerats genom multimodal bildfusion och bildförbättrande avbrusning. Ny teknik i form av händelsebaserad avbildning utvärderas brett och dess potential demonstreras där teknikens höga dynamiska omfång och temporala upplösning erbjuder unika möjligheter i jämförelse med konventionell teknik.

Nyckelord: spaning, övervakning, elektrooptik, infraröd, Vis/NIR, SWIR, LWIR, mörkerförmåga, polarimetrisk avbildning, multispektral avbildning, hyperspektral avbildning, händelsebaserad avbildning, maskininlärning, djupinlärning, måldetektion, compressive imaging

Summary

This report summarizes the results from the research project Advanced Reconnaissance Sensors during the three years 2021-2023. The work is performed within the Swedish Armed Forces research and development program for Sensors and low observables (FoT SoS, AT.9229423). Passive electro-optical technology for night-vision, hyperspectral imaging and polarimetric imaging is studied. These three fields has earlier been identified as interesting for both enabling improved capabilities in the future as well as being potential threats. A fourth topic, aimed at new sensor technology, focusses on neuromorphic imaging.

Results from a large and diverse set of areas are presented in the report. Improved detection and reconnaissance from detailed analysis of surface chemistry and geometry thru sensor technology and signal processing for hyperspectral and polarimetric imaging, both used separately and also combined, are demonstrated. New digital night vision sensor technologies that enable autonomous processing of image information are demonstrated through multimodal image fusion and image denoising. Neuromorphic sensor technology, which offers large dynamic range and high temporal resolution compared to conventional imaging sensors, is assessed in a wide range of applications.

Keywords: reconnaissance, surveillance, electro-optical, infrared, Vis/NIR, SWIR, LWIR, night vision, polarimetric imaging, multispectral imaging, hyperspectral imaging, neuromorphic imaging, machine learning, deep learning, target detection, compressive imaging

Innehåll

1	Inledning	7
1.1	Frågeställningar	7
2	Sammanfattade resultat	9
2.1	Digital mörkerförmåga	9
2.2	Hyperspektral avbildning	9
2.3	Polarimetrisk avbildning.....	9
2.4	Händelsebaserad avbildning	10
3	Mörkerförmåga	12
3.1	Teknisk orientering och bakgrund	12
3.2	Vidareutveckling av fusionsdemonstrator i Vis/NIR och LWIR	14
3.3	Internationella samarbeten	17
3.4	Bildförbättring med maskininlärning	19
4	Hyperspektral avbildning	21
4.1	Teknisk orientering och bakgrund	21
4.2	Hyperspektral kamera i SWIR-området.....	23
4.3	Analys och visualisering av hyperspektrala data	24
4.4	Internationella samarbeten	31
4.5	Multi- och hyperspektrala data från ryldbaserade sensorer.....	31
4.6	Compressive sensing	32
5	Polarimetrisk avbildning	34
5.1	Teknisk orientering och bakgrund	34
5.2	Sensorer för momentan polarimetrisk avbildning.....	35
5.3	Visuella bandet	37
5.4	Termisk långvågs-IR.....	38
5.5	Spektropolarimetri.....	39
5.6	Samarbeten	40
6	Händelsebaserad avbildning	41
6.1	Teknisk orientering och bakgrund	41
6.2	UAV-detektion och -följning	43
6.3	Kameraövervakning.....	45
6.4	Frekvensanalys.....	46
6.5	Passiv 3D-rekonstruktion.....	46
6.6	Höghastighetskamera för projektilavfyrning	47
6.7	Verkanslaser och stort dynamiskt omfång	49
6.8	Egenpositionering	49
6.9	Samarbeten	50
7	Referenser.....	51
Bilaga 1.	Rapporter, vetenskapliga artiklar, konferensbidrag och examensarbeten	54

1 Inledning

Under perioden 2021-2023 har projektet *Avancerade Spaningssensorer* byggt vidare på tidigare arbete inom digitala elektrooptiska sensorer för mörkerseende samt hyperspektral och polarimetrisk avbildning inom olika optiska våglängdsband. Under ett fjärde fokusområde, inriktat på ny sensorteknologi, har projektet utforskat möjligheter med eventbaserad, eller neuromorfisk, avbildning.

Syftet med projektet har varit forskningsinriktad kunskapsuppbyggnad kring passiva avbildande elektrooptiska sensorer inom dessa fyra fokusområden. Genom datainsamling, fenomenologiska studier och utveckling av metoder för dataanalys har resultat från en rad potentiella tillämpningar demonstrerats. Även utmaningar och begränsningar har behandlats. Både tekniska begränsningar, som kan komma att lösas genom utveckling av nya sensorer och algoritmer, och även fysikaliska, eller mer fundamentala, där naturen sätter gränser.

Rapporten består av tre huvuddelar. I kapitel 1.1 presenteras och besvaras de forskningsfrågor som inriktat verksamheten. Resultat från projektets fokusområden presenteras kortfattat i kapitel 2 och mer ingående i kapitel 3, 4, 5 och 6. Rapporten avslutas med en förteckning av de rapporter, publikationer, konferensbidrag och examensarbeten som genomförts inom projektet.

Arbetet har genomförts inom Försvarmaktens samlingsbeställning för forskning och teknikutveckling inom Sensorer och signaturanpassning (FoT SoS, AT.9220423).

1.1 Frågeställningar

Fyra frågeställningar har inriktat kunskapsuppbyggnaden kring passiva elektrooptiska sensorer och hur dessa kan bidra till nya eller förbättrade förmågor. En fråga behandlar mörkersensorer och hur man kan få en förbättrad förmåga att verka i mörker, två frågor behandlar hur spektrala och polarimetriska sensorer kan nyttiggöras för spaning och övervakning och en fråga behandlar vilka nya sensortekniker och analysmetoder som kan vara av intresse för Försvarmakten. Här ges korta svar på frågorna och hänvisningar till vidare läsning för utförligare svar.

? *Hur kan en förbättrad förmåga att verka i mörker åstadkommas genom den nya sensor- och användarnära signalbehandlingen som möjliggörs av digitala mörkersensorer?*

Digitala mörkersensortekniker ger möjligheter att automatiskt bearbeta information, både mer sensornära genom avbrusning, kontrastförbättring och andra bildkvalitetsförbättrande åtgärder samt mer användarnära som automatisk detektion/igenkänning och bildfusion. I kapitel 3 presenteras verktyg för bildfusion och exempel på kvalitetshöjande metoder. Digitala mörkersensorer skapar också bättre förutsättningar att kunna lagra bilddata för efteranalys och för överföring av bilder eller bildrelaterad information.

? *Hur kan multidimensionell information från spektrala och polarimetriska sensorer nyttiggöras och visualiseras för en mänsklig operatör och beslutsfattare?*

Multi- och hyperspektrala sensorer bidrar med mer detaljerad information än den man får från bredbandiga sensorer, vilket möjliggör att material eller kemiska substanser kan klassificeras eller mål detekteras baserat på dess spektrala signatur. Spektral analys bidrar till en förbättrad lägesbild som kan komplettera den från bredbandiga sensorer eller radar. Tekniken är användbar i olika typer av tillämpningar; från fasta positioner, fordon, UAV:er, flygplan och satelliter. En mer utförlig beskrivning av detektionsmetoder och visualisering av hyperspektrala data redovisas i kapitel 4.

Polarimetriska kameror med sensorer som bygger på pixellerade filter finns på marknaden och tillåter momentan avbildning av rörliga scener. I spaningssammanhang gagnar den polarimetriska domänen främst vid klotterbegränsad detektion snarare än räckviddsbegränsad. För att särskilja konstgjorda (mer släta) föremål mot naturliga (mer skrovliga) omgivningar har infärgning av områden i bilder baserat på polarimetrisk kontrast konstaterats ge bra resultat i många situationer. Fortsatta utmaningar handlar om att hantera de bildartefakter som kan uppstå i områden med hög kontrast samt förstå och utnyttja samverkan mellan polariserad instrålning, mätgeometri samt balansen mellan reflekterad och emitterad strålning. I kapitel 5 presenteras mer ingående möjligheter och begränsningar med tekniken.

? *Hur kompletterar spektrala och polarimetriska avbildningsmetoder varandra och hur kan de kombineras för att ge ökad prestanda och robusthet vid måldiskriminering?*

Inledande försök har visat på hur grad av polarisation från olika materialtyper uppvisar ett annorlunda våglängdsberoende jämfört med spektral radians. Detta antyder att radians och polarimetriska egenskaper kompletterar varandra och spektropolarimetriska sensorsystem kan användas för att diskriminera mellan olika mål på ett sätt som är svårt för renodlat spektrala respektive polarimetriska system. Tekniska utmaningar gör dock att skannande sensorteknik krävs vilket begränsar potentiella tillämpningar. Exempel från spektropolarimetri i SWIR och visuella våglängdsbandet presenteras i kapitel 5.5.

? *Vilka nya framväxande passiva elektrooptiska sensortekniker och signalbehandlingsmetoder är av intresse för Försvarmaktens framtida behov?*

Eventkameror är en ny typ av sensorer med flera attraktiva egenskaper som öppnar upp för nya försvarstillämpningar. Sensorns höga temporala upplösning, dess stora dynamiska omfång och dess låga energiförbrukning gör den mycket attraktiv inom många försvarstillämpningar. Detektion och följning av en- eller fåpixel mål, som exempelvis UAV:er eller eldgivning, är potentiella tillämpningar. Kartläggning av snabba förlopp såsom sprängverkan där traditionellt höghastighetskameror används är en annan potentiell tillämpning. Sensorns stora dynamiska omfång möjliggör analys av snabba förlopp med stor intensitetsdynamik. För att nyttiggöra eventkamerans egenskaper inom försvarstillämpningar krävs anpassad signalbehandling. Det är ett aktivt forskningsområde där nya metoder utvecklas i snabb takt. Kapitel 6 tar upp en rad exempel från olika tillämpningar där händelsebaserad avbildning visat potential.

2 Sammanfattade resultat

I följande avsnitt ges en kortfattad sammanfattning av arbetet inom de fyra teknikområden för projektet.

2.1 Digital mörkerförmåga

Inom teknikområdet passiv mörkerförmåga har arbetet fortsatt med studier kring hur ny digital mörkersensorteknik kan förbättra förmågan att verka i mörker, med särskilt fokus på bildfusion samt SWIR-området. Inom bildfusion har tidigare egenutvecklat fusionssystem i Vis/NIR och LWIR uppdaterats, både vad gäller hårdvara och mjukvara. Fusionssystemet kan numera användas både dag och natt och har ett mjukvarugränssnitt som är mer användarvänligt och anpassat för demonstration. Nya insamlingar med systemet har visat att bildfusion kan bidra med både komplementär och redundant information som förbättrar den sammantagna situationsuppfattningen hos användaren. Projektet har producerat två examensarbeten under perioden, som visat hur djupinlärning kan användas för beräknings-effektiv brusreducering och för kantbevarande bildfusion. Projektet har även bidragit till fyra Nato-samarbeten med koppling till teknikområdet, inklusive två slutrapporter. I framtiden avser verksamheten utforska potential och begränsningar hos olika fotonräknande tekniker som för närvarande är under stark frammarsch.

2.2 Hyperspektral avbildning

I projektet har den hyperspektrala tekniken utvärderats särskilt för våglängdsområdet SWIR i mark-till-marktillämpningar. Visualiserings- och analysmetoder som kan stödja spaning och övervakning har undersökts för detta våglängdsområde. Ett grafiskt användargränssnitt har utvecklats för visualisering och analys. Måldetektion med spektra från målbibliotek har provats ut och demonstrerats. I SWIR-området framträder materialtypen och det är möjligt att känna igen olika material baserat på det uppmätta spektrumet. Analysmetoder som återigenkänning och anomalidetektion har utvärderats för VNIR- och SWIR-sensorer. Arbeta med och analys av hyperspektrala kameror i våglängdsområdet VNIR har också genomförts.

FOI deltar i ett Nato-samarbete inom hyperspektral avbildning som projektet bidrar till. Samarbetet har särskild fokus mot kommersiella hyperspektrala sensorer för jordobservation och hur de kan användas i militära tillämpningar. I projektet har FOI också analyserat möjligheter med spaning och övervakning från rymden (SÖR) baserat på multi- och hyperspektral sensordata och sammanfattat detta i ett memo. Memot ger en översikt av nuläget baserat på öppen information. Det beskriver vilken typ av satelliter som finns idag samt några kommande system, olika analystekniker för spektrala data samt exempel på möjligheter och hot.

Hyperspektrala sensorer som baseras på snapshotmetoder som compressive sensing samlar in en mindre mängd data än konventionell avbildning för att utifrån den särskilda uppsättningen av mätdata rekonstruera spektral information. Med dessa metoder har insamlingstiden minskat men rekonstruktionstiden är istället lång. Den långa rekonstruktionstiden har varit det som hindrat införandet av tekniken inom många tillämpningar. Beräkningseffektiva metoder anpassade för implementation på grafikkort har utvecklats och utvärderats på simulerad data med 25 gånger snabbare rekonstruktionstid än vad som tidigare varit möjligt.

2.3 Polarimetrisk avbildning

Polarimetriska sensorer ger en förbättrad möjlighet att urskilja konstgjorda mål i en naturlig bakgrund jämfört med en kamera med motsvarande konventionella sensor. Polarimetriska domänen ger information om geometri och ytstruktur. Sensorer som på senare år dykt upp på marknaden bygger på division-of-focal-plane (DoFP) vilket ger en möjlighet till

momentan, *eng.* snapshot, polarimetrisk och konventionell avbildning. Det öppnar för användning i rörliga scenarier. I det visuella våglängdsbandet finns små, lätta, robusta och strömsnåla polarimetriska kameror med bra prestanda tillgängliga på bred front. För termisk långvågs-IR finns även kommersiella sensorer, men med lägre tillgänglighet. Fysikaliska utmaningar för polarimetrisk avbildning i det visuella bandet kommer av den starkt polariserade instrålningen från himlen. Detta leder till att den polarimetriska målkontrasten är starkt beroende av geometrin sensor-mål-strålkälla. För termiska IR-bandet är instrålningen mindre polariserad och det är istället balansen mellan emitterad och reflekterad strålning som avgör den polarimetriska kontrasten. Här krävs kunskap om målets ytegenskaper, temperatur samt instrålning för att utnyttja tekniken optimalt. Tekniska utmaningar för DoFP-sensorer härrör främst från den undersampling som sker. För att beräkna de polarimetriska egenskaperna krävs att målet mäts in av minst tre pixlar samtidigt och någon form av rekonstruktion krävs för att fylla i data som fattas. Matematiska metoder som interpolerar eller artificiellt fyller i saknad information finns. För många situationer, exempelvis utbredda mål, är det tillräckligt. Det finns dock fall där det inte går att i efterhand återskapa bilddata, exempelvis för punktmål eller kring skarpa kanter. Här krävs metoder som istället påverkar samplingen på olika sätt. Defokusering av optik respektive multisampling har visat potential men till priset av sämre vinkel- respektive tidsupplösning. Inledande försök med spektropolarimetri, dvs kombinationen av spektral och polarimetrisk information, i visuella och SWIR-bandet, har visat att polarimetriska egenskaper kan ha ett spektralt beroende. Detta skulle kunna komplettera spektral radian för att karaktärisera material och därigenom bidra till förbättrad förmåga till detektion. Vidare studier behöver dock utreda hur robust tekniken är och även studera sensortekniska lösningar som inte kräver tidsödande multipel skanning av scenen.

2.4 Händelsebaserad avbildning

Eventkamera är en relativt ny typ av sensor som har flera attraktiva egenskaper som gör den relevant inom många försvarstillämpningar. En eventkamera rapporterar förändringar i scenen asynkront per pixel när förändringen inträffar. Eventkamera har flera fördelar jämfört med en konventionell kamera: mycket hög temporal upplösning, låg strömförbrukning, stort dynamiskt omfång och låg bandbredd. Inom detta teknikområde har arbetet fokuserat på karaktärisering av sensorn, tillämpningsnära datainsamling för verifiering att relevant information finns i eventdata för den aktuella tillämpningen och fördjupa förmågestudie med signalbehandling för detektion och följning av fåpixelmål i form av UAV:er.

Eventkameror är i dag kommersiellt tillgängliga från flera leverantörer. Jämfört med en konventionell visuell kamera är priset fortfarande relativt högt, 80kr i dagsläget, men priserna bedöms sjunka avsevärt i takt med att produktionsvolymerna ökar. Sensorn bygger inte på några unika komponenter som fördyrar produktionen utan priset motiveras av att mängden tillverkade sensorer, än så länge, är relativt låg. Tillgängliga eventkameror är lätthanterade och har god prestanda som i stort överensstämmer med utlovad prestanda med avseende på temporal upplösning, dynamiskt omfång och strömförbrukning.

Projektet har i en rad försök värderat om eventdata innehåller tillräckligt mycket information för att potentiellt kunna användas i militära tillämpningar. Datainsamlingar visar att eventkameran kan användas vid övervakning då eventdata innehåller tillräckligt med information för att detektera personer och olika aktiviteter. Den låga strömförbrukningen är också viktig för att uppnå uthållig övervakning. Detektion av mynningsflammar är möjligt i sensordata och likartade snabba förlopp med liten spatial utbredning. Analys av snabba förlopp så som verkananalys vid sprängningar och ballistiskanalys vid avfyrning av projektiler. Eventkameran nämns ofta som en attraktiv alternativ teknik inom så kallad Infrared Search and Track (IRST) där man ofta vill detektera och följa fåpixelmål på stora avstånd.

Detektion och följning av UAV:er i eventdata, dels på stora avstånd där målet utgörs av en eller ett fåtal pixlar och dels på kortare avstånd där UAV:en täcker flera pixlar, visar på stor potential. På stora avstånd, då målet utgörs av en eller ett fåtal pixlar, genererar målets rörelse samt propellerrotationen tillräckligt med event för detektion och följning i en relativt klotterfri miljö. För utbredda mål är målsättningen en mer detaljerad detektion och följning där man också vill bestämma målets utbredning och orientering för att på ett mer effektivt sätt kunna applicera motmedel. Data från eventkamera innehåller tillräckligt med detaljer för att bestämma UAV:ns orientering och bestämma till exempelvis rotorernas position.

Händelsebaserad avbildning med eventkameror är ett mycket lovande teknikområde med mycket snabb utveckling både på sensor- och signalbehandlingssidan. De signalbehandlingsmetoder som finns för analys av asynkron sensordata är idag inte helt mogna sett till de flesta potentiella tillämpningarna, vilket hindrar införandet av tekniken på bred front. Utveckling av signalbehandlingsmetoder är ett mycket aktivt forskningsområde där nya förbättrade metoder publiceras i snabb takt som dock måste anpassas för försvarstillämpningar.

3 Mörkerförmåga

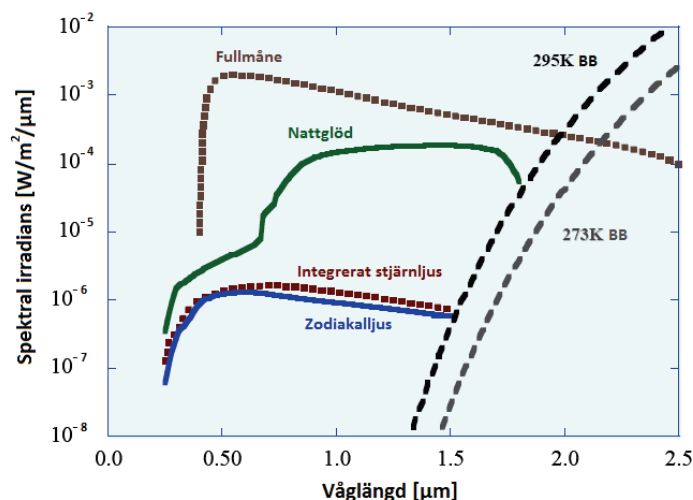
Arbetet inom teknikområdet mörkerförmåga har under perioden varit inriktat mot passiva digitala mörkersensorer, med särskilt fokus mot bildfusionerad mörkerförmåga samt spektralbandet SWIR. Projektet studerar främst kommande mörkersensortekniker och har ett tidsperspektiv som är att betrakta som ungefär 5-15 år framåt i tiden. Verksamheten kompletterar andra projekt på FOI, såsom Systemstöd Mörker¹, som är av mer direktstödande karaktär och som bland annat följer produktutveckling kring den analoga bildförstärkarteknik som används idag. Innan projektarbetet presenteras mer i detalj följer dock först en kort orientering och bakgrund om teknikområdet.

3.1 Teknisk orientering och bakgrund

Det finns ett uttalat behov hos Försvarsmakten att kunna strida 24 timmar om dygnet, med en och samma stridsteknik. Soldaters överlevnad hänger på att kunna uppnå verkan före motståndaren, dygnet runt med eget vapen och med gruppens understödsvapen. För detta krävs sensorer och andra tekniska hjälpmedel för säker förflyttning, orientering och bekämpning, under såväl dagtid som nattetid [1].

Passiv avbildning i mörker erhålls genom att utnyttja tillgängligt ljus från natthimmel och artificiella strålkällor i omgivningen. Figur 1 visar de dominerande naturliga ljuskällorna nattetid i det visuella och nära infraröda våglängdsområdet (Vis/NIR: ca 0.4-1 μm) samt i det kortvågiga IR-området (SWIR: ca 1-2.5 μm), där månsken och s.k. nattglöd (*eng.* night glow) är de mest dominanta [2]. Utöver dessa finns även artificiella ljusbidrag från gatlyktor, skyltbelysning, strålkastare, mm. som bidrar med ljus framför allt i eller nära urbana miljöer. Bidragen från olika artificiella ljuskällor är inte jämnt fördelade över spektralområdet 0,4-2,5 μm , utan det är framförallt i Vis/NIR-området (i synnerhet Vis) som dessa källor ger tillskott till det naturliga natthimmelsljuset. Det medför att den tillgängliga ljusnivån i Vis/NIR tenderar att öka med mängden moln på himlen på grund av reflektion av artificiellt ljus från bebyggelse. I SWIR-området däremot minskar generellt ljusnivån med mängden moln på natthimlen [3] [4]. I stridsmiljön kan också heta motorutblås från fordon, mynningsflammar och laserkällor från avståndsmätare och sikten bidra till ljusbilden. Vid våglängder över ca 2 μm börjar den termiska strålningen från objekt, terräng och himmel ta överhanden och dominerar sedan helt i det termiska IR-området (MWIR: ca 3-5 μm och LWIR: 8-14 μm).

¹ del av beställning AM.1080201 Markspaningssystem.



Figur 1. Spektral innehåll hos en natthimmel består av bidrag från en rad olika ljuskällor, där de mest signifikanta upp till ca 1.5 μm är månlight, natthglöd, integrerat stjärnljus och zodiakalljus. Över ca 2 μm börjar termisk strålning från omgivning att dominera [2].

Dagens mörkerförmåga hos Försvarsmakten baseras i huvudsak på en kombination av bredare användning av bildförstärkare på individnivå samt termiska IR-system på grupp-nivå. Bildförstärkare är vanligtvis verksamma i Vis/NIR-området och är utformade som huvud-, hjälm- eller vapenmonterade NVG (*eng.* night vision goggles). Termiska IR-system, verkandes antingen i MWIR- eller i LWIR-området, kan exempelvis utgöras av sikten på eldhandvapen och stridsfordon eller som handhållna eller fastmonterade observationskikare.

Bildförstärkartekniken har utvecklats kontinuerligt alltsedan andra världskriget och har idag en hög mognadsgrad, prestanda och robusthet, till en låg kostnad och vikt i ett synnerligen kompakt format. Denna till synes oslagbara kombination till trots, är det en analog teknik vars fortsatta utvecklingspotential har begränsningar. Digitala mörkersensortekniker ger möjligheter att automatiskt bearbeta information, både mer sensornära genom avbrusning, kontrastförbättring och andra bildkvalitetsförbättrande åtgärder samt mer användarnära som automatisk detektion/igenkänning och bildfusion. Digitala mörkersensorer skapar också bättre förutsättningar att kunna lagra bilddata för efteranalys och för överföring av bilder eller bildrelaterad information vid kommunikation i nätverk.

Utvecklingen inom det digitala mörkersensorområdet är för närvarande snabb, framför allt av kiselbaserad teknik i Vis/NIR, där flera olika tekniker konkurrerar. CMOS-teknik har på senare år sett en kraftfull reducering av sensorinternt brus, från mörkerström (termiskt genererade fotoelektroner i detektormaterial) och från elektroniska utläsningskretsar (s.k. utläsningsbrus). Vanligtvis är det utläsningsbruset som utgör den fundamentala känslighetsgränsen, eftersom mörkerström kan reduceras med kylning. Nuvarande state-of-the-art är 0.19 elektroner (kvadratisk medelvärde RMS) från amerikanska Gigajot [5], vilket väl understiger gränsen för när enskilda fotoner kan registreras (0.5 elektroner). Gigajot har marknadsfört flera produkter med deras teknik (benämnd QIS), i upplösningar upp till hela 41 MP (med 2.2 μm pixelstorlek). Huvudkonkurrenten är japanska Hamamatsu som med egen teknik (benämnd qCMOS), tagit fram produkter med 0.27 bruselektroner i 9 MP upplösning (4.6 μm pitch). Produkterna är dock fortfarande dyra och marknadsförs främst mot forskning och astronomi. Gigajot har dessutom sedan något år tillbaka slutat marknadsföra sina produkter öppet, vilket skapat spekulationer kring eventuella uppköp och ITAR-restriktioner för tekniken och företaget. För en bredare kommersiell tillämpning finns även så kallad sCMOS (scientific CMOS), med utläsningsbrus kring enstaka elektroner, från företag som brittisk/amerikanska BAE Systems (Fairchild Imaging) och kinesiska Gpixel. BAE har nyligen introducerat sin tredje generation av tekniken, med utläsningsbrus omkring 0.5 elektroner, vilket gör att gränsen mellan dessa tekniker successivt håller på att suddas ut.

Hybrider mellan analog bildförstärkarteknik och digital CMOS-teknik har funnits i flera år, där olika bildförstärkarkomponenter (såsom fotokatoder, mikrokanalplattor, fosforskärmar och fiber) kopplas mot en CMOS-matris. Amerikanska Intevac (sedan 2022 del av EOTech) var tidigt ute med sin EBAPS-teknik (Electron Bombarded Active Pixel Sensor), med fotokatod spänningskopplad direkt mot CMOS. Tekniken erbjuds numera i upplösningar upp till 4 MP (9 μm pitch). EBAPS har bl.a. levererats till förare av Apache-helikoptrar inom US Army för förbättrad möjlighet att navigera i mörker, men finns även integrerad i digitala binokulära NVG-produkter från företaget. Franska Photonis erbjöd under flera år en liknande teknik (benämnd EBCMOS), men har pga. problem med underleverantörer numera övergett tekniken till förmån för ICMOS (Intensified CMOS) där ett komplett bildförstärkarrör (inkl. fiber) kopplas mot CMOS-matris. Photonis erbjuder produkter med olika fotokatodalternativ, optimerade för olika spektralband, som kan integreras med valfri CMOS-kamera. Företaget marknadsför även egna produkten INocturn, som levereras med deras egen CMOS-kamera Nocturn, med 1280x1024 pixlar (9.7 μm pitch). Inom en snar framtid avser Photonis kunna leverera ICMOS-kameror baserade på deras senaste bildförstärkargeneration (5G), vilket enligt företaget ska göra tekniken mer kompakt än tidigare modeller.

Pixelmatriser med intern lavinförstärkning finns även genom s.k. SPAD-teknik (Single Photon Avalanche photoDiode). I en SPAD-pixel läggs ett kraftigt spänningsfält över fotodioden, där fotoelektroner accelereras upp till så höga kinetiska energier att de slår loss en lavin av sekundära elektroner i bulkmaterialet genom kollisionsjonisering. Eftersom en infallande foton triggar en skur av elektroner, erbjuder tekniken en så hög känslighet att enskilda fotoner kan registreras (utläsningsbruset blir väsentligen försumbart). Responsen är snabb och tekniken kan därför även användas för att tidsbestämma fotonevent med väldigt hög precision, något som gjort SPAD-tekniken högtintressant för LIDAR och aktiv 3D-avbildning. Upplösningar för matriser har tidigare varit relativt begränsade, men under 2023 introducerade Canon SPAD-kameran MS-500 i 1"-format med 2.1 MP (6.4 μm pitch).

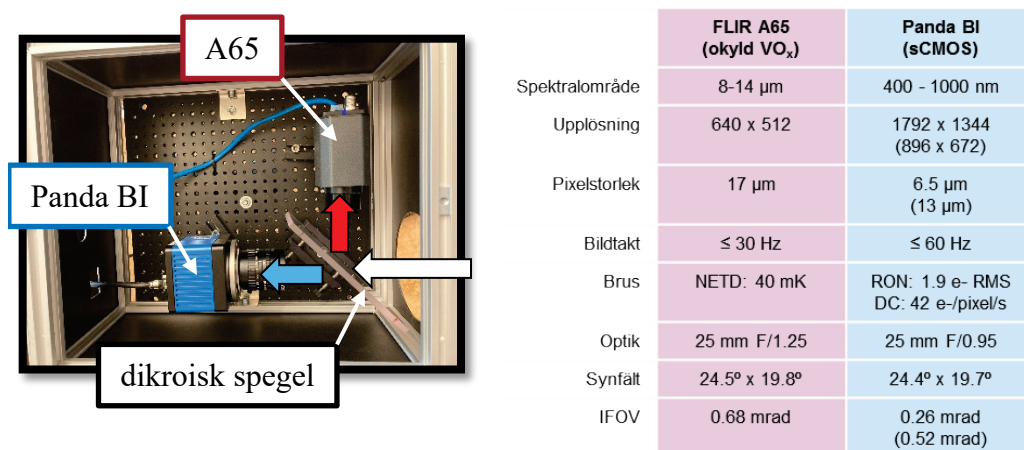
I SWIR-området är det framför allt detektormaterialet InGaAs (Indium Gallium Arsenid) som idag har potential att kunna användas i passiva mörkersensorer. Utvecklingen är dock inte alls lika snabb som i Vis/NIR-området. State-of-the-art för utläsningsbrus är fortfarande ca 15-20 elektroner, från israeliska SCD, vilket är relativt oförändrat över de senaste 3-4 åren. Den senare tidens utveckling har snarare varit fokuserad mot att åstadkomma mindre pixelstorlekar (5 μm) och högre upplösningar (HD), från exempelvis Sony och Atollo Engineering. Nya billigare detektormaterial baserade på kvantpunkter har lanserats på senare tid, från exempelvis amerikanska SWIR Vision Systems, franska STMicroelectronics och finska Emberion, vilket sannolikt kommer att ge större spridning av SWIR-teknik på både den civila och militära marknaden. Än så länge är dock SWIR-teknik för högprestanda-tillämpningar, såsom mörkerförmåga, minst 4-5 gånger dyrare än motsvarande i Vis/NIR-området.

3.2 Vidareutveckling av fusionsdemonstrator i Vis/NIR och LWIR

Bildfusion syftar till att kombinera bildinformation från två eller flera avbildande sensorer till en sammansatt bild med ett högre och säkrare informationsinnehåll, där styrkorna hos respektive sensor tas tillvara och där ingen kritisk information går förlorad.

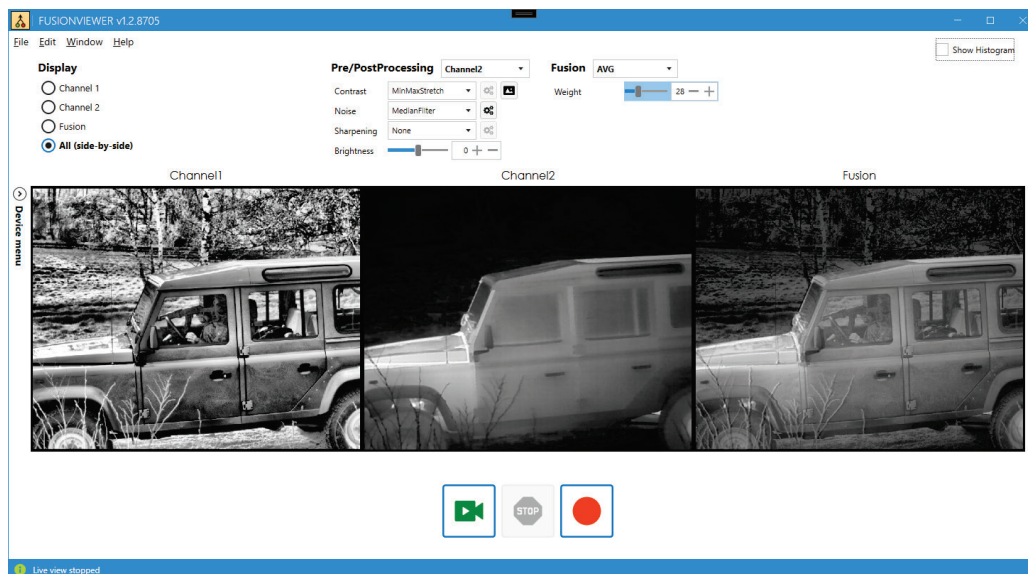
Tidigare har ett fusionssystem utvecklats för studier och demonstrationer av bildfusion för förbättrad mörkerförmåga. Systemet består av två kameror: en mörkerkamera i Vis/NIR-området och en termisk IR-kamera i LWIR-området. Huvudmotivet bakom valet av våglängdsområden har varit att kombinera den högre igenkännings- och identifieringsförmågan hos Vis/NIR med den mer robusta och dagsljusoberoende detektionsförmågan hos LWIR. En mer detaljerad beskrivning återfinns i tidigare slutrapport från 2020 [6].

Systemet har på senare tid uppdaterats med avseende på Vis/NIR-kanalen. Den tidigare EBCMOS-kameran EBNocturn (från Photonis) har bytts ut och ersatts med sCMOS-kameran Panda BI från PCO GmbH (med pixelmatris från Gpixel). Panda BI är en bakuppläst sCMOS-kamera av den andra generationen, med hög kvanteffektivitet, låg mörkerström och lågt utläsningsbrus, se prestandatabell i Figur 2. Till skillnad från EBNocturn saknar sCMOS-tekniken extern ljusförstärkning, vilket (åtminstone teoretiskt) gör den mindre känslig vid låga ljusnivåer, men den har å andra sidan bättre bildkvalitet under ett större spann av ljusnivåer (dvs. större dynamiskt omfång). Det gör att fusions-systemet numera går att använda i dagsljus såväl som i mörker, ned till ca 5-10 mlx (i videotakt). Den maximala upplösningen för kameran är 4 MP (6.5 μm pitch), men efter anpassning av synfält och registrering mot IR-kameran i fusionssystemet blir den resulterande upplösningen 1792 x 1344 pixlar. I mörker kan det vara fördelaktigt att summera signaler från grannliggande pixlar (genom s.k. pixel binning) för att öka känsligheten varvid den resulterande upplösningen istället blir 896 x 672 pixlar (med en effektiv pitch om 13 μm). En möjlig framtida uppgradering av systemet är att byta ut Panda BI mot en sCMOS-kamera av tredje generationen, alternativt mot någon fotonräknande teknik som SPAD, QIS/qCMOS eller möjligtvis ICMOS. En annan tänkbar vidareutveckling är att lägga till en SWIR-kanal, genom att lägga till ytterligare ett dikroiskt filter i uppställningen, alternativt att byta ut Vis/NIR mot SWIR.

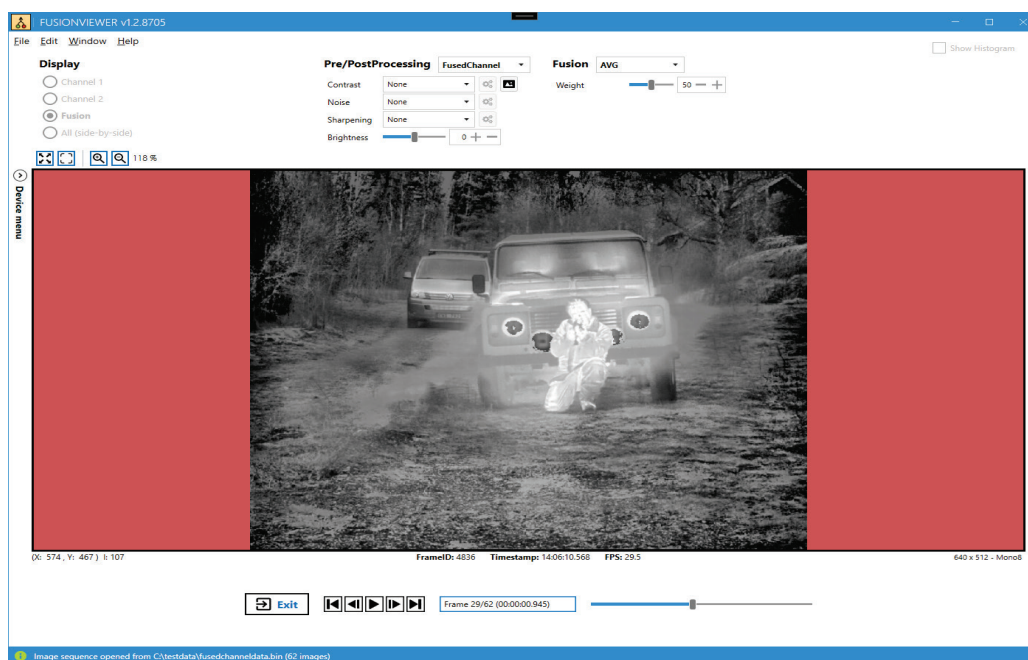


Figur 2. I det fusionssystem som tagits fram i projektet används en dikroisk spegel för spektral uppdelning av infallande ljus (vit pil) till de två kamerorna i Vis/NIR (blå pil) respektive LWIR (röd pil), vänster bild. Detta ger fusionssystemet en gemensam siktlinje för båda spektralbanden. Kamerornas specifikationer kan ses i tabellen till höger (RON anger utläsningsbrus och DC anger mörkerström vid rumstemperatur).

I syfte att underlätta presentation, demonstration och insamling av fusionerade bilddata har ett nytt användargränssnitt i Windows tagits fram. Programmet har fått namnet FusionViewer och kan i realtid ta emot bilddataströmmar från två anslutna kameror, registrera dessa mot varandra (temporalt och spatialt) och fusionera dessa med hjälp av algoritmer definierade i ett externt bibliotek. För närvarande finns ca 15 olika fusions-algoritmer implementerade, såsom medelvärdesbildning, min, max, multiplikation, division, subtraktion, falskfärgning. Dessutom finns kantöverlagring, där kanter detekterade i ena kanalen överlagras över den andra kanalen som bakgrund. Bildkvalitet hos både indata och utdata kan individuellt justeras och optimeras med olika algoritmer för avbrusning, kantskärpning och kontrastförhöjning. Indata såväl som utdata kan spelas ned på hårddisk från programmet, i ett egendefinierat format som innehåller metadata om bland annat bildtakt och bildformat. Inspelat bilddata kan sedan laddas in och spelas upp igen med hjälp av en inbyggd mediaspelare inuti programmet. Alla inställningar för ett fusionssystem, inklusive inställningar för använda kameror, registrering, fusion och annan bildbehandling kan sparas ned i konfigurationsfiler, för att enkelt och snabbt kunna ladda in och återanvändas vid ett senare tillfälle. Figur 3 och Figur 4 visar ett par skärmbilder från mjukvaran.

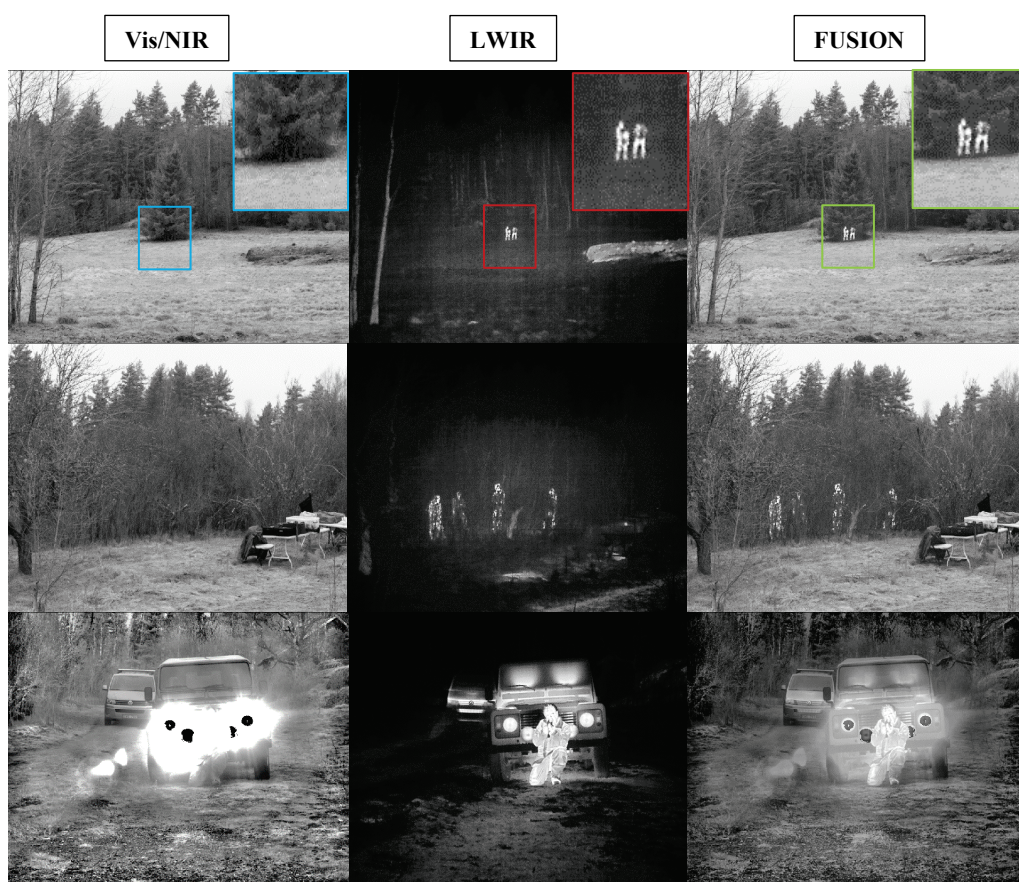


Figur 3. Insamlingsvy från FusionViewer, här med både indata (Channel1 och Channel2) och fusionerad utdata (Fusion). Menyn ovanför bildvyn tillåter ändring av inställningar för vald fusionsmetod, justering av ljusstyrka, kontrast, avbrusning och kantskärpning. Under menyn återfinns kontroller för live-vy och inspelning.



Figur 4. Uppspelningsvy i FusionViewer, med enkel mediaspelare som tillåter kontinuerlig uppspelning samt förflyttning till valfri position i en inspelad sekvens. Bildvyn tillåter även in- och utzoomning av bild till önskat delområde i bilden, antingen med knappar ovanför vyn eller genom att markera ett rektangulärt område med hjälp av en mus.

Figur 5 visar några exempel på bilder insamlade med det uppdaterade fusionssystemet i Kvarn under 2023. Data är insamlat strax efter skymning. Exempelen visar hur bildfusion kan bidra både med en mer effektiv presentation av komplementär information från båda spektralbanden samt med redundans om den ena kanalen störs ut.



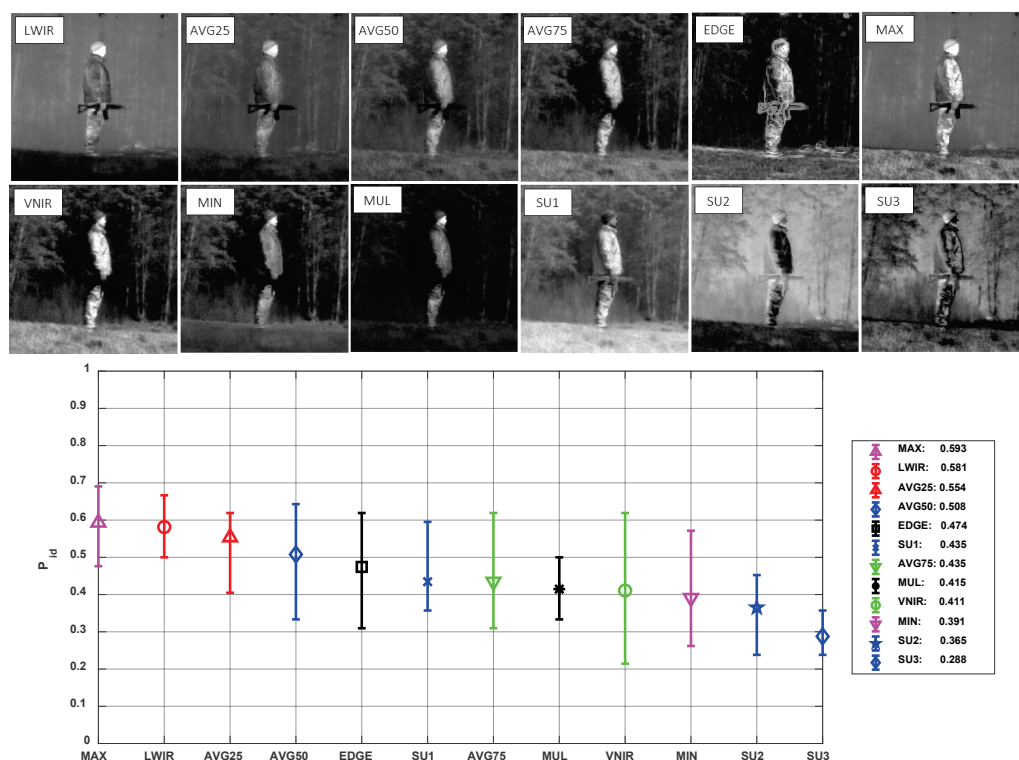
Figur 5. Bildexempel insamlade med fusionssystem vid skymning, med indata från Vis/NIR-kanal i vänster kolumn, indata från LWIR-kanal i mittenkolumn och fusionerade utdata i höger kolumn. Det övre exemplet visar hur varma objekt är lättupptäckta i den termiska IR-kanalen och att detaljerad terrängtextur från Vis/NIR hjälper betraktaren med lokalisering och orientering. Vid fusion (här med max-algoritm) erhålles båda dessa förmågor i en och samma bild. Exemplet i mittenraden visar hur bildfusion (även här med max-algoritm) kan utnyttja kontrastskillnader i olika band för att ge en mer komplett situationsuppfattning, där människor dolda i trädbuskage framträder tydligt i LWIR medan objekt anpassade termiskt till omgivningen (såsom bord, stolar och andra föremål) kan ha hög reflektanskontrast i Vis/NIR. Exemplet i nedre raden visar hur bildfusion (här med medelvärdesbildning) även skapar redundans hos ett system, där bildinformation kan bevaras i områden som är utstörda i den ena kanalen.

3.3 Internationella samarbeten

Under perioden har projektet deltagit i fyra Nato-samarbeten med koppling till mörkerområdet: SET-217, SET-246, SET-305 och SET-325.

Nato-gruppen SET-217 "Assessing and modeling the performance of digital night vision image fusion" pågick under åren 2017-2021. Samarbetet syftade till att utveckla gemensamma verktyg, metoder och metriker för värdering av digitala fusionerade mörkersensorer med fokus på spektralbanden Vis/NIR och LWIR. Gruppen leddes av Fraunhofer IOSB (Tyskland) och hade deltagare från NVESD (USA), DRDC (Kanada), DGA (Frankrike), DSTL (Storbritannien) samt FOI. I slutrapporten [7] fastslås det att värdering av bildfusion är komplext, eftersom resultat ofta är scen- och uppgiftsberoende. Det tycks också vara svårt att hitta objektiva kvalitetsmått som korrelerar bra med resultat från perceptionstester. Problemet skulle behöva analyseras genom tester över ett stort antal scenarion och omgivningsvillkor, vilket är praktiskt svårigenomförbart. En möjlig lösning skulle vara att använda bildsimulering, men detta kräver högre naturtrogenhet hos sensor- och scenmodelleringsverktyg än vad som är tillgängligt idag. Arbetet inom SET-217 har prisats med en SET Panel Excellence Award. Figur 6 visar resultat från insamlingsförsök och mänskliga

perceptionstest genomförda av FOI, där tio fusionsalgoritmer jämfördes med avseende på möjligheten att klassificera handhållna objekt på olika avstånd.



Figur 6. Sannolikhet (medelvärde och spridning) för korrekt objektklassificering över avstånd, för tio testade fusionsalgoritmer samt rena spektralband (rangordnade från bäst till sämst från vänster till höger) [8].

Nato-gruppen SET-246 "Short wave infrared technology: a standardized irradiance measurement and computability model to evaluate reflective band systems" startade under 2017 och avslutades under 2022 [9]. Syftet med gruppen var att ta fram en gemensam metodik att mäta och modellera natthimmelsljus i SWIR-området för att kunna värdera sensorernas mörkerkapacitet. Gruppen leddes av USA och hade deltagare från Tyskland, Holland, Norge, Kanada, Slovenien, Frankrike, Turkiet, Storbritannien och Sverige. En av höjdpunkterna för gruppen var det mörkerförsök som genomfördes i Dugway 2019, där olika koncept för standardiserade mätningar testades och data samlades in. En av de viktigaste slutsatserna från arbetet inom gruppen är att ytterligare insamlingar från fler geografiska platser och tidpunkter behövs för att förstå den stora variationen av ljusnivåer. Gruppen har därför nyligen fått en fortsättning i SET-325 "Shortwave Infrared Technology: Irradiance Measurements to Evaluate Reflective Band Systems", som under 2024-2026 ska skapa ett gemensamt dataset baserat på nationella mätinsamlingar. Data ska samlas in med ett egendesignat mätsystem som består av billiga och kommersiellt tillgängliga komponenter (fotodioder, filter och datalogger) och som enkelt ska kunna byggas och kalibreras enskilt av varje deltagande land.

Projektet har även (tillsammans med Systemstöd Mörker) medfinansierat deltagande i gruppen SET-305 "Improved Field of View for Night Vision Goggles – Technical Challenges, Concepts, Performance Assessment". Gruppen startade 2021 och pågår fram till och med 2024. Gruppen syftar till att studera olika tekniker att åstadkomma bredare synfält hos dagens bildförstärkare (som vanligtvis är begränsade till 40 grader) och har kommit fram till fyra olika koncept som tänkbara för fördjupade experimentella studier:

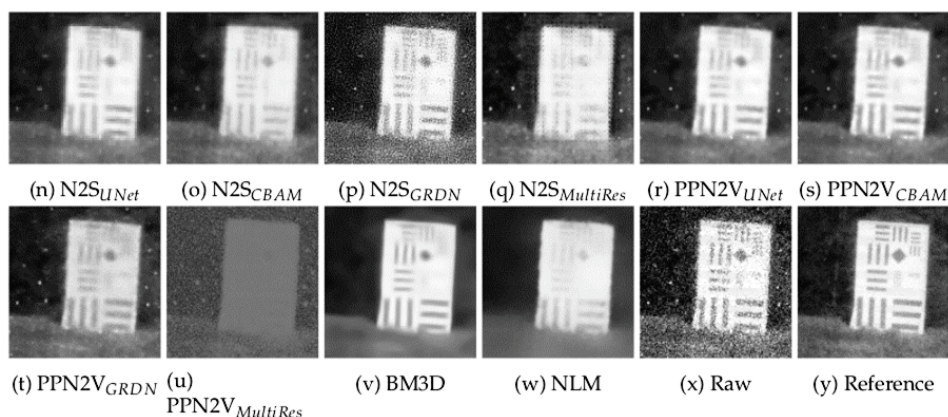
1. En analog vidvinklig NVG och en digital okyld LWIR-kamera fusionerade via friformsprisma inuti okular,
2. En binokulär analog/digital hybrid baserad på vidvinklig ICMOS-teknik (från exempelvis Photonis) kombinerad med en okyld LWIR-kamera,
3. En helt digital lågljussensor baserad på fotonräkande CMOS-teknik (QIS) och termisk IR-kamera, samt
4. Ett system med adaptivt synfält, såsom NVG med snedställda rör med justerbar utvinkling (liknande Panobridge från Noisefighters).

Koncepten kommer att beskrivas i mer detalj i den slutrapport som publiceras 2024.

3.4 Bildförbättring med maskininlärning

Två examensarbeten med inriktning mot mörkerförmåga och djup maskininlärning (eng. deep learning) har genomförts i projektet. Resultaten visar att maskininlärning kan ge metoder för bildförbättring som ger bättre prestanda än konventionell bildbehandling.

I det första arbetet studerades två avbrusningsmetoder baserade på icke-väglett lärande (eng. unsupervised learning), dvs. utan krav på rent och brusfritt träningsdata. De två metoderna var Noise2Self och Noise2Void, som båda tränar upp ett faltande neuralt nätverk för brusreducering. I arbetet testades fyra olika nätverksarkitekturer mot ett dataset där brusfritt data kontaminerats med syntetiskt brus och ett dataset med verkligt brus från insamling med en EBCMOS-kamera i mörkermiljö. De två nätverken som var baserade på U-Net, ett nätverk ursprungligen utvecklat för biomedicinsk bildsegmentering, visade bäst prestanda och var i flera avseenden jämförbara med konventionella och mer beräkningskrävande avbrusningsmetoder så som BM3D (Block-matching and 3D filtering) och NLM (Non-local means). Figur 7 visar bildexempel där metoderna jämförs [10].



Figur 7. Resultat från olika avbrusningsmetoder, med jämförelser mellan learning-baserade Noise2Self (N2S) och Noise2Void (N2V) för olika nätverksarkitekturer (UNet, CBAM, GRDN och MultiRes) samt konventionell avbrusning med BM3D och NLM. Raw är brusigt rådata och Reference är brusfritt bilddata skapat med temporal medelvärdesbildning över ett stort antal bilder [10].

I det andra examensarbetet studerades en icke-vägled metod för bildfusion, baserad på nätverksarkitekturen och fusionsramverket U2Fusion. U2Fusion kan användas för flera olika fusionsproblem så som fusion av bilder från olika modaliteter (våglängdsband), olika exponeringar (kort och lång) och olika fokus (när och fjärr), där ett nätverk tränas upp att bevara särdragsinformation från indata till utdata. I examensarbetet testades även en

utökning av metoden, där särdragsrepresentationer ur ett förtränat nätverk vid namn CLIP (Contrastive Language-Image Pre-Training) användes under träningen. Både U2Fusion och utökningen testades sedan mot ett nyinsamlat dataset med fusionssystemet i både dagsljus och skymning. Resultaten visade att U2Fusion i flertalet fall kunde ge bättre skärpa och kontrast hos mindre detaljer i bilderna än konventionell medelvärdesbildning (se bild-exempel i Figur 8) men att de extra CLIP-representationerna under träning inte gav någon mätbar eller subjektiv förbättring [11].



Figur 8. Jämförelse mellan bilder fusionerade med U2Fusion (vänster) respektive med konventionell medelvärdesbildning (höger). Bilder fusionerade med U2Fusion får något skarpare kanter än motsvarande bilder som är medelvärdesbildade från båda banden [11].

4 Hyperspektral avbildning

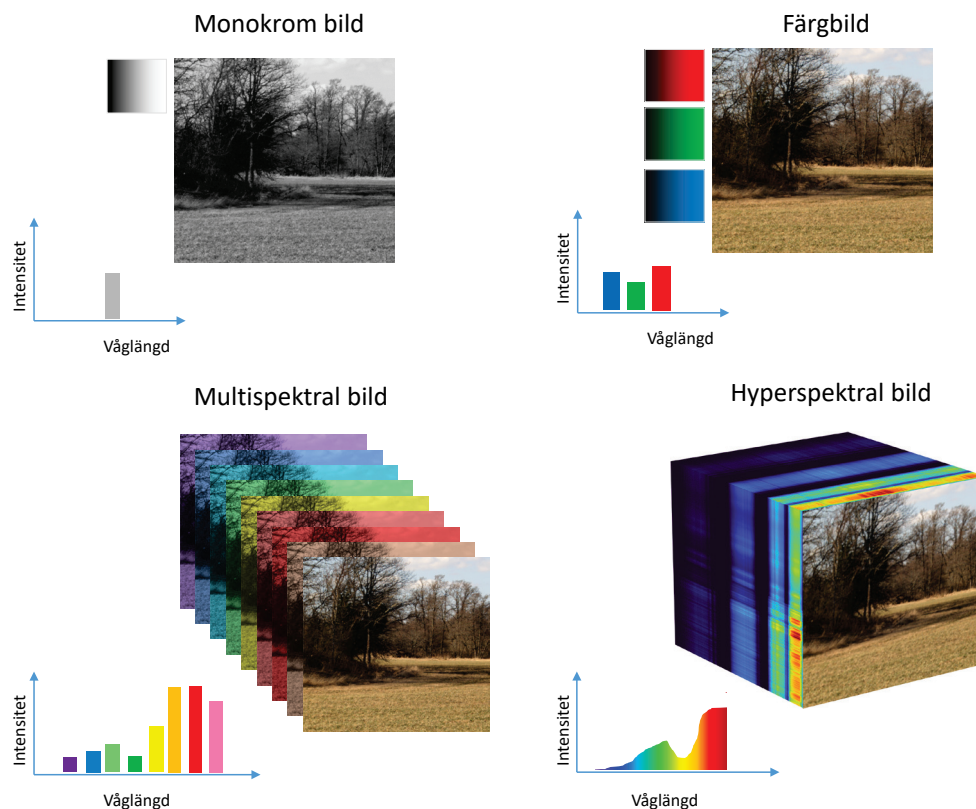
Inom teknikområdet hyperspektral avbildning har arbetet med analysmetoder och visualisering varit generellt inriktat mot flera våglängdsområden och tillämpningar. Området har också haft två mer specifika inriktningar: mätning och analys i SWIR-området och möjligheter med multi- och hyperspektral satellitdata. Arbetet inom spektral analys i satellitdata har varit kopplat till ett Nato-samarbete (SET-313) som projektet bidrar till. Inom det hyperspektrala teknikområdet har också mindre studier kring compressive sensing för hyperspektral analys genomförts. Först ges en teknisk orientering och bakgrund till hyperspektral avbildning och sedan presenteras projektets resultat i kapitel 4.2 - 4.6.

4.1 Teknisk orientering och bakgrund

I en konventionell bredbandig sensor avbildas all strålning som sensorn är känslig för som ett värde per pixel. Resultatet kan representeras som en gråskalebild eller en så kallad *monokrom bild*. Detta gäller för bredbandiga kameror som exempelvis en LWIR-kamera, en SWIR-kamera eller den pankromatiska kanalen i satelliter. I konventionella färgkameror används tre olika ljuskänsliga element på sensorn. Dessa är känsliga för våglängder i rött, grönt och blått. Värdena från dessa interpoleras till tre bilder som ger tre värden i varje pixel i det visuella våglängdsområdet. Intensiteten från varje band kan sedan visas på en bildskärm med tre lysdioder i rött, grönt och blått och vi uppfattar detta som en blandad färg. En digital kamera med tre band är den vanligaste typen av spektral kamera. Att ha färg istället för en svart-vit eller monokrom bild hjälper till att se skillnad på olika saker eller klassificera dem. I det här projektet studeras *multispektrala* och *hyperspektrala* kameror. Jämfört med en färgkamera har dessa fler våglängdsband som man delar upp strålningen i. I en multispektral kamera är våglängdsbanden fler än i en färgkamera och de kan vara både breda och smala. Det är exempelvis vanligt att satelliter har multispektrala sensorer med flera våglängdsband. För en hyperspektral kamera samlas många värden per pixel in i smala tätt liggande våglängdsband. Vi får en *spektral signatur* för den yta som pixeln avbildar med en finare uppdelning av ljuset jämfört med bredbandiga kameror och färgkameror vilket ger fördelar både i det synliga våglängdsområdet och utanför. Figur 9 visar en schematisk översikt av de olika typerna av bilder.

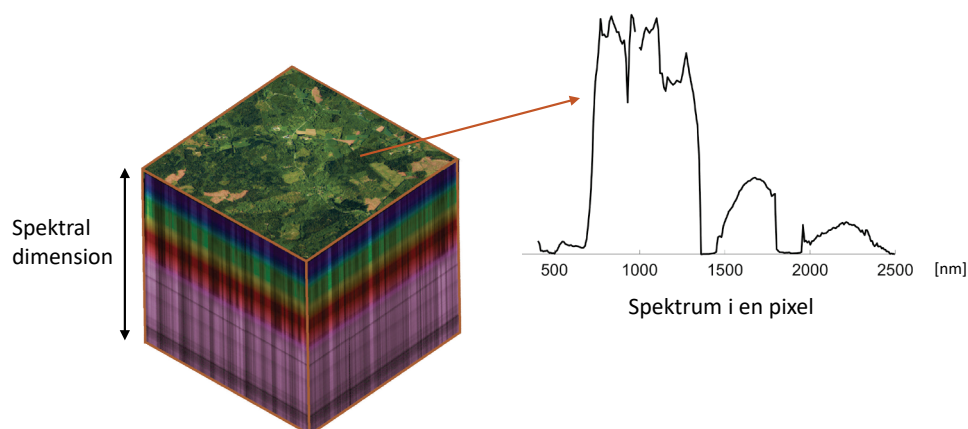
Man kan se spektrala data som en serie av bilder för olika våglängder. Det blir en datakub med två spatiella och en spektral dimension. Varje pixel innehåller ett spektrum med ett värde för varje våglängdsband (se Figur 10). I spektrala data, som färgbilder, multispektrala eller hyperspektrala bilder, kan data analyseras med både spatiella och spektrala egenskaper samtidigt. Ju mer detaljerad den spektrala dimensionen är desto mer kan den spektrala informationen bidra till analysen och detektionsresultatet.

I analys av data från multi- och hyperspektral avbildning drar man nytta av att olika material reflekterar ljus olika mycket för olika våglängder. Detta blir som ett fingeravtryck för materialet. Det kan *klassificeras* baserat på sin spektrala signatur och det blir möjligt att detektera och känna igen olika material och ämnen som plaster, målarfärger, metaller, explosivämnen och stridsgaser. Kamouflage kan avslöjas då det är mycket svårt att tillverka material som helt följer spektrum för naturliga material. Särskilt svårt är det att dölja kamouflage i flera olika våglängdsområden samtidigt. Spektral avbildning kan användas för att *”Se skillnad på en granpixel och en stridsvagnspixel”*. Det är teoretiskt möjligt att klassificera mål baserat på spektrumet i en enda pixel. I verkliga fall kan några pixlar i en grupp krävas för att kunna göra en tillförlitlig detektion.

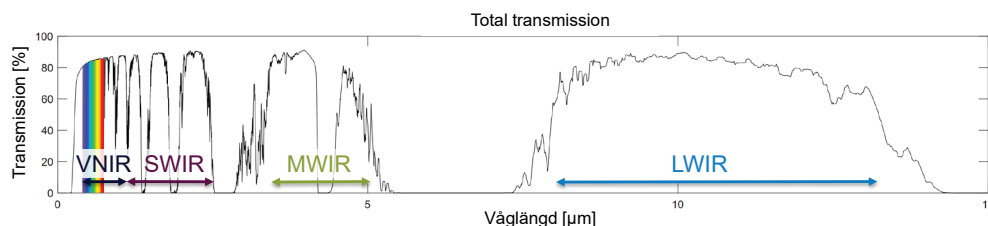


Figur 9. En monokrom bild har ett värde per pixel, en färgbild har tre värden, en multispektral bild har flera värden per pixel för olika våglängdsband som kan vara både breda och smala. En hyperspektral bild har många värden per pixel, ofta hundratals, som samlats in i tätt liggande våglängdsband. Detta blir som ett kontinuerligt spektrum där varje pixel har en *spektral signatur*.

Multi- och hyperspektral avbildning kan göras i hela det optiska våglängdsområdet som omfattar ultraviolett (UV), visuellt samt infrarött (IR). IR kan delas upp vidare i NIR (nära infrarött), SWIR (kortvågs infrarött), MWIR (mellanvågs infrarött) och LWIR (långvågs infrarött). Figur 11 visar en översikt av det optiska våglängdsområdet med olika *optiska fönster* markerade. Strålningen i olika delar av det optiska våglängdsområdet har olika egenskaper som man måste ta hänsyn till när man analyserar data. I det visuella våglängdsområdet samt i NIR och SWIR är strålningen mestadels reflekterad. I MWIR och LWIR är strålningen mestadels emitterad och beror både på materialets eller ämnets temperatur samt materialets specifika spektrum. För att kunna göra vissa analyser måste hänsyn tas till atmosfärens transmission på olika våglängder samt solinstrålningen (belysningen), exempelvis tillförlitlig detektion av kända mål med målbibliotek. Se exempel på resultat i kapitel 4.3.



Figur 10. Data från en hyperspektral kamera kan representeras som en datakub med två spatiella och en spektral dimension. I varje pixel i bilden finns ett spektrum.



Figur 11. Total transmission i atmosfären för olika våglängder. Det finns olika så kallade optiska fönster, där transmissionen inte dämpas helt, där man kan mäta med elektrooptiska sensorsystem. Transmissionsdämpningen i atmosfären beror på molekyler och partiklar som exempelvis vatten, syrgas, koldioxid och aerosoler.

Det finns många olika typer av hyperspektrala kameror. De kan använda olika sätt att dela upp det inkommande ljuset i våglängdsband, exempelvis används filterbaserade, dispersiva och interferometriska tekniker för spektral avbildning.

Tillämpningar för multi- och hyperspektrala sensorer omfattar mark till mark, luft till mark (både för UAV:er och flygplan) samt data från satelliter (Figur 12). Spektral avbildning är ett aktivt forskningsområde inom försvarstillämpningar och flera länder utvärderar eller använder multi- och hyperspektrala sensorer operationellt. Det tydligaste användningsområdet är spaning och övervakning från satellit där det länge har funnits multispektrala sensorer för jordobservation. Nu börjar det också komma kommersiella konstellationer av hyperspektrala satelliter med hög spektral upplösning och en markupplösning som är mindre än ca 8-10 meter.



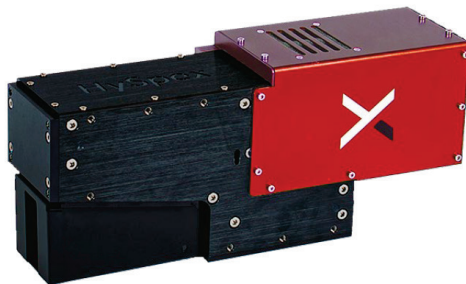
Figur 12. Tillämpningar för hyperspektral avbildning innefattar mark till mark, luft till mark (både för UAV:er och flyg) samt rymdtillämpningar.

4.2 Hyperspektral kamera i SWIR-området

FOI har anskaffat en hyperspektral kamera, av modell HySpex SWIR-640, som är känslig i våglängdsområdet SWIR 960-2500 nm (Figur 13). Sensorn är kyld för att få lågt bakgrundsbrus. Den har 640 pixlar med 360 spektrala kanaler och arbetar med *push-broom-teknik* där de 640 pixlarna tecknar en linje i scenen som vid varje tidpunkt mäts upp med full spektral information. Placerar sensorn på ett stativ tecknar de 640 pixlarna en vertikal linje som man med ett vridbord kan svepa över scenen. Placerar sensorn på en flygande plattform, exempelvis en större UAV eller i en helikopter, kan linjen gå tvärs flygriktningen och plattformens egen förflyttning användas för skanningen. Insamlingen kan göras med 140 fps. Sensorn synfält är 16 grader och vinkelupplösningen för en pixel är ca. 0,44 mrad.

FOI har använt sensorn i forskningen för mätningar mark till mark och exempel på spektrum och bilddata visas bland annat i Figur 14. Tiden det tar att mäta upp en scen beror på integrationstiden och dess inställning beror på ljusmängden i scenen och krav på brusnivå i det insamlade sensordatat. Efter att data samlats in konverteras det från digitalnivåer till den fysikaliska enheten radians (eng. radiance) med hjälp av kalibreringskoefficienter.

För att underlätta analysen av hyperspektrala data från kameran har ett grafiskt gränssnitt utvecklats i projektet där man enkelt kan läsa in bilder på ENVI-format från kameran och göra atmosfärskompensation. Man kan också visualisera data med enskilda band eller med kombinationer av band, plotta spektra för punkter eller regioner i bilden med och utan kompensation samt använda algoritmer för måldetektion med spektrum från målbibliotek eller från bilddata. Gränssnittet har utvecklats i syfte att kunna demonstrera sensortekniken på ett allsidigt sätt.



Figur 13. Sensorn HySpex SWIR-640 är en kylad hyperspektral kamera med 360 band i SWIR-området. Bild från Hypspec. Publicerad med tillstånd.

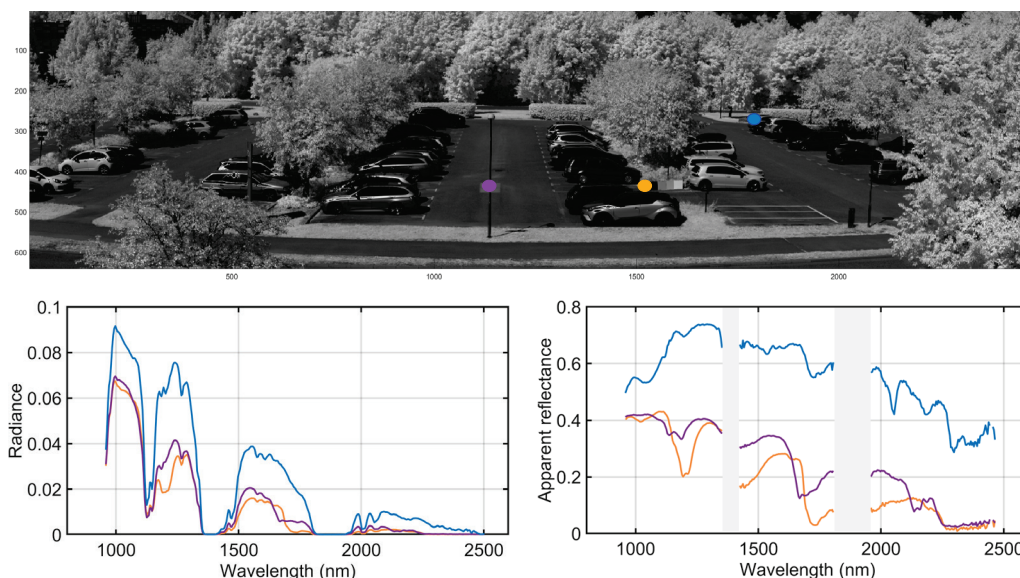
4.3 Analys och visualisering av hyperspektrala data

Hyperspektrala sensorer genererar stora mängder data. Även i de fall det går att direkt analysera bilderna manuellt kan det vara svårt eller uttröttande för en användare på grund av informationskomplexiteten. I andra fall kanske inte informationen som behövs för att detektera mål eller intressanta områden kan visualiseras på ett enkelt sätt. Därför är automatiska analysmetoder för detektion och igenkänning värdefulla. De kan stödja en operatör genom att tillförlitligt och strukturerat peka ut områden med möjliga mål som kan analyseras vidare, antingen manuellt eller automatiskt.

De vanligaste analyserna för spektrala data är:

- Detektion och igenkänning
- Återigenkänning och följning
- Förändringsdetektion
- Anomalidetektion

Vid *detektion och igenkänning* av spektrum används ett målspektrum som fångats in vid ett annat mättillfälle. Det kan komma från en annan sensor, exempelvis en spektrometer, eller från en liknande sensor som mätt upp måltypen vid ett annat tillfälle. Detta spektrum kan sedan läggas in i ett *målbibliotek* som kan användas för att leta efter specifika kända signaturer. Ofta är dessa kända spektra insamlade under andra yttre förhållanden än de som råder vid en ny mätning och för att kunna leta efter kända spektra från ett målbibliotek behövs kompensation av data för belysning och atmosfär, vilket kallas *atmosfärskompensation*. I denna normaliserar man data mot en kombination av belysning och atmosfäreffekter per våglängdsband med kända referensmaterial. Resultatet blir ett *reflektansspektrum* i varje pixel vars utseende endast beror på materialen som avbildas i pixeln. Reflektansspektrum kan sedan jämföras direkt mellan olika bilder insamlade under olika belysning eller mot spektrum i målbibliotek. Figur 14 visar exempel på tre spektrum i våglängdsområdet SWIR före och efter atmosfärskompensation. I exemplet är det tydligt att spektrumen har väldigt olika utseende beroende på om belysningen är normerad eller inte. I SWIR-området minskar solinstrålningen markant när man går från kortare till längre våglängder. Det finns också tre tydliga våglängdsintervall där atmosfären inte dämpar helt.

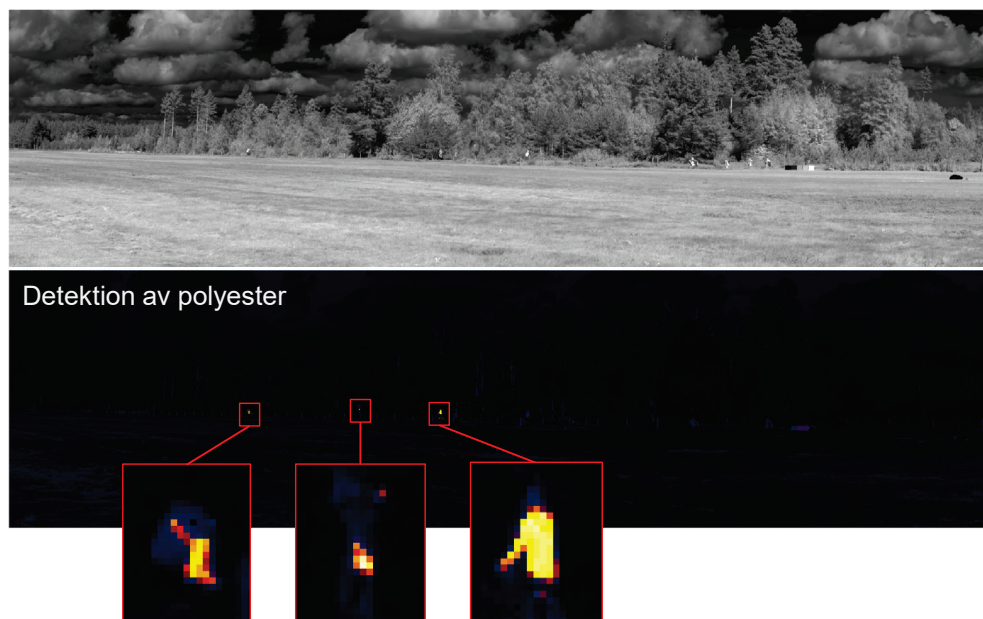


Figur 14. Nere till vänster visas exempel på tre uppmätta spektrum i våglängdsområdet SWIR från scenen i översta bilden. Det är tre olika material i solbelysning. Nere till höger är spektrumen atmosfärskompenserade till skenbar reflektans så att endast den del som beror på materialet i respektive pixel blir kvar.

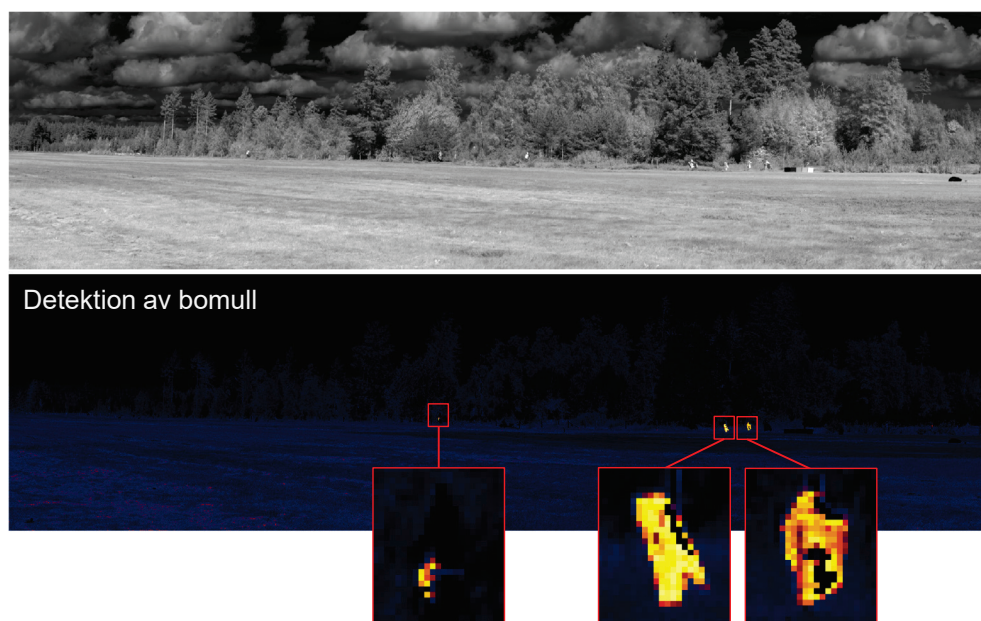
För detektion, igenkänning och även återigenkänning av spektrum används metoder för *spektral matchning*. Det finns olika typer av metoder för detta som mäter likheten mellan ett målspektrum och alla spektra i en bild. I vissa fall använder man hela spektrumet för att mäta likheten och i andra fall kan det finnas utmärkande särdrag i en eller flera delar av spektrumet som man vill fokusera på, då kan man använda endast mindre delar av våglängdsområdet. Det finns även metoder som kan detektera målspektrum där det finns blandningar av olika spektrum, vilket möjliggör detektion av mål som är mindre än en pixel. I Figur 15 och Figur 16 visas några olika exempel på måldetektion med målbibliotek som har utvecklats av FOI i projektet. Överst visas detektion av polyester och nederst detektion av bomull. I första figuren har tre personer polyesterkläder på sig som kan detekteras. I andra figuren har en person en bomullsbyxa på sig och två bomullsplagg är upphängda i scenen. Detektionen görs i reflektans med normerad belysning med en metod som FOI tidigare utvecklat för hyperspektrala data [12].

I Figur 17 visas ett exempel på *återigenkänning*. Genom att markera en pixel eller ett område på ett objekt kan alla pixlar i bilden som är spektralt liknande detekteras med spektral matchning. I exemplet upptäcks fem nya objekt av samma typ. För denna analys krävs inte att bilden är kompenserad för belysning utan det kan göras direkt i uppmätta spektra (i radians). Analysen kan också göras i andra bilder som är insamlade vid ett senare tillfälle om ljusförhållandena inte ändrats för mycket. Metoden kan exempelvis användas av en operatör som analyserar en bild och upptäcker ett mål. Då kan återigenkänning användas för att hitta andra potentiella mål som har ett liknande spektralt utseende utan att man i förväg har lagt in måltypen i ett målbibliotek. Vill man följa ett objekt med ett specifikt spektralt utseende över tid så kan spektral matchning också användas på ett liknande sätt. I de fall belysningen ändras mycket över tid kan man behöva kompensera spektrumet och matcha i normerad belysning. För kortare tider kan man exempelvis låsa på en spektral signatur och följa den.

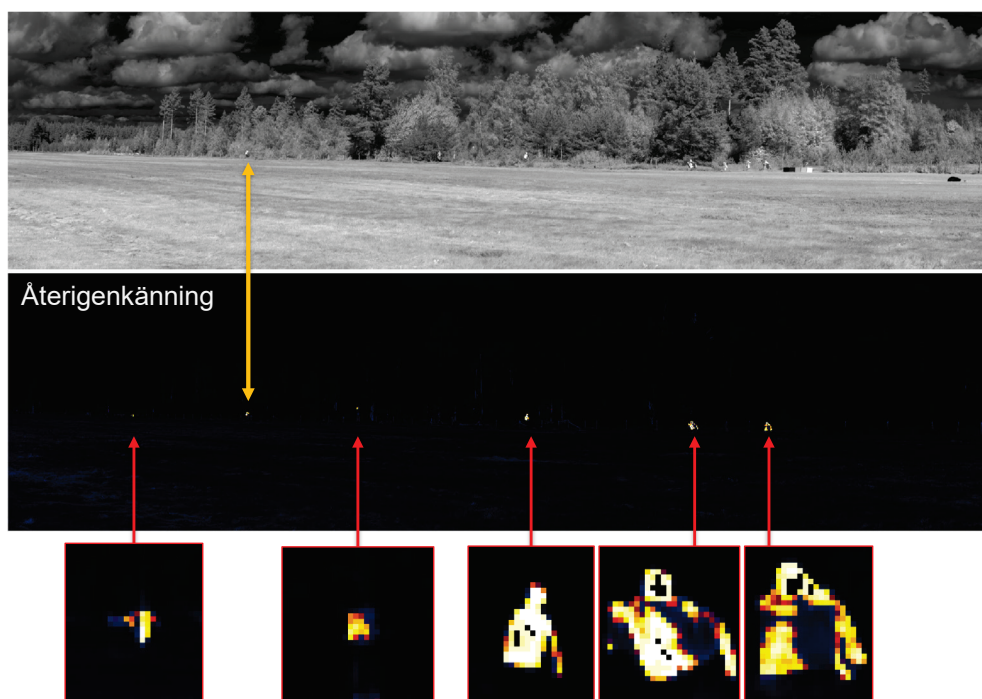
Detektion kan också göras genom att använda olika mått eller index. Ett exempel på ett vanligt mått är NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) som jämför våglängdsband i det synligt röda området med det nära infraröda och ger ett högt värde om det är levande växter som finns i pixeln. I Figur 18 visas en detektion av plastmaterialet polyamid som baseras på skillnaden mellan två våglängdsband i SWIR. Två jackor av materialet dyker upp i detektionen. Det krävs inget målbibliotek eller kompensation för belysning eller atmosfär för att använda dessa typer av mått. Nackdelen är att skillnaden mellan banden inte behöver vara unik utan skulle kunna uppträda även för andra typer av objekt eller material.



Figur 15. Exempel på detektion med spektrum från målbibliotek för polyester. Spektral matchning i normerad belysning och atmosfär mot olika kända material som mätts upp vid ett tidigare tillfälle. Översta panelen visar en pankromatisk SWIR-bild över scenen.



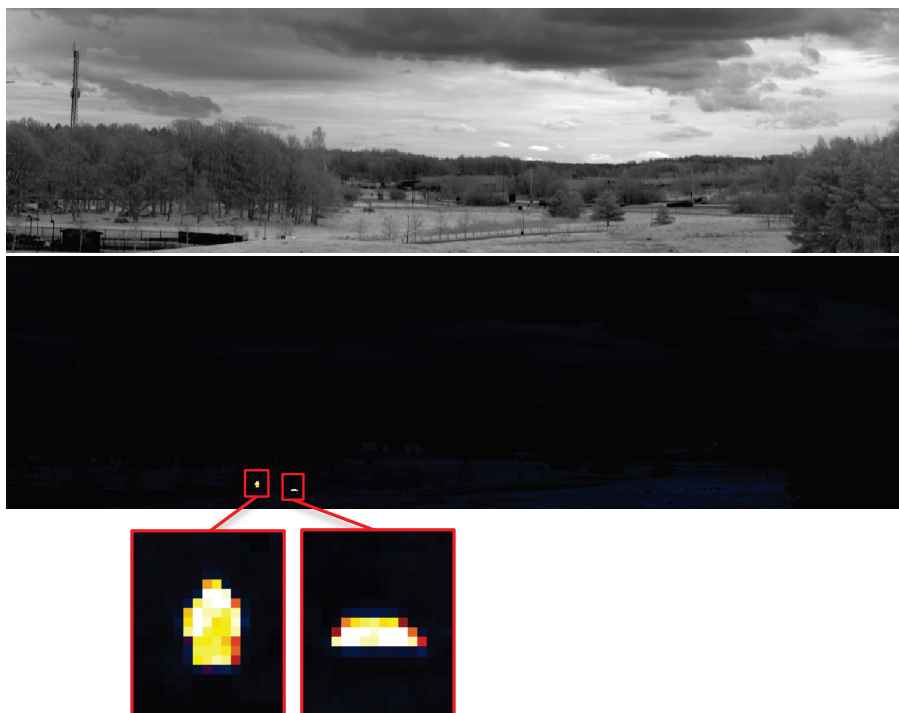
Figur 16. Exempel på detektion med spektrum från målbibliotek för bomull. Spektral matchning i normerad belysning och atmosfär mot olika kända material som mätts upp vid ett tidigare tillfälle. Översta panelen visar en pankromatisk SWIR-bild över scenen.



Figur 17. Exempel på återigenkänning med spektral matchning direkt i uppmätta data utan atmosfärs-kompensation. En operatör markerar ett intressant objekt i bilden (gul pil). Alla pixlar i bilden som liknar detta objekt spektralt kan detekteras. Översta panelen visar en pankromatisk SWIR-bild över scenen.

Förändringsdetektion görs genom att analysera skillnader i data mellan två tidpunkter. En förutsättning för förändringsdetektion är att data från två eller flera tidpunkter kan läggas samman i ett gemensamt koordinatsystem så att samma del av scenen kan jämföras, antingen pixel för pixel eller i små omgivningar. Förändringsdetektion är en kraftfull metod som gör det möjligt att avslöja mål baserat på att ett område inte ser ut som tidigare. Denna typ av metod kan göra det svårare att kamouflera sig eftersom kamouflaget måste se ut exakt som området såg ut tidigare för att undgå upptäckt. Svårigheten med förändringsdetektion är att data från olika tidpunkter ska kombineras. För sensorer som inte är fast monterade eller erbjuder noggrann positionering kan fel i inpassningen till ett gemensamt koordinatsystem störa analysen.

I *anomalidetektion* görs detektion mot en modell av hur något, exempelvis en typ av terräng, brukar se ut spektralt. En pixel klassificeras som en anomali om den avviker från modellen. Det finns olika sätt att göra en modell. Man kan använda tekniker baserade på bara en bild och jämföra varje pixel med en annan del av bilden i närheten för att se om någon pixel avviker spektralt. Det finns också tekniker där man gör en modell av ett typiskt utseende för data från en eller flera tidigare bilder som man sedan jämför med en helt ny bild eller datasekvens för att se om något avviker mot hur det brukar se ut. FOI har tidigare utvärderat en djupinlärningsteknik för anomalidetektion i hyperspektrala data i LWIR [13]. Ett annat sätt att göra anomalidetektion är att skapa en modell av bakgrunden med en metod baserad på spektral matchning. Sedan kan man använda negativ kontrast för att detektera områden som inte passar in i den modellen. I Figur 19 visas en detektion av fordon vid ett skogsbryn som detekterats som en anomali mot vegetation.



Figur 18. Detektion baserat på skillnaden mellan två vågängdsband i SWIR. Här framträder tydligt materialet polyamid i två olika jackor i scenen. Översta panelen visar en pankromatisk SWIR-bild av scenen.



Figur 19. Anomalidetektion i SWIR baserat på en bakgrundsmodell. Detektionen görs med spektral matchning med en modell av en skogsbakgrund. Översta panelen visar en pankromatisk SWIR-bild av scenen.

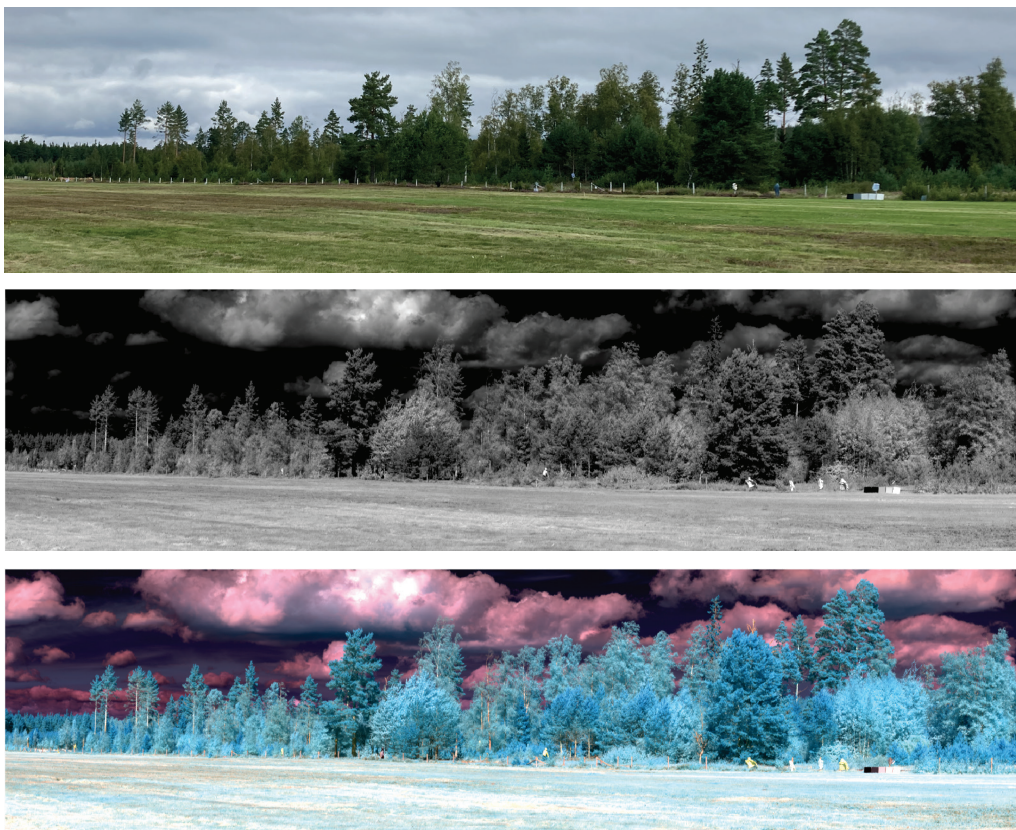
I de fall enstaka band innehåller information som kan analyseras direkt kan visualisering av hyperspektrala data göras. Visualisering är också intressant för kvalitetskontroll och översikt av insamlat data. Det går att visualisera hyperspektrala data på många olika sätt. Ett sätt är att titta på alla våglängdsband samtidigt som en gråskalebild där varje pixel är summan eller medelvärdet av alla våglängdsband tillsammans. Detta motsvarar då hur data insamlat med en bredbandig sensor med samma våglängdsband skulle se ut. Figur 20 (överst) visar ett exempel på detta för en hyperspektral SWIR-bild för en skogsriddå med olika utplacerade objekt.

Det går också att visualisera data som en färgbild. Exempelvis kan tre enskilda våglängdsband visualiseras genom att lägga in dem i de tre färgkanalerna röd, grön och blå. Då kan objekt i scenen framträda bättre jämfört med den bredbandiga bilden. En färgbild kan bara visa en begränsad mängd information som finns i hela den hyperspektrala kuben. Det kan vara tillräckligt för att göra en analys, särskilt om man har optimerat vilka band som kombineras i visualiseringen. Exempelvis kan metoden användas för att utvärdera mätningar eller för manuell detektion av objekt. Visualisering av kombinationer eller delsummeringar av band som får objekt av en viss typ att framträda på ett bra sätt kan också användas vid manuell analys. Utöver att visualisera datat i kuben direkt kan man förstås visualisera olika analysresultat på samma sätt för att göra manuell verifiering.

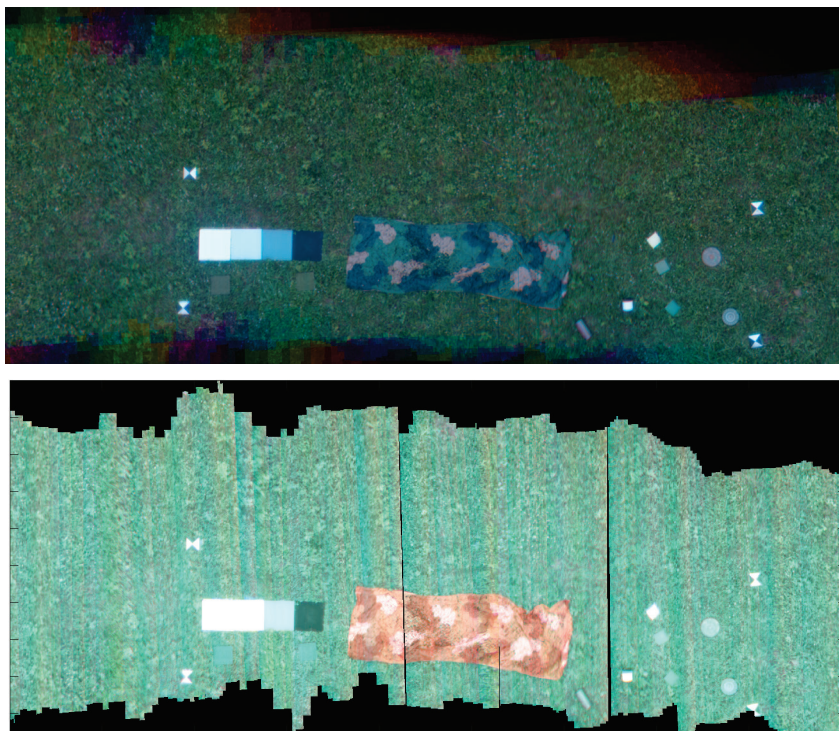
Figur 20 (mitten och nederst) visar två olika exempel på visualisering av tre enskilda band som en färgbild. Här framträder många objekt i scenen bättre än i den bredbandiga bilden (Figur 20, överst). Figur 21 visar ett ytterligare exempel. Figur 22 visar ett annat exempel med en hyperspektral VNIR-bild. Överst visas ett exempel på hur en människa skulle uppfatta scenen. Där kommer informationen som lagts i varje färgkanal från de respektive våglängder som ögat är känslig för. Underst visas ett exempel från samma datakub där informationen från det nära-infraröda våglängdsområdet lagts i den röda färgkanalen. Då framträder tydligt ett kamouflagenät med bristande spektral anpassning mot den omgivande marken. Det är grönt och brunt i det visuella våglängdsområdet, men avviker kraftigt från markens spektrala signatur i det nära-infraröda området, så det räcker med ett fåtal band för att kunna detektera nätet manuellt eller automatiskt.



Figur 20. Visualisering av hyperspektrala data. Ett exempel från hyperspektral SWIR-kamera. Överst ett exempel där alla band summerats, som motsvarar hur en bredbandig kamera skulle avbilda scenen. Mitten och nederst visas två olika exempel där tre band plockats ut och visas som en färgbild.



Figur 21. Visualisering av hyperspektrala data. Ett exempel från hyperspektral SWIR-kamera. Överst visas ett fotografi av scenen. I mitten en summering av alla våglängdsband som motsvarar hur en bredbands kamera skulle avbilda scenen. Nederst en visualisering av tre band som en färgbild.



Figur 22. Visualisering av hyperspektrala data. Ett exempel från en hyperspektral VNIR-kamera. Överst visas en bild i naturliga färger som satts samman till en bild så som den skulle uppfattats om en människa tittade på scenen. Nederst visas en visualisering av tre band som en färgbild där information från NIR-området lagts i den röda kanalen. Här framträder ett dåligt anpassat kamouflagenät.

I projektet har två examensarbeten genomförts på hyperspektrala data. Det ena fokuserade på en ny rekonstruktionsteknik av data från FOI:s hyperspektrala kamera med linjärt variabelt filter [14]. Metoden för rekonstruktionen baseras på en superupplösningsmetod för att öka den spatiala upplösningen. I arbetet används också en interpolationsmetod som baseras på splines för att interpolera spektrala data. Slutsatsen som dras i rapporten är att båda de undersökta metoderna kräver vidare utredning.

Det andra examensarbetet har utvärderat en djupinlärningsteknik på simulerade data som baseras på kontrastiv inlärning för självövervakad inlärning (eng. self-supervised learning) [15]. Vid självövervakad inlärning försöker man undvika de problem som finns med att samla in och markera stora mängder data med förväntat klassificeringsresultat. I examensarbetet jämfördes en metod som kombinerar självövervakad inlärning i ett första steg med övervakad inlärning av en specifik uppgift som ett andra steg med en metod som enbart använder det andra steget. I den självövervakade inlärningen användes par av samma bild och par av olika bilder som ändrats på olika sätt. Nätverkets uppgift var då att maximera överensstämmelsen mellan bildparen. I den övervakade inlärningen var den specifika uppgiften pixelvis klassificering av olika material i bilden baserat på spektrum. Detta gjordes på ett mindre dataset som markerats med förväntat klassificeringsresultat. Resultatet visade att klassificeringen inte blev bättre med självövervakad inlärning som ett första steg på de simulerade data som användes. Vidare arbete behövs för att undersöka om självövervakad inlärning kan vara till nytta och hur det kan användas på hyperspektrala data.

4.4 Internationella samarbeten

I projektet har FOI deltagit i ett Nato-samarbete inom hyperspektral satellitdata. Nato-gruppen SET-313 "Advanced Methods for Hyperspectral Data Exploitation" startade i Juni 2022 och kommer att avslutas 2026. Huvudinriktningar för gruppen är användning och utvärdering av kommersiella hyperspektrala satellitdata för militär nytta, avancerade maskininlärningsbaserade metoder och fusion av HSI-data med andra datakällor för förbättrad detektion eller igenkänning. Under samarbetet planeras mätningar med olika kommersiella hyperspektrala satelliter mot markmål och sjömål. Samarbetet föregicks av Nato-gruppen SET-240 "Exploitation methodologies for longwave infrared airborne hyperspectral data" som avslutades 2019. Resultat från detta samarbete har även använts i nuvarande arbete i projektet.

4.5 Multi- och hyperspektrala data från rymdbaserade sensorer

Under 2022 gjordes en genomgång av möjligheter med spaning och övervakning från rymden (SÖR) för multi- och hyperspektrala sensordata. Arbetet sammanfattas i ett memo [16]. Slutsatsen i memot är att multi- och hyperspektral avbildning bidrar med nya dimensioner i data som kan komplettera de från bredbandiga sensorer eller radar. Metoder för exempelvis spektral måldetektion, återigenkänning, anomalidetektion, förändringsdetektion eller markklassificering erbjuder kraftfulla verktyg för SÖR. För de fall där man har möjlighet att mäta återkommande är förändringsdetektion ett särskilt intressant verktyg för att avslöja exempelvis kamouflage eller trupprörelser.

Det finns idag många multispektrala satelliter i rymden som möjliggör vissa typer av spektral analys. Även hyperspektrala data från rymden blir mer tillgängliga då flera företag planerar eller håller på att skicka upp satellitkonstellationer som ska kunna täcka in planeten med flera hundra våglängdsband och högre markupplösning än tidigare, runt 8-10 m GSD (Ground Sampling Distance) i nuläget. Det kommer att bli möjligt att få data från en plats med återkommande mätningar flera gånger i veckan eller ner till enstaka dagar. Detta möjliggör kontinuerlig spektralt högupplöst spaning och övervakning.

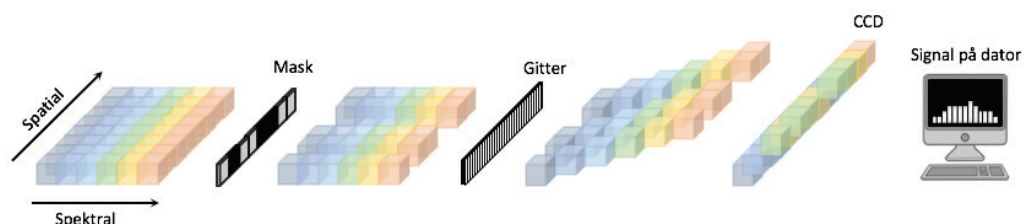
4.6 Compressive sensing

Många hyperspektrala sensorer bygger upp sin datakub genom att skanna av scenen, antingen spatialt eller spektralt, vilket gör att insamlingstiderna kan bli långa. Lång insamlingstid kan vara en begränsande faktor för vissa tillämpningar. En hyperspektral datakub inte är möjlig att samla in som en ögonblicksbild, med så kallad snapshotteknik. För hyperspektrala snapshotsensorer krävs därför att man gör en avvägning mellan insamling av spektral och spatial upplösning. För att komma runt delar av den avvägningen kan man använda tekniker för compressive sensing (CS) där man kan minska mängden insamlad data och därmed även förkorta insamlingstiden [17]. Istället krävs efterbehandling där man rekonstruerar data.

Inom projektet har CS-baserad sensorteknik med känslighet inom det visuella våglängdsområdet utvärderats. Existerande rekonstruktionsmetoder för CS för beräknings- och minneseffektiv rekonstruktion har studerats och vidareutvecklats. Metoder baserade på glesa matrisrepresentationer med parallelliserad exekvering på grafikkort (GPU) har implementerats och utvärderats med lovande resultat. Vidare har även maskininlärningsbaserade metoder för rekonstruktion av hyperspektralkuber utvärderats på simulerade data i ett examensarbete [18].

4.6.1 Coded Aperture Snapshot Spectral Imaging

Ett snapshot-baserat CS-system för hyperspektral data som bygger på Coded Aperture Snapshot Spectral Imaging (CASSI) [19], se Figur 23, har utvärderats. CS-systemet bygger på att spatial och spektral information blandas på ett känt och kontrollerat sätt varefter dessa blandande CS-mätningar används för rekonstruera ursprunglig hyperspektral information i form av en hyperspektral kub.



Figur 23. Principskiss för hur ett CASSI-system fungerar. Inkommande spektrum passerar en mask där vissa spatiala positioner maskas ut innan de passerar ett dispersivt element (gitter eller prisma). Det dispersiva elementet delar upp spektrumet i våglängder som projiceras på en CCD-detektor. CCD mäter en blandning av spektral och spatial information. En uppsättning av sådana mätningar används för rekonstruktion av den spektrala informationen.

Det CASSI-system som designats i projektet arbetar i det visuella våglängdsområdet och består av tre huvudkomponenter: kodad apertur, dispersivt element och 2D-sensor (fokal-plansmatris). Utöver dessa komponenter ingår flera kameraobjektiv för fokusering. Den kodade aperturen utgörs av en glasskiva med ett rutmönster där vissa rutor är svartmålade för att blockera inkommande ljus på dessa positioner. Mönstret varieras genom att glasskivan förskjuts med en stegmotor så att nya mönster blockerar inkommande ljus. Förskjutningen måste ske med hög precision då mönstret som används vid insamlings-tillfället används vid återskapande av den hyperspektrala kuben.

Genom att använda en kodad apertur, så kallad mask, modulerar CASSI-systemet inkommande ljus i ett fördefinierat mönster vilket, när det kombineras med ett dispersivt element (exempelvis en prisma eller gitter), möjliggör samtidig insamling av rumslig och spektral information i en enda ögonblicksbild som fångas av en tvådimensionell bildsensor. Insamlingstiden är kort jämfört med traditionella metoder, men för att resultatet ska mynna ut i en hyperspektral kub måste informationen rekonstrueras med hjälp av en rekonstruktionsalgoritm. Beroende på spatial och spektral upplösning kan rekonstruktions-tiden vara lång.

De främsta fördelarna med CASSI-system är:

- Kort insamlingstid gör det möjligt att observera mer dynamiska fenomen, vilket är svårt med många andra hyperpektrala system.
- Potentiellt relativt kompakt systemdesign och lätthanterat system.
- Minskning av datavolym på grund av den inneboende datakomprimeringen med CS, vilket underlättar lagring och överföring.

4.6.2 Rekonstruktionsmetoder

Ett hinder för införande av snapshotmetoder såsom CASSI-system inom många tillämpningar är den tids- och minneskrävande rekonstruktion av hyperspektral data från en uppsättning CS-mätningar. Rekonstruktionstiden för en hyperspektral datakub beror framför allt på den spatiala och spektral upplösningen. Med frekvent förekommande rekonstruktionsmetoder är rekonstruktionstiden även för en kub med relativt låg spatial och spektral upplösning tiotals minuter. Rekonstruktionsmetoderna är dessutom ytterst minneskrävande då maskerna som används vid insamlingen och den hyperspektrala kuben måste finnas i minnet under rekonstruktionen. Minnes- och beräkningseffektiva rekonstruktionsmetoder är en förutsättning för införande av snapshottekniken i flera tillämpningar. Inom projektet har existerande metoder vidareutvecklats och nya metoder, baserade på maskininlärning, tagits fram för effektiv rekonstruktion. Utvärdering har primärt gjorts på simulerad data.

Beräkningseffektiv rekonstruktion från CS-mätningar görs med matrisrepresentation. Matrisformulering leder till en mycket stor men också ytterst gles matris där elementen som är skilda från noll ofta är färre än en procent. Dessa stora glesa matriser leder dels till ett ineffektivt utnyttjande av minnet, nästan bara nollor i matrisen, och dels är en övervägande del av de matrismultiplikationer som krävs med nollor. För glesa matriser finns etablerade representationer där minnet används på ett effektivare sätt och matrisoperationer på dessa representationer som är avsevärt effektivare än de vanliga operationerna. Med så glesa matriser, mindre än en procent som är skilda från noll, som används för CASSI är vinsten mycket stor. Vidare kan operationer på matriser för ett CASSI-system parallelliseras på ett effektivt sätt vilket öppnar för ytterligare tidseffektivisering. För att utnyttja detta har matrisoperationerna implementerats på grafikkort med många parallella beräkningsenheter.

Allt sammantaget har arbetet resulterat i en reducering av beräkningstiden för rekonstruktion av en hyperspektral datakub från system baserat på CASSI med en faktor 25, dvs. från tiotals minuter till sekunder-minuter/del av minut.

Rekonstruktion av hyperspektralkuber kan formuleras som ett maskininlärningsproblem där målsättningen är att utifrån en uppsättning CS-mätningar använda maskininlärning för rekonstruktion av en hyperspektralkub. Målsättningen med ansatsen är primärt att snabba upp rekonstruktionen för att uppnå realtidsprestanda utan försämring av rekonstruktionskvaliteten. Den maskininlärningsbaserade rekonstruktionsmetod som har utvecklats i projektet är tränad och utvärderad på simulerad data i ett projektöverskridande examensarbete [18]. Rekonstruktionskvaliteten med maskininlärningsbaserade metoderna är i paritet med forskningsfronten på simulerad data samtidigt som rekonstruktionstiden har minskat från tiotals minuter till några få sekunder. Generalisering av resultaten som är baserade på simulerad data till ett verkligt CASSI-system är dock komplicerat och kräver vidare forskning.

5 Polarimetrisk avbildning

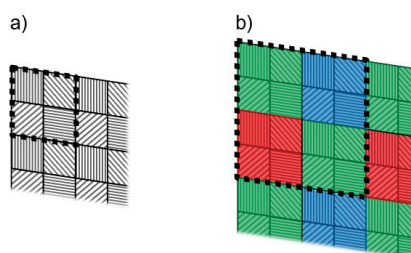
Optisk strålning kan karakteriseras av intensitet, våglängd och polarisation. De två förstnämnda utnyttjas i multi- eller hyperspektral optisk avbildning. Polarisationskänsliga sensorer kan ge kompletterande information om ytstruktur och geometri. Avsnittet inleds med en kort orientering och sedan presenteras resultat från arbetet inom projektet.

5.1 Teknisk orientering och bakgrund

Polarimetriska sensorer utnyttjar den information om målobjekt som tecknas i oscillationsriktningen, polarisationen, hos strålningsfältet. Det finns olika typer av polarisation, linjär, cirkulär och den generella, elliptiska, vilket är en blandning. Naturligt dominerar linjärpolarisation och sensorer för polarimetrisk avbildning registrerar ofta endast denna. I allt arbete som presenteras här avses linjärpolarisation även om det inte explicit anges.

Strålningens polarisationstillstånd kan ändras på olika sätt, exempelvis genom spridning, reflektion och brytning samt även vid termisk emission. Oscillationsriktningen (*eng.* angle of polarization, AoP) och till vilken grad strålningen är polariserad (*eng.* degree of linear polarization, DoLP) innehåller information om ytstruktur och geometri på målobjektet som är osynlig för motsvarande icke-polarimetriska sensorer. Mål varifrån strålningen är helt opolariserad, eller egentligen slumpmässigt polariserad, uppfattas lika av polarimetriska och konventionella sensorer.

Arbetet inom polarimetrisk avbildning har primärt fokuserat på två våglängdsband; visuella respektive LWIR. Sensorer med förmåga att momentant avbilda polarimetriskt finns tillgängliga i båda banden. Tekniken som utnyttjas är division of focal plane (DoFP) med polarisationsfilter på pixelnivå, se Figur 24a.



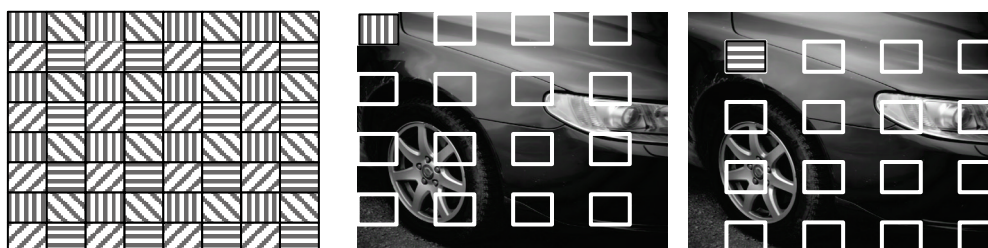
Figur 24. Pixellerade polarisationsfilter för momentan avbildning med DoFP. Streckad kvadrat i a) visar en supercell bestående av 2x2 pixlar med olika polarisationsfilter. I b) kombineras detta med RGB-färgfilter till en supercell bestående av 4x4 pixlar för kombinerad polarimetrisk och spektral avbildning. Supercellen repeteras över hela sensorn.

Visuella kameror baserade på 5 eller 12 MP sensorer med hög polarimetrisk utsläckning finns i dagsläget tillgängliga på bred front till relativt låga priser från flera olika tillverkare. Termiska polarimetriska kameror finns även från kommersiella aktörer men är betydligt dyrare och bland svårare att komma över på exportrestriktioner. Ur projektets perspektiv är det tillgängligheten hos de visuella kamerorna gör dem intressanta att studera. Tröskeln att lansera operativa system med tekniken är relativt liten. Termiska IR-system å sin sida är intressanta på grund av sin dag/natt-kapacitet men lider i många tillämpningar av klotter och svårighet att användas för identifikation och igenkänning.

Polarimetriska domänen har potential att ge bättre möjligheter att särskilja mål och bakgrund eller identifiera mål med hjälp av information om geometrisk struktur. Nackdelar med de tekniska lösningar som finns nu är försämrad upplösning, relativt ursprungsbilden, oskärpa samt artefakter. Projektet även har genomfört inledande försök med att kombinera polarimetrisk och spektral avbildning. FOI har undersökt en kommersiell spektropolarimetrisk kamera som bygger på Sonys visuella sensor med kombinerade polarisations- och tre färgfilter (RGB), se Figur 24b.

5.2 Sensorer för momentan polarimetrisk avbildning

Sensorer som utnyttjar DoFP med pixellerat filter ger möjlighet till momentan avbildning men ger också en undersampling och felregistrering av scenen, se Figur 25. För att ta fram polarimetriska egenskaper behövs information från flera pixlar och i princip krävs att ett område på 2x2 pixlar mäter samma yta. Det innebär lägre effektiv upplösning. Med matematiska rekonstruktionsmetoder, se avsnitt 5.2.1, kan man ofta återskapa ursprunglig upplösning för polarimetriska bilder med bra bildkvalitet. Skarpa kanter eller icke upplösta mål, s.k. punktmål, i bilden är en utmaning då dessa med bra optik kan avbildas på en yta bara något större än en pixel. Här är det omöjligt att utan ytterligare information återskapa full upplösning och de polarimetriska egenskaperna. För att mäta i sådana fall behöver antingen optiken defokuseras så målet tecknas på flera pixlar, se avsnitt 5.2.2, eller så behöver scenen samplas flera gånger med små skift så att alla delar av scenen tecknas på pixlar med olika filter, se avsnitt 5.2.3.



Figur 25. Undersampling och registreringsfel med DoFP-sensorer. En detektormatris med pixellerade polarisationsfilter visas till vänster. I mitten och till höger exemplifieras undersampling då vertikala respektive horisontella pixlar (vita rutor) glesa bilder av scenen. Vidare illustreras det registreringsfel som uppstår då de olika pixeltyperna mäter på olika delar av scenen.

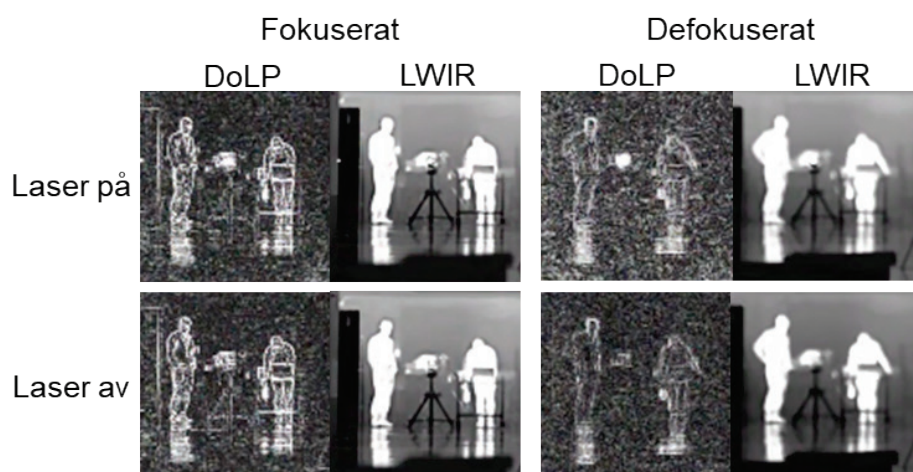
DoFP-tekniken har öppnat för inspelningar i rörliga miljöer och från rörliga plattformar. Mjukvara för inspelning och visualisering som implementerar flera av de bildförbättrande metoder som beskrivs nedan visas i avsnitt 5.2.4.

5.2.1 Matematisk bildrekonstruktion

En rekonstruktion av bilden kan hantera registreringsfelet då olika pixlar mäter olika delar av scenen, se Figur 24. Det finns olika matematiska metoder för att om möjligt återskapa saknad information, och i fall där det inte är möjligt minimera artefakter som vid rekonstruktionen. Mer beräkningseffektiva metoder bygger ofta på utsmetning och interpolation, där man offrar upplösning för att dölja artefakter [20]. Mer raffinerade metoder kan beakta kanter i bilden och anpassa interpolationen [21]. Andra, ofta betydligt mer beräkningstunga metoder, försöker fylla i med syntetisk data [22].

5.2.2 Lågpassfiltrering genom defokusering

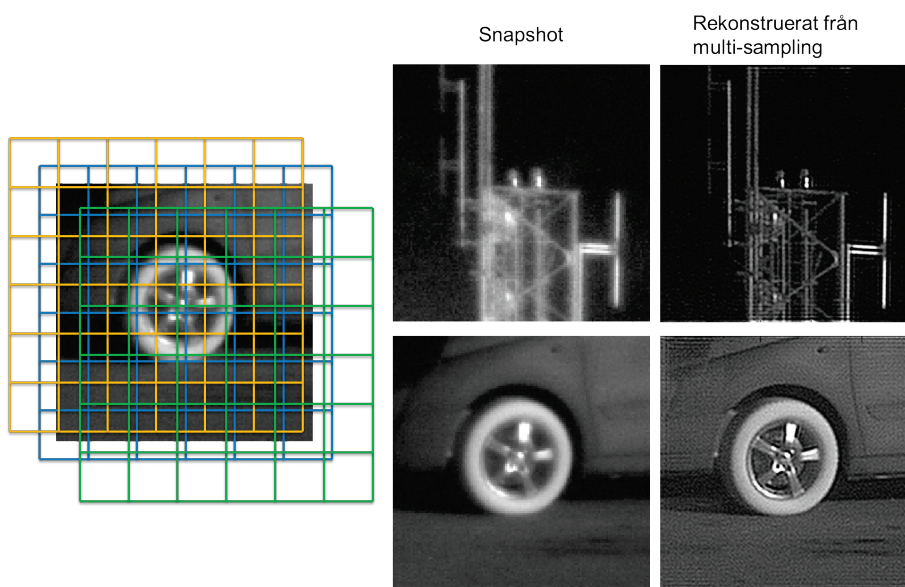
Matematisk rekonstruktion kan i många fall ge en synbart förbättrad bild genom att på olika sätt dämpa områden där registreringsfel och undersampling ger artefakter. Det går dock inte att beräkna polarimetriska egenskaper från exempelvis ett punktmål på grund av gles sampling. Problemet kan hanteras genom att defokusera optiken vilket innebär en lågpassfiltrering innan sampling på sensormatrisen, se exempel i Figur 26. Det kan dock vara svårt att defokusera lagom mycket och metoden lämpar sig mer för starka källor då utsmetningen sänker målkontrasten.



Figur 26. Exempel på polarimetrisk mätning i LWIR mot en punktkälla. Laseremittern på stativet mellan personerna i bilden är liten, ett punktmål, och är starkt polariserad. Med defokuserad optik framträder emittern tydligare i DoLP-bilden jämfört med när optiken är fokuserad. Nackdelen är att detaljer i bilden smetas ut.

5.2.3 Multipel sampling

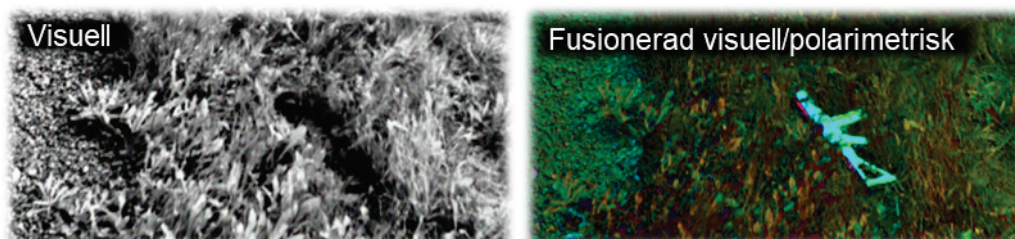
Ytterligare en metod för att förbättra bildkvaliteten är s.k. micro-stepping kombinerat med multipla exponeringar. Inom vissa tillämpningar, exempelvis astronomi, förekommer sensorer med translationssteg som kontrollerat kan flyttas delar av en pixel i sidled. Syftet är att öka upplösningen genom att översampla och sedan skärpa upp. Mjukvarubaserade bildregistreringsmetoder som utnyttjar små slumpmässiga rörelser, exempelvis handskak eller vibration från en kylmotor, finns också [23]. I Figur 27 visas exempel på data från en kyld MWIR-kamera. Metoden ger synbart bättre upplösning på rekonstruerade bilder jämfört med snapshot från sensorn, men arbete återstår för att anpassa tekniken till bilddata från polarimetriska DoLP-sensorer.



Figur 27. Multi-sampling där ett antal exponeringar med små skift sinsemellan, illustrerat till vänster av blått, grönt och gult pixelgrid, kombineras för att skapa en högupplöst rekonstruktion. Till höger: Två inzoomade exempel från en konventionell kyld MWIR-kamera. Snapshot (enskilda bilder direkt från kameran) och motsvarande rekonstruktioner där slumpmässiga kameravibrationer och 10-30 snapshot utnyttjats. Resultatet är bättre vinkelupplösning, men längre insamlingstid.

5.2.4 Mjukvara för inspelning och visualisering

Mjukvara för inspelning och visualisering av data från polarimetriska sensorer har tagits fram i syfte att underlätta datainsamling, fältprov och demonstrationer. Funktioner för fjärrstyrning via exempelvis UAV finns implementerade. Olika rekonstruktions- och beräkningsalgoritmer kan användas men för visning i realtid behöver beräkningstiden för visualiseringen beaktas. För visualisering av information från de polarimetriska sensorerna har en fusionsmetod som kombinerar den konventionella bilden, DoLP och AoP givit goda resultat i många fall. Genom färgläggning av områden i bilden där polarisationen ändras långsamt kan anomalier förstärkas. Naturlig bakgrund, exempelvis gräs eller träd, uppvisar en mer högfrekvent variation av polarimetriska egenskaper och kan tonas ner, se Figur 28. Idag finns inga funktioner för automatisk detektion implementerade utan visualiseringsmoderna fungerar som stöd för en mänsklig operatör.



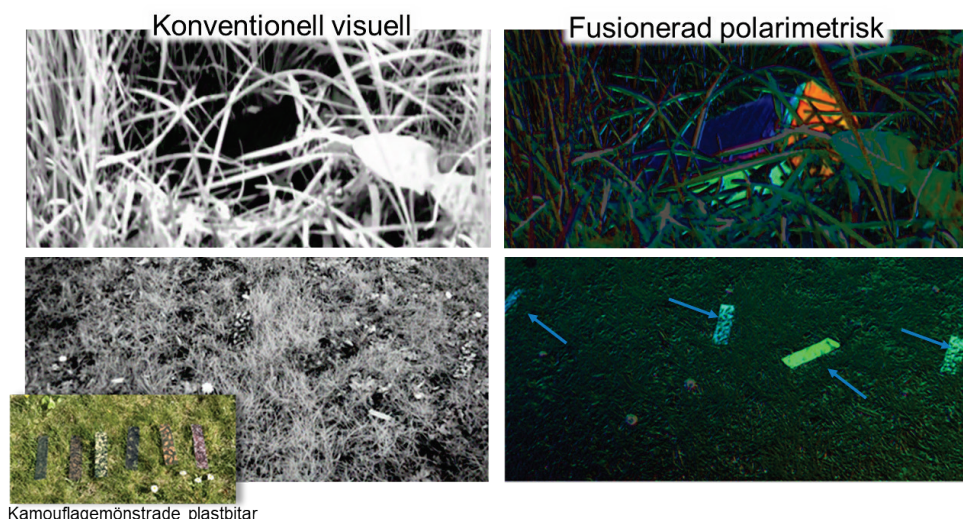
Figur 28. Exempel på stöd för anomalidetektion med data från en UVA-buren visuell polarimetrisk kamera. Till vänster: pankromatisk visuell bild. Till höger: Visualiseringsmod med fusionerad visuell/polarimetrisk där områden med långsamt varierande polarimetriska egenskaper förstärkts och mer slumpmässigt polariserad bakgrund tonats ner. Ett avvikande (relativt slätt) föremål framträder tydligare.

5.3 Visuella bandet

Den tekniska utvecklingen av polarimetriska sensorer för det visuella bandet har resulterat i små, lätta och relativt billiga kameror som erbjuder hög prestanda, både avseende upplösningsskyldmåga och polarimetrisk kontrast. Tekniken lämpar sig för små plattformar såsom UAV. Fokus för arbetet har legat på visualiseringsmoder för att fusionera information från olika modaliteter samt undersökningar om robustheten av den polarimetriska kontrasten med avseende på belysningsgeometri.

5.3.1 Möjligheter

I spaningsstillämpningar har tillägget av polarimetrisk information funnits underlätta vid detektion av konstgjorda mål i naturlig miljö. Det gäller framförallt mot delvis dolda föremål eller ytor som har en uppbruten textur, exempelvis kamouflage, som gör dem svåra att urskilja geometriskt från bakgrunden med en konventionell sensor, se exempel i Figur 29. Samma infärgningsteknik som beskrivs i kapitel 5.2.4 har använts för den fusionerade bilden.



Figur 29. Objekt delvis dolt i gräs (överst) respektive kamouflagemönstrade plastbitar i gräs (nedre) är två exempel där polarimetrisk information bidrar till förbättrad förmåga till måldetektion.

5.3.2 Utmaningar

Passiv avbildning i det visuella våglängdsbandet nyttjar reflekterad strålning och kräver någon extern strålkälla. Utomhus är det oftast solen och himlen. Vid reflektion mot en yta ändras polarisationstillståndet och det som registreras av en sensor är en funktion av ytans beskaffenhet och instrålningens polarisationstillstånd. Solen är väsentligen att betrakta som opolariserad medan solljus spritt i atmosfären (himmelsstrålning) kan vara kraftigt linjärpolariserad [24]. Effekten gör att ett objekt kan ha en stark polarimetrisk kontrast mot bakgrunden när man mäter i vissa väderstreck men ingen kontrast i andra. Himmelspolarisationen är förutsägbar så med kunskap om instrålningens polarisationsegenskaper och målobjektets reflektans kan mätgeometrin optimeras för att de bra polarimetrisk kontrast.

5.4 Termisk långvågs-IR

Under föregående projektperiod, 2018-2020, konstruerades ett polarimetriskt sensorsystem med roterande polarisationsfilter. Systemet var modulärt då kamera och filter kunde väljas för olika våglängder. Inspelningstiden för en bildsekvens var dock åtskilliga sekunder och systemet var därför begränsat till statiska scener. I ett Vinnova-finansierat projekt där FOI deltog utvecklades en polarimetrisk QWIP-kamera med pixellerat polarisationsfilter på en QVGA-detektor för termisk långsvågs-IR [25]. Under 2022 har FMV finansierat en vidareutveckling med VGA-upplösning och krympta pixlar. Kameran har utvärderats för polarimetrisk laserdetektion men fungerar även för passiva tillämpningar. Projektet har använt den nya kameran för studier av förutsättningarna för termisk polarimetrisk avbildning.

5.4.1 Möjligheter

Sensorer för passiv termisk polarimetrisk avbildning har fördelen av att inte vara beroende av externa strålkällor på samma sätt som motsvarande sensorer i det visuella bandet.

Information om ytorientering ger en ökad möjlighet att urskilja vissa objekt jämfört med en motsvarande konventionell sensor, se Figur 30. De termiska sensorer med DoFP-teknik som utvärderats har dock avsevärt lägre upplösning och lägre polarimetrisk utsläckning jämfört med motsvarande sensorer för det visuella bandet. Detta kombinerat med det faktum att polarisationssignaturer generellt är relativt svaga gör att tekniken visat mest potential i situationer när målsignalen är god men målet är svårt att urskilja från en klottrig bakgrund.



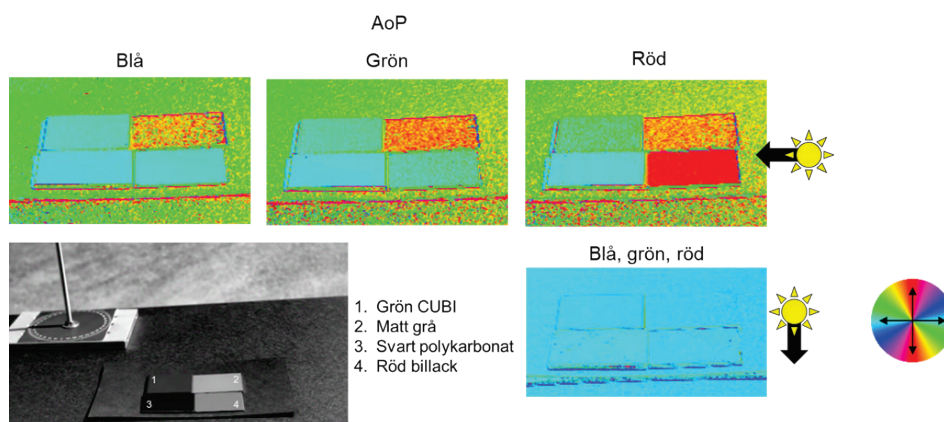
Figur 30. Exempel på data från den nya polarimetriska QWIP-kameran med känslighet i termiska LWIR-bandet. Till vänster: Konventionell termisk, till höger: fusionerad polarimetrisk där slätare ytor framträder.

5.4.2 Utmaningar

De tekniska utmaningarna för DoFP-sensorer i det termiska bandet är större än de för det visuella bandet då detektorerna fortfarande är relativt lågupplösta och har lägre polarimetrisk utsläckning. Detta kräver lågbrusiga sensorer eller scener med hög strålningsnivå. Fysikaliska utmaningar för polarimetrisk avbildning i våglängdsbandet för termisk långvågs-IR kommer av att bidrag från emission och reflektion blandas. Till skillnad från det visuella våglängdsbandet är instrålningen från himlen generellt bara svagt polariserad i LWIR. Jämfört med i det visuella våglängdsbandet är mätdata alltså inte lika känsligt på i vilket väderstreck datainsamlingen görs. En komplicerande faktor är istället att emission och reflektion är varandras komplement polarimetriskt [26]. Beroende på ytans egenskaper och orientering samt förhållandet mellan emission och reflektion kan en yta uppfattas med parallell eller vinkelrät polarisation eller opolariserad. Det är ett komplext samband som kan göra utfallet i vissa scenarier svåröversägliga.

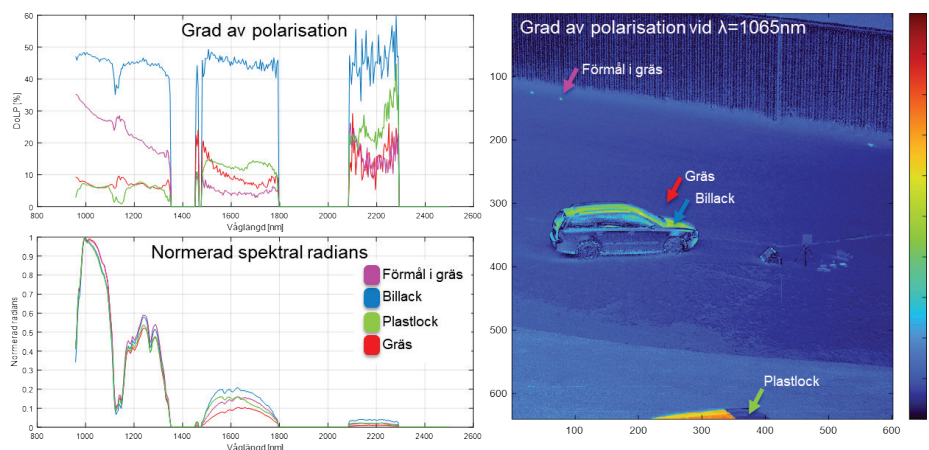
5.5 Spektropolarimetri

Inledande försök med kombinerad spektral och polarimetrisk avbildning har gjorts, dels i det visuella våglängdsbandet med en kommersiellt tillgänglig kamera baserad på Sonys 5.0 MP IMX250MYR CMOS-sensor och dels genom att kombinera Hypspec hyperspektrala kamera SWIR-640 med ett separat polarisationsfilter. I det visuella området, se Figur 31, har fyra provtyper avbildats utomhus, polarimetriskt och i tre band (R,G respektive B). Vid mätning med solen från sidan avbildas den röda billacken annorlunda polarimetriskt i det röda bandet men samma i de övriga banden. När solen är rakt framifrån ser alla provtyper lika ut, oavsett band. För att kunna utnyttja effekten behövs kunskap om ytornas spridnings-egenskaper vid polariserad instrålning.



Figur 31. Polarisationsriktning (AoP) från fyra horisontella provtyper utomhus under belysning från blå himmel och sol från sidan (överst) och framifrån (nere till höger). Färgen anger polarisationsriktningen enligt färgskivan. I de övre panelerna är det visuella området uppdelat i tre spektralband, blå, grön respektive röd. Nere till vänster visas en visuell bild av provuppställningen. 'Soluret' till vänster används för att mäta vinkel till solen.

Hypex SWIR-640 är en linjeskannande hyperspektral sensor som beskrivs närmare i kapitel 4.2. Spektropolarimetrisk avbildning kan åstadkommas genom att skanna en scen flera gånger med ett polarisationsfilter i olika orientering framför kameran. Insamlingstiden för ett dataset är åtskilliga minuter och ett försök med endast två polarisationsriktningar mot en statisk scen har genomförts, se Figur 32. DoLP för olika ytor i scenen har olika spektralt utseende vilket kan användas som komplement till spektral radian för klassificering av material.



Figur 32. Data från inledande försök med spektropolarimetrisk avbildning med Hypex SWIR-640 kombinerat med ett externt polarisationsfilter. Till vänster: spektral DoLP och normerad spektral radian från fyra olika objekt i scenen. Till höger: DoLP över hela scenen vid våglängden 1065nm med de olika objekten markerade.

5.6 Samarbeten

Arbetet har möjliggjort att polarimetriska sensorer kan användas i olika tillämpningar, exempelvis signaturmätningar på FOI. Resultat, både bredare och riktat mot detektion av laser, har presenterats på Samverkansgruppen för laserfrågor (SAMLAS).

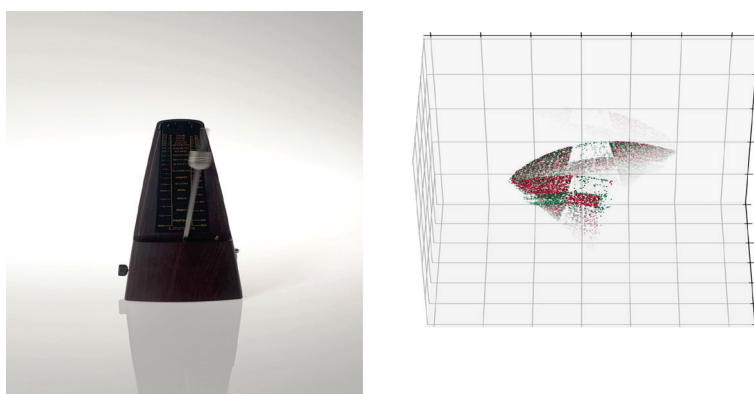
6 Händelsebaserad avbildning

Konventionella kameror avbildar en scen som en serie ögonblicksbilder (snapshots) insamlade vid diskreta tidpunkter definierade av en förbestämd och regelbunden (synkron) bildtakt. Varje bild förmedlar information (dvs nivå av ljusintensitet) från samtliga pixlar, oavsett om informationen har ändrats sedan föregående bild eller inte. I många fall är en sådan insamlingsteknik ineffektiv och riskerar missa viktig information eftersom det förflöter en viss tid mellan varje ny bildtagning i bildsekvensen, det finns alltså en begränsad temporal upplösning. Samtidigt skapas en stor mängd onödig redundans hos inspelat data. Med konventionellamerateknik krävs efteranalys av hela bilderna för att kunna upptäcka rörelser och andra förändringar i scenen.

Huvuduppgiften inom projektet, utöver karaktärisering av sensortekniken, har varit tillämpningsnära datainsamling med målsättningen att utröna under vilka förhållanden som eventdata innehåller tillräckligt med information för vidare analys. Särskilt fokus har lagts på att studera hur sensors fördelar, till exempel dess höga temporala upplösning, skulle kunna ge nya möjligheter. Kapitel 6.1 ger en teknisk orientering till tekniken och i kapitel 6.2-6.8 presenteras de tillämpningar som studerats.

6.1 Teknisk orientering och bakgrund

Eventkameror är tidsregelbundna (asynkrona) sensorer, där pixlarna oberoende av varandra genererar en signal eller ett event ("händelse") vid en intensitetsförändring hos det infallande ljuset. Varje event beskrivs av en tidpunkt, en position och en polaritet, ökning eller minskning, hos intensitetsförändringen. Utsignalen från en pixel i en eventkamera blir därmed en sekvens av event eller "signalspikar", där varje spik representerar en intensitetsförändring och där samplingstakten bestäms av aktuell dynamik i scenen. Ju fler förändringar i scenen desto fler event. Denna princip är inspirerad av hur biologiska synsystem fungerar och ett synonymt begrepp som ofta används är neuromorfisk avbildning (eng. *neuromorphic imaging*). En jämförelse mellan konventionell kameras bilder och eventkamerans data, eventdata, kan ses i Figur 33.



Figur 33. Vänster: En pendel i rörelse fångad på bild med en konventionell kamera. Höger: En 3D-illustration av uppmätt eventdata där samma pendel rör sig fram och tillbaka. Tiden representeras av axeln som går horisontellt rakt in i bildplanet sett framifrån och ju närmare i tiden till det att eventet skedde, desto starkare är eventpunkterna i illustrationen. Gröna och röda punkter motsvarar en ökning, respektive minskning av intensiteten hos sensors pixlar. Notera att en konventionell kamera fångar pendels position vid specifika diskreta tidpunkter tillsammans med den statiska bakgrunden. I stället fångar en eventkamera pendels position mer eller mindre kontinuerligt under dess färd utan rörelseoskärpa samtidigt som den statiska bakgrunden inte genererar några event.

I det visuella våglängdsområdet är registrerad ljusintensitet i en kamerapixel en produkt av belysningen av scenen (illuminansen) och reflektansen hos de material och objekt i scenen som pixeln avbildar. Över kortare tidsskalor är belysningen i naturliga scener att betrakta som relativt konstant. Uppmätta intensitetsförändringar signalerar därför att sensorn har

förflyttats i förhållande till scenen, att ett objekt i scenen har rört på sig i förhållande till sensorn eller att objektet har förändrats. En stillastående kamera som betraktar en helt statisk scen skulle inte genereras några event alls, fränsett eventuellt brus (se [27] för mer detaljerad beskrivning).

6.1.1 Kameror

Det finns i nuläget ett flertal stora leverantörer av eventkameror: iniVation, CSIC, Insightness, Samsung, Prophesee (ägt av Sony), CelePixel och Northrop [28]. Det här projektet har begränsat sig till att studera två kameror från de marknads- och teknikledande producenterna.

iniVation erbjuder flera varianter av eventkameror, som alla bygger på likartade chip:

- DVXplorer lite, DVXplorer samt DVXplorer mini: Dessa varianter genererar enbart event.
- Davis346: generar event och bild från samma detektor.
- DVXplorer Duo: eventkamera kombinerat med en högupplösning visuell kamera.

Prophesee säljer framför allt sina egna sensorchip, men säljer även kameror baserade på sina chip. Prophesees chip genererar endast event. För datainsamling har FOI använt två olika eventkameror, en DVXplorer från InVation och en SilkeyEvCam (VGA) från Prophesee, se Tabell 1.

Tabell 1. Specifikationer för sensorer från iniVation [29] och Prophesee [30] som använts i projektet.

	DVXplorer	SilkeyEvCam (VGA)
Spatial upplösning	640 x 480	640 x 480
Temporal upplösning	65- 200 μ s	200 μ s
Max genomströmning (miljoner event per sekund)	165 MEPS	50 MEPS
Latens (svarstid)	<1 ms	
Dynamiskt omfång	Approx. 90 dB	>120dB
Pixel pitch	9 μ m	
Bild	Ingen bild	Ingen bild
Storlek (W x H x D) mm	40 x 60 x 25	30 x 30 x 36
Vikt	100 g	40 g
Strömförbrukning	<140mA	300mA

6.1.2 Styrkor och svagheter

Eventkameror reagerar asynkront på ljusförändringar och får därmed fördelar jämfört med konventionella kameror. En sådan fördel är den låga fördröjningen (latensen) mellan event och utsignal. I de utvärderade kamerorna kan enskilda events tidsstämplas med mikrosekundsupplösning och latensen är under 1 millisekund [30] [29]. Detta ger möjlighet att upptäcka och följa mycket snabba händelseförlopp. I och med att varje event tidsstämplas individuellt så har eventkameror inte lika stora problem med rörelseoskärpa som konventionella kameror. Det bör dock noteras att en eventkamera, liksom alla sensorer, har en begränsad bandbredd med avseende på dataöverföring. Jämfört med konventionella kameror finns potential att reducera bandbredds krav hos kommunikationslänkar, särskilt om scenen har låg eller ingen dynamik [31]. Den högsta frekvensen som kan detekteras ökar monotont med ljusintensiteten och således kommer en ljusstark scen att kunna avbildas med högre tidsupplösning än en ljussvag eller mörk scen [31].

En ytterligare styrka med eventkameror är den låga effektförbrukningen på detektornivå, som typiskt är 10 μ W - 10 mW beroende på antalet genererade events. Eventkameror med inbyggd signalbehandling, har uppvisat förbrukning under 100 mW [31] vilket ska jämföras med konventionell kamera vars effektförbrukning typiskt ligger omkring 1 W. Den låga förbrukningen möjliggör sensorintegration på mindre plattformar och/eller i system som kräver hög uthållighet.

På grund av dess logaritmiska respons har eventkameror en hög dynamik, typiskt 120 dB, vilket kan jämföras med 55-60 dB hos konventionella CMOS-kameror. Den höga dynamiken skapar en högre robusthet mot utfrätning eller bländning från starka ljuskällor [31].

Nackdelar med eventkameror är till stor del kopplade till den låga mognadsgraden hos tekniken. Eftersom utsignalen från en eventkamera skiljer sig väsentligt från den bild som erhålls med en konventionell kamera så krävs specialiserad signalbehandling, som delvis är utvecklad idag. Ett exempel är teknikens ökade känslighet för egenrörelse, brus och andra dynamiska effekter, vilket kräver specialanpassade filter. Avsaknaden av standardiserade testmetoder gör det svårt att jämföra prestanda mellan olika eventkameror, men European Machine Vision Association (EMVA) har meddelat att man arbetar på att ta fram rekommendationer.

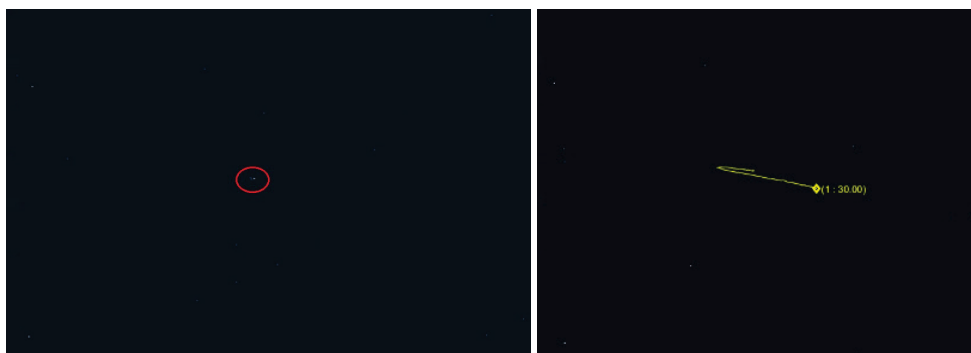
För tillfället är eventkameror dyrare än konventionella kameror på grund av högre tillverkningskostnader, men dessa kommer sannolikt kunna pressas i takt med att tillverkningsvolymerna ökar. Pixelupplösningar och fyllnadsfaktorer är i dagsläget väsentligt sämre än hos konventionella kameror, men integrering av tekniken i modern bakupplust och stackad CMOS-teknik har förbättrat prestandan under senare år.

Eventkamerans styrkor kan sammanfattas med följande punkter:

- **Hög temporal upplösning** – eventkamerans temporala upplösning är mycket hög och även aktiviteter med begränsad temporal utbredning kan upptäckas och analyseras. Vid övervakning är det få händelser som är så pass snabba att en eventkamera inte skulle generera event.
- **Låg bandbredd** – eventkameror genererar bara event när något ändras i scenen, och då enbart för de pixlar där något inträffar. För en statisk scen kommer eventkameran inte generera några event. I relativt statiska scener som ofta är fallet vid långtidsövervakning kommer sensorn att generera få event.
- **Låg strömförbrukning** – eventkamerans effektförbrukning beror av antalet event som generas. För statiska scener med få eller inga förändringar genereras få event och sensorns strömförbrukning blir därmed låg.
- **Stort dynamiskt omfång** – då detektorn använder sig av en logaritmisk skala och varje pixel i genererar event oberoende av varandra, blir det dynamiska omfånget för sensorn mycket stort.

6.2 UAV-detektion och -följning

Detektion och följdning av UAV är ett svårt problem med hög relevans. Två scenarier för detektion och följdning av fientliga UAV:er har beaktas. Det ena fallet är klassisk övervakning där inflygande UAV:er ska upptäckas och lokaliseras på stora avstånd (minst en kilometer). Här spanar man efter UAV:er mot himmeln som utgör en relativt stationär och klotterfri bakgrund. UAV:n täcker en eller ett fåtal pixlar i eventdata och målsättningen är att upptäcka och följa målet med bara ett fåtal pixlars storlek, givet en relativt statisk bakgrund. I bilden till vänster i Figur 34 visas en UAV som täcker 2 pixlar och i samma figur till höger visas samma UAV, där målföljdning gjorts under en minut.



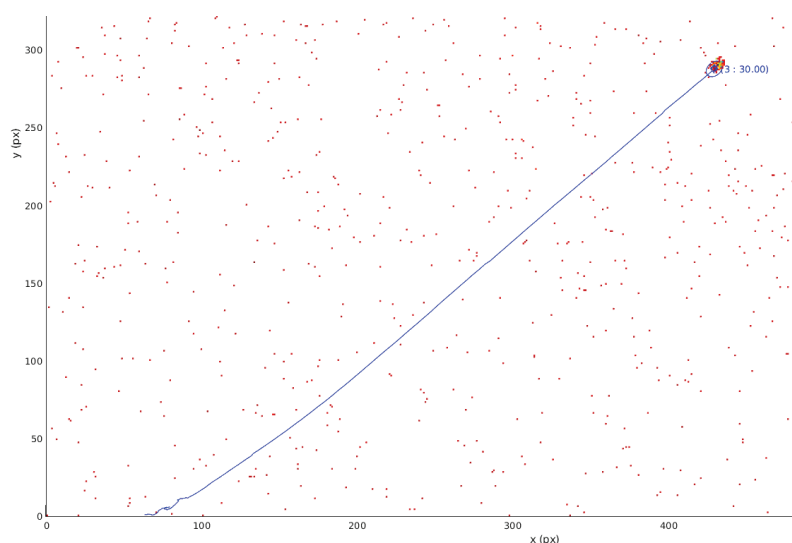
Figur 34. UAV-detektion och följning. Till vänster visas en UAV som täcker två pixlar på 150 meters avstånd och i till höger visas målsåret för den två pixlar stora UAV:n under en minut, där detektion och följning gjorts i eventdata.

I det andra scenariot vill man upptäcka lågflygande UAV:er som passerar en väldefinierad passage såsom en bredare gata eller en dalgång. För vissa scenarier är dessa passager den enda realistiska flygvägen för lågflygande UAV:er. I de fallen är en effektiv operatörsfri långtidsövervakning avgörande. En möjlig teknisk lösning är en uppsättning uppåttittande eventkameror med strömsnål signalbehandling som kan detektera och följa passerande UAV:er. Här är avståndet betydligt kortare, upp till 150 meter, och UAV:ns utbredning i pixlar större (fler än 20 pixlar). I Figur 35 visas ett utbrett mål, en UAV på 20 meters håll, som täcker 30 pixlar tillsammans med dess målsår där UAV:n är observerad underifrån.

De metoder för detektion och följning av få-pixel UAV:er i eventdata som studerats bygger på två antaganden: dels att UAV:n täcker två eller fler pixlar, dels att UAV:n rör sig under insamlingen. Kravet på målets utbredning underlättar brusreducering och detektion. Rörelsekravet gör att rörelsemodellen i följningssteget kan användas för att filtrera bort stillastående detektioner orsakade av brus.

De detektions- och följningsmetoder som implementerats och visuellt utvärderats brukar benämnas track-before-detect (TBD). Med denna typ av metoder används en basdetektionsmetod för att detektera alla potentiella mål, vilket resulterar i ett stort antal detektioner, där flertalet är falska detektioner. Detektioner kopplas antingen till redan existerande spår eller så initieras ett nytt, potentiellt spår. Nya detektioner kan associeras till redan existerande potentiella spår och när tillräckligt många detektioner är associerade med ett potentiellt spår övergår det från ett potentiellt spår till ett bekräftat spår. Om nya detektioner inte associeras till ett potentiellt spår kommer det potentiella spåret att raderas. Det explicita kravet på att målet är under rörelse gör att detektioner från samma position aldrig blir bekräftade spår då de inte uppfyller rörelsekriteriet.

Visuell inspektion av detektion och följning med TBD har visat goda resultat trots sin enkelhet. Ingen kvantitativ analys av prestanda har gjorts då insamlad data är allt för liten och tillrättalagd.



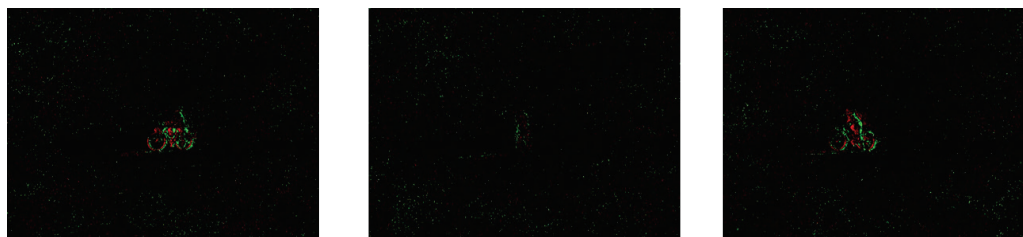
Figur 35. UAV på 20 m från sensorn sedd underifrån, där detektion och följning gjorts baserat på eventdata. Målspåret och en kovariansellips är markerade i blått, 3:an nära UAV:n är spår-ID:t, med andra ord är spåret det tredje som initierats i sekvensen och tracking tracking-score är 30/30. Bilderna baseras på event ackumulerade över 0.05 sekunder, där vissa överkänsliga pixlar filterats bort.

6.3 Kameraövervakning

I ett scenario där en eventkamera övervakar ett område, så som en väg eller ett skyddsvärt objekt, påminner den bildinformation som direkt genereras av eventkameran till stor del om bildinformationen från en konventionell övervakningskamera där så kallad bakgrundsmodellering används. Eventkamerans bildinformation har en fördel mot en konventionell kameras med den höga temporala upplösningen. Tillämpningsområdet finns beskrivet i en utförlig utredning [27].

Flera av problemen med informationsextraktion utifrån bakgrundsmodellerad bildinformation är direkt överförbara till bildinformation från en eventkamera såsom:

- Objektet blir inbakat i bakgrunden. Objekt, som väskor eller fordon, som lämnas i en scen kommer så snart de inte är i rörelse inte generera några event och blir därmed osynliga i insamlat data. I Figur 36 visas en cyklist som cyklar förbi sensorns synfält. Så länge cyklisten är i rörelse framträder den tydligt, men så fort cyklisten stannar, genereras inte längre några event och den blir en del av bakgrunden. På samma sätt blir väskan som cyklisten lämnar omedelbart en del av bakgrunden.
- Falsklarm; objekt i scenen såsom flaggor, grenar och vattenvågor som har en naturlig kontinuerlig rörelse kommer att generera events som behöver filtreras bort. Dessa rörelser kan potentiellt generera många falsklarm och leder dessutom till en ökad effektförbrukning.



Figur 36. En cyklist kommer in i synfältet (vänster), stannar, hoppar av cykeln och lämnar en väska (mitten) och hoppar på cykeln och cyklar vidare (höger). Så länge objekt är i rörelse genereras event som möjliggör detektion och klassificering av objekt och aktiviteter. Då rörelsen upphör blir objekten en del av bakgrunden och därmed svåra att upptäcka och klassificera.

Eventkamerans höga dynamiska omfång, framför allt i scener med starka ljuskällor, ger den en fördel gentemot bakgrundsmodellerad bildinformation. Detta eftersom objekt kan följas och klassificeras även i scener där de befinner sig nära eller till och med framför starka ljuskällor, se exempel i Figur 37.



Figur 37. En bil med påslagna strålkastare passerar genom scenen. Den statiska bakgrunden i scenen genererar inga event utan enbart bilens konturer framträder i dessa data. Bilens kontur hade framträtt på likartat sätt under olikartade ljusförhållanden såsom kvällsmörker eller en starkt solbelyst scen.

6.4 Frekvensanalys

Många scener innehåller periodiska processer eller händelseförlopp. Tack vare eventkamerans höga temporala upplösning fångas många av dessa periodiska processer. Potentiellt kan dessa distinkta frekvenser användas för att filtrera eventdata. Några olika scenarier då man skulle kunna ha nytta av frekvensanalys av eventdata är följande:

- Bortfiltrering av ointressant information – belysning som blinkar med en viss frekvens, vågor eller grenar som rör sig med en viss frekvens, eller dylika fall då det genereras onödigt mycket event.
- Klassificering baserat på frekvensinnehåll – vid detektion och målföljning, se till exempel kapitel 6.2, kan frekvensinnehåll användas för typbestämning och särskiljning. Propellrarna hos olika UAV-modeller och rotorbladen på helikoptrar roterar till exempel med olika frekvens, på samma sätt som olika fordon vibrerar med olika periodtal.

Frekvensanalys i realtid på eventdata öppnar upp för många olika tillämpningar och har därför studerats på FOI [32].

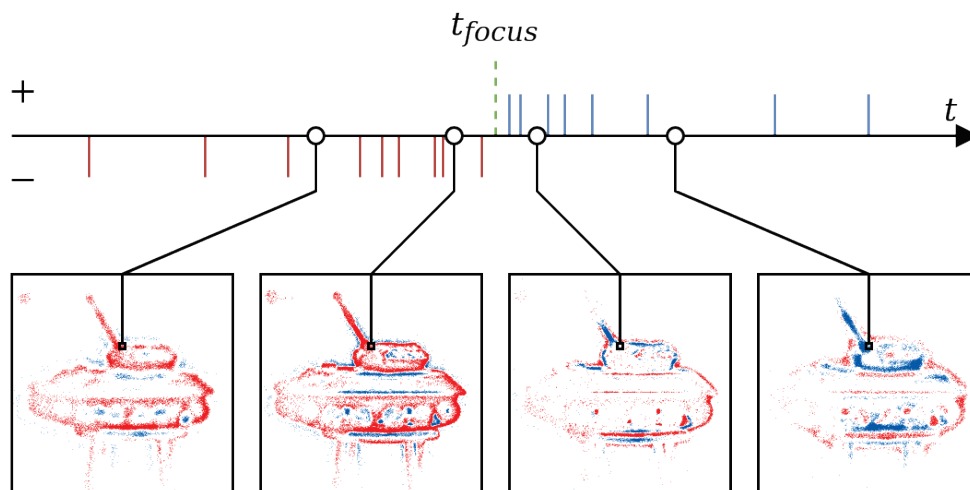
I en tänkbar fortsättning skulle man kunna studera frekvensinnehållet i en bild och på samma sätt som redan görs med laser och höghastighetskameror, använda eventkameror för avlyssning eller för att upptäcka högfrekventa ljud. Det sistnämnda skulle till exempel kunna handla om att upptäcka och klassificera fordon där motorn är igång.

6.5 Passiv 3D-rekonstruktion

Det finns bra metoder för 3D-rekonstruktion av scener baserat på bilder från konventionella kameror. Vi påminner om konventionella kamerors effektkrav, som gör dem opraktiska för långtidsövervakning i fält, och dataredundansen i bilderna. 3D-rekonstruktion kan göras med hög kvalitet med aktiva, ofta laserbaserade, kameror men då med nackdelen att man behöver belysa målområdet. Passiv 3D-rekonstruktion kan göras med eventkameror.

Passiv 3D-rekonstruktion kan åstadkommas med eventkameror genom att systematiskt variera, svepa, det optiska fokusavståndet. Polaritet för event kommer bytas när objektet är i fokus vilket kan användas för att bestämma djupet. Genom att hitta tidpunkten för polaritetsskiftet under fokussvepet kan djupet beräknas för varje pixel. Det finns exempel på passiv 3D-rekonstruktion från eventdata baserade på en spikande neuronät-modell där djupestimater har genererats i 100 Hz med en effektförbrukning på 200 mW [33].

FOI har gjort en första försök med 3D-rekonstruktion i labbmiljö. I Figur 38 visas event för ett fokus-svep över en scen innehållande en stridsvagnsmodell. Stridsvagnen framträder i eventdata som en diffus siluett av röd polaritet när den är ur fokus. Stridsvagnens siluett framträder tydligare när den hamnar i fokus för att därefter återigen bli en diffus siluett med blå polaritet. Eventen byter polaritet när stridsvagnen är i fokus vilket kan användas för djupestimering.



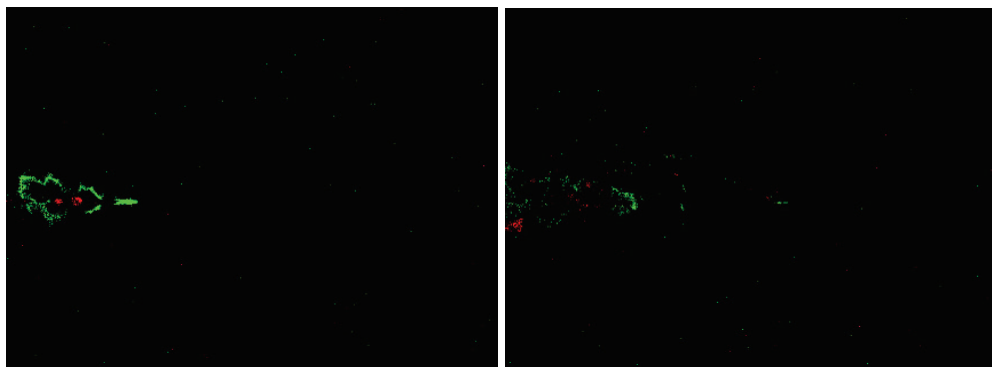
Figur 38. Fokussvep över stridsvagnsmodell. På tidsaxeln visas negativa (röd) och positiva (blå) spikar motsvarande events som genererats under ett fokussvep. Den illustrerade spiksignalen avser en individuell pixel. Genom att identifiera när polaritetsskiftet skedde under fokussvepet kan djupinformation erhållas. I bilderna ser man tydligt hur särskilt isolerade konturer uppvisar ett tydligt polaritetsskifte.

En eventbaserad metod för 3D-rekonstruktion har potential att byggas kompakt, vara svårupptäckt och ha flera storleksordningar lägre effektkrav än existerande metoder. En optikuppställning innehållande en flytande lins som styrs elektriskt gör att fokussvepet kan utföras mycket snabbt och kontrollerat. Detta öppnar för nya möjligheter, särskilt inom övervakningsscenarion, genom att erbjuda djupinformation ute i fält där effektförsörjningen är begränsad och risken att röja sin position ska hållas låg.

6.6 Höghastighetskamera för projektilavfyrning

Eventkamerans höga temporala upplösning gör den intressant som en så kallad höghastighetskamera. Konventionella höghastighetskameror har flera nackdelar i förhållande till en eventkamera. Jämfört med eventkameran är de ofta avsevärt dyrare, de genererar mycket stora datavolymer på kort tid (där större delen av data inte avbildar förloppet) och de kräver stark belysning för att kunna samla in hastiga förlopp. Dessa faktorer gör höghastighetskameror svåränvända och långt ifrån anpassade för insamlingar i fält.

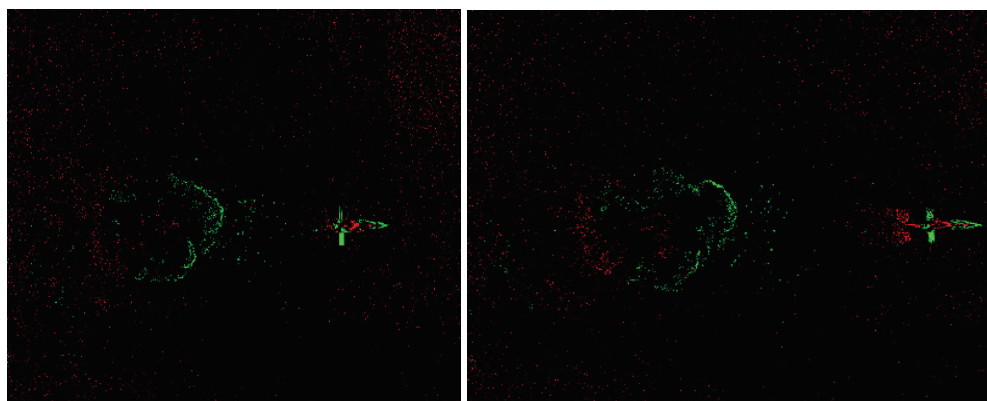
FOI har samlat in data från ett flertal olika snabba förlopp där olika typer av information har fångats av sensorn. Fokus har varit avfyrning av olika typer av projektiler för att ta reda på vilken information man kan få ut av dessa.



Figur 39. Avfyrning med gevär med en projektilhastighet på ca. 870 m/s insamlad på ett avstånd av 75 m. Projektilens bana genom synfältet framträder tydligt liksom mynningsflamman som uppstår vid avfyrningen.

Figur 39 visar en avfyrning med gevär från ett avstånd på 75 meter. Projektilens hastighet är ca. 870 m/s. I eventdata syns tydligt hur projektilen flyger genom synfältet. Även mynningsflamman framträder tydligt. Mynningsflamman kan bidra till att upptäcka avfyrningspositionen. Vidare ger mynningsflamman information om vapentyp och även om den laddningstyp som har använts. För analys av mynningsflamman är det inte enbart av intresse att detektera utan även att modellera mynningsflamman utbredning och styrka över tid med hög temporal upplösning. Eventkameran har tillräckligt hög temporal upplösning för att mäta mynningsflamman temporala dynamik. Utöver projektilen och mynningsflamman framträder även tryckvågen till vänster om projektilen i den högra bilden. Således genererar brytningsförändringar orsakade av tryckvågen även intensitetsförändringar som registreras av eventkameran.

I Figur 40 visas eventdata för avfyrning av ett pansarskott. Pansarskottet rör sig med hastighet på ca. 300 m/s. I bilden skjuts pansarskottet ut vilket resulterar i en mynningsflamma som breder ut sig över tiden. Projektilens geometri framträder tydligt i eventdata.



Figur 40. Avfyrning av med pansarskott med en hastighet på ca. 300 m/s. Projektilen är stor och dess geometri, mynningsflamman och dess dynamiska förlopp framträder tydligt i eventdata.

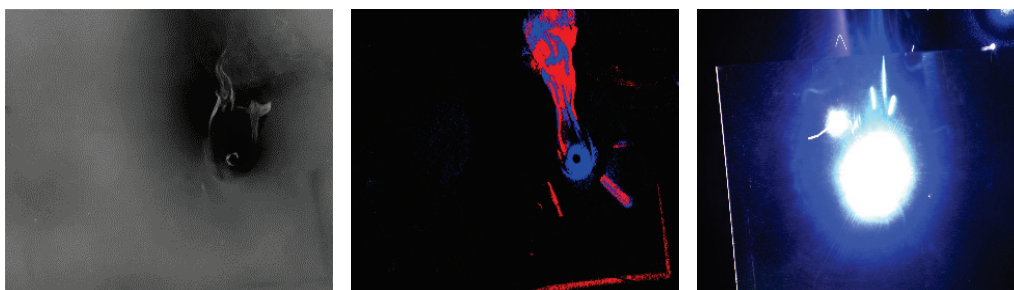
I Figur 41 visas en pistol som avfyras där eventdata har överlagrats korresponderande visuell bild. Events orsakade av mynningsflamman hastiga utbredning framträder tydligt liksom event orsakade av brytningsförändringar i luften orsakade av tryck- och temperaturförändringar från flamman och kulan. I bilden till höger visas motsvarande information utan överlagring i en bild.



Figur 41. Skjutning med pistol på kort avstånd. Eventdata överlagrad i motsvarande visuell bild till vänster och i mitten. Mynningsflamman och dess dynamiska förlopp framträder tydligt. I bilden i mitten framträder även event från brytningsförändringar orsakade av mynningsflamman och kulans rörelse. I bilden till höger visas endast eventdata.

6.7 Verkanslaser och stort dynamiskt omfång

Ett mindre test med en scen med högt dynamiskt omfång genomfördes för att testa eventkamerans möjlighet att fånga dylikt förlopp. Vid försöket placerades en aluminiumplåt i en mörk låda. I Figur 42 visas resultatet när ett hål bränns i en aluminiumplåt med hjälp av en laser.



Figur 42. Laserverkan. En 2 kW laser bränner ett hål genom en aluminiumplåt placerad i en mörk låda. Den visuella kameran, av modell Blackfly BFLY-PGE-12A2C från FLIR, (höger) blir bländad och det är otydligt vad som händer. I eventkameradata (mitten), är förloppet tydligare. Bilder som liknar en visuell representation kan återskapas i efterhand genom att lägga ihop informationen från eventdata (vänster).

I den högra bilden syns en bild från förloppet fångat med en visuell kamera, av modell Blackfly BFLY-PGE-12A2C från FLIR, som blir bländad. I mitten syns eventdata ackumulerat till en mer lättförståelig bild. Till vänster syns en bild som är skapad baserad på informationen i eventdata, där flammans detaljer framträder särskilt tydligt. Eventkameran uppfattar förändringar trots det stora dynamiska omfång som uppstår vid laserverkan. Trots ljusintensiteten som laserverkan genererar, innehåller eventdata tillräckligt mycket information för att kunna analysera verkansförloppet.

6.8 Egenpositionering

Med egenpositionering eller Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) avses tekniker att från en sensor i rörelse kunna beräkna sin position och orientering samtidigt som man bygger upp en karta över omgivningen. En vanlig kombination är att använda konventionella kameror tillsammans med tröghetssensorer (IMU). I kamerabilderna detekteras särdrag som motsvarar lämpliga landmärken i omgivningen, t ex dörröppningar och hörn på byggnader. Kartan byggs upp av ett stort antal landmärken vars positioner sedan estimeras samtidigt med sensorns rörelse. För att ett särdrag ska vara användbart för SLAM är det viktigt att samma landmärke kan detekteras och särskiljas från olika positioner, orienteringar, ljusförhållanden och över tid. En utmaning med eventdata är att sceninformation i form av geometri och textur blandas med eventkamerans egenrörelse. Samma observerade scen ger upphov till mycket olika eventdata beroende på hur kameran rör sig. Eventkamerans höga temporala upplösning och stora dynamiska omfång innebär att SLAM kan användas vid både snabba rörelser, som normalt skulle resulterat i rörelseoskärpa, vid låga ljusnivåer och vid övergångar mellan områden med olika ljusförhållanden.

Signalbehandlingen som krävs för att hantera eventdata är annorlunda än den som används för konventionella kameror och många av de tekniker som krävs för SLAM så som särdragsanalys kräver nya analysmetoder för att kunna dra nytta av sensorns höga temporala upplösning och stora dynamiska omfång. I framtiden vore det intressant att utvärdera hur eventkameror kan användas för SLAM.

6.9 Samarbeten

Eventkameran och dess speciella egenskaper gör att den potentiellt är av stor relevans inom flera försvarsorienterade tillämpningar och för vidare utveckling av nya förmågor inom FoT-verksamheten. Den stora mängden vitt spridda användningsområden exemplifieras i kapitel 6.2-6.8. Flertalet datainsamlingar som beskrivs i rapporten har också genomförts i samverkan med andra FoT-projekt. Även andra projekt har bidragit med frågeställningar och resurser för att fördjupa vissa studier. Tillsammans med en FM-beställning inom övervakning genomfördes en mindre principstudie kring hur eventkameran skulle kunna användas som ett komplement vid ett videoövervakningsscenario [27]. Vidareutveckling av metoder för realtidsdetektion och målföljning av UAV:er sker i samarbete med FoT-projektet Autonom bevakning med fokus på detektion och följdning med låg energiförbrukning för uthållig övervakning.

Ett centralt inlag inom projektet har varit informationsspridning – internt och extern – om sensorn, dess egenskaper och möjliga tillämpningar av eventkameran. Intresset för eventkameror, exempelvis hur sensorn fungerar och vilka nya eller förbättrade möjligheter den öppnar för, är mycket stort. Intresset finns hos olika aktörer; försvars- och polismyndigheter, universitet och högskolor, samt hos olika företag.

Det finns ett stort intresse av eventkameror och dess potential inom olika försvarstillämpningar inom NATO. Projektet har deltagit i en förstudie som syftade till att sätta ihop en, eller troligen flera, forskningsstudier. En studie kallad *Applications for Neuromorphic Cameras* planerar att starta under 2024.

Inom en forskningsmiljö för samhällssäkerhet, Security Link, kommer två projekt att genomföras. I det ena, Händelsebaserad avbildning – tillämpningsstudie, vidareutvecklas initiala resultat genom exjobb. Fokus är SLAM och strömsnål signalbehandling [34]. I det andra projektet, Händelsebaserad SLAM med robust särdragsmatchning, studeras metoder för robust extraktion av landmärken.

7 Referenser

- [1] *Personlig kommunikation med Kn Fredrik Karlsson: Systemansvarig för soldatburna sensorer inom Försvarsmakten, Utvecklingssektionen på Markstridsskolan i Kvarn*, 2013.
- [2] D. Bergström och T. Svensson, "Sensorer i SWIR - En studie om fenomenologiska förutsättningar och sensorteknisk potential för ökad mörkerförmåga," FOI-R--3486--SE, 2012.
- [3] J. Krieg och U. Adomeit, "Comparative long-time visible and shortwave infrared night illumination measurements," *Applied Optics*, vol. 58, nr 36, 2019.
- [4] T. Svensson, "Bakgrundsnivåer och olika SWIR-kamerors mörkerförmågor under mánlösa betingelser," FOI Memo 7464, 2021.
- [5] J. Ma, D. Zhang, O. A. Elgendy och S. Masoodian, "A 0.19e- rms Read Noise 16.7Mpixel Stacked Quanta Image Sensor With 1.1 μm -Pitch Backside Illuminated Pixels," *IEEE Electron Device Letters*, vol. 42, nr 6, pp. 891-894, 2021.
- [6] D. Bergström, D. Gustafsson, J. Eriksson, C. Brännlund, T. Svensson, B. Levin, D. Svedbrand, S. Möller, M. Axelsson, N. Wadströmer, H. Petersson, L. Axelsson, T. Hallberg, C. Åkerlind och A. Brorsson, "Avancerade Spaningssensorer 2018-2020 – Slutrapport," FOI-R--5051--SE, 2020.
- [7] "Assessing and Modelling the Performance of Digital Night Vision Image Fusion, Final Report of NATO RTO SET-217," STO Technical Report TR-SET-217, 2023.
- [8] D. Bergström, D. Gustafsson, B. Levin, D. Svedbrand och S. Möller, "Assessing handheld object ID performance of digital night vision VNIR/LWIR fusion," *Proc. SPIE 11537, Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications XVII*, vol. 115370E, 2020.
- [9] "Shortwave Infrared Technology: An Initial Attempt to Standardize SWIR Irradiance Measurements in Order to Produce a Compatibility Model to Evaluate Reflective Band Systems, Final Report of NATO RTO SET-246," för publikation under 2024.
- [10] J. Lind, "Evaluating CNN-based models for unsupervised image denoising," Linköping University, LIU-IDA/LITH-EX-A--21/011--SE, 2021.
- [11] M. Granqvist, "Infrared and visible image fusion with an unsupervised network and CLIP," Linköping University LiTH-ISY-EX--23/5540--SE, 2023.
- [12] M. Axelsson, O. Friman, T. V. Haavardsholm och I. Renhorn, "Target detection in hyperspectral imagery using forward modeling and in-scene information.," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 119, pp. 124-134, 2016.
- [13] M. Axelsson, N. Wadströmer, D. Gustafsson, H. Pettersson och D. Bergström, "Anomaly detection in hyperspectral LWIR imagery using autoencoders," *NATO SET-277 Workshop on Phenomenology and Exploitation of Hyperspectral Sensing*, 2019.
- [14] H. Freij, "Hyperspectral Image Registration and Construction From Irregularly Sampled Data," LiTH-ISY-EX--21/5408--SE, 2021.

- [15] N. Syrén Grönfelt, "Pretraining a Neural Network for Hyperspectral Images Using Self-Supervised Contrastive Learning," LiTH-ISY-EX-21/5382-SE, 2021.
- [16] M. Axelsson och D. Gustafsson, "Multi- och hyperspektrala data från rymdbaserade sensorer," FOI Memo 7922, 2022.
- [17] D. Donoho, "Compressed sensing," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 52(4), 2006.
- [18] J. Eek, D. Gustafsson, L. Hollmann, M. Nordberg, I. Skog och M. Malmström, "A Novel and Fast Approach for Reconstructing CASSI-Raman Spectra using Generative Adversarial Networks," *International Conference on Image Processing Theory, Tools and Applications (IPTA)*, 2022.
- [19] A. Wagadarikar, R. John, R. Willett och D. Brady, "Single disperser design for coded aperture snapshot spectral imaging," *Appl. Opt.*, vol. 47(10), 2008.
- [20] S. Mihoubi, P.-J. Lapray och L. Bigué, "Survey of Demosaicking Methods for Polarization Filter Array Images," *Sensors*, vol. 18, nr 11, p. 3688, 2018.
- [21] J. Xin, Z. Li, S. Wu och S. Wang, "Demosaicking DoFP images using edge compensation method based on correlation," *Opt. Express*, vol. 31, pp. 13536-13551, 2023.
- [22] J. Zhang, H. Luo, R. Liang, A. Ahmed, X. Zhang, B. Hui och Z. Chang, "Sparse representation-based demosaicing method for microgrid polarimeter imagery," *Opt. Lett.*, vol. 43, pp. 3265-3268, 2018.
- [23] B. Wronski, I. Garcia-Dorado, M. Ernst, D. Kelly, M. Krainin, C.-K. Liang, M. Levoy och P. Milanfar, "Handheld Multi-Frame Super-Resolution," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 38(4), pp. 1-18, 2019.
- [24] J. Eriksson, "Visuell polarimetrisk signatur – betydelsen av instrålning och modellering," FOI Memo 7706, 2021.
- [25] "QWIP Garm LW Pol," IRnova, [Online]. Available: <https://www.irnova.se/products/garm-lw-pol>.
- [26] O. Sandus, "A Review of Emission Polarization," *Applied Optics*, vol. 2, nr 12, pp. 1634-1642, 1965.
- [27] D. Gustafsson, K.-G. Stenborg, H. Hamrell, H. Ovrén och R. Rideg, "Eventkamera för bevakning – Möjligheter och begränsningar," FOI-R--5543--SE, 2023.
- [28] "Global Event Camera Market By Type (Polarity Event Output, Intensity Event Output), By Application (Industrial Equipment, Aircraft), By Geographic Scope And Forecast," 2022. [Online]. Available: <https://www.verifiedmarketreports.com/product/event-camera-market/>. [Använd 14 11 2023].
- [29] "iniVation - Specifications – Current models," 2023. [Online]. Available: <https://inivation.com/wp-content/uploads/2022/10/2022-09-iniVation-devices-Specifications.pdf>. [Använd 14 11 2023].
- [30] "CenturyArks Co., L. SilkyEvCam HD," 2023. [Online]. Available: <https://centuryarks.com/en/silkyevcam-hd/>. [Använd 14 11 2023].
- [31] G. Gallego, T. Delbrück, G. Orchard, C. Bartolozzi, B. Taba, A. Censi, S. Leutenegger, A. J. Davison, J. Conradt, K. Daniilidis och D. Scaramuzza, "Event-

Based Vision: A Survey,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 44(1), pp. 154-180, 2022.

- [32] J. Grundmark, H. Hamrell, J. Berneland och D. Gustafsson, ”Frequency Analysis on Neuromorphic Data Using Discrete Fourier Transform,” i *IPTA 2023*, Paris, 2023.
- [33] G. Haessig, X. Berthelon, S.-H. Ieng och R. Benosman, ”A spiking neural network model of depth from defocus for event-based neuromorphic vision,” *Scientific Reports*, vol. 9, nr 1, p. 3744, 2019.
- [34] J. Rideg, ”Event-Based Visual SLAM : An Explorative Approach,” Uppsala University, 2023.
- [35] D. Bergström, ”Digitala mörkersensorer – Tekniska förutsättningar och nya operativa förmågor,” FOI Memo 6883, 2019.
- [36] I. Alzugaray och M. Chli, ”Asynchronous Corner Detection and Tracking for Event Cameras in Real Time,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 3(4), pp. 3177-3184, 2018.

Bilaga 1. Rapporter, vetenskapliga artiklar, konferensbidrag och examensarbeten

Nedan listas alla publikationer som tagit fram inom ramen för projektet.

Rapporter:

- David Bergström, David Gustafsson, Sebastian Möller och Erik Valldor, Eventbaserad avbildning - En orientering om tekniken och dess potential, FOI Memo 7660, 2021
- Johan Eriksson, Visuellt polarimetrisk signatur – betydelsen av instrålning och modellering, FOI Memo 7706, 2021
- Maria Axelsson och David Gustafsson, Multi- och hyperspektrala data från rymdbaserade sensorer, FOI Memo 7922, 2022
- Johan Eriksson, Redovisning av milstolpe 2 2022 för Avancerade Spaningssensorer AF.9220422 Sensorer och signaturanpassning FOI22, FOI Memo 7974, 2022
- David Bergström, et al., Assessing and modelling the performance of digital night vision image fusion, NATO RTO SET-217
- David Gustafsson, K-G Stenborg, Hanna Hamrell, Hannes Ovrén, Johan Rideg, Eventkamera för områdesbevakning – Möjligheter och begränsningar, FOI-R--5543—SE
- Johan Eriksson, Redovisning av milstolpe 1 2023 för projekt Avancerade spaningssensorer AF.9220423 Sensorer och signaturanpassning FOI 23, FOI Memo 8282, 2023
- Avancerade spaningssensorer 2021-2023 Slutrapport FOI-5535--SE

Vetenskapliga artiklar och konferensbidrag:

- Ingmar Renhorn, Thomas Svensson och Glenn D. Boreman, Performance of an uncooled imaging interferometric spectrometer with intrinsic background radiation, Optical Engineering 60, 033106, 2021
- Andreas Brorsson, Carl Brännlund, David Bergström och David Gustafsson, Rapid Light Flash Localization in SWIR using Compressed Sensing, International Conference on Computer Vision Theory and Applications (VISAPP), 2021
- Ludwig Hollmann, David Gustafsson, Johan Eriksson och Carl Brännlund, Proc. of SPIE, Volume 12272, 2022
- Jacob Eek, David Gustafsson, Ludwig Hollmann, Markus Nordberg, Isaac Skog, Magnus Malmström, A Novel and Fast Approach for Reconstructing CASSI-Raman Spectra using Generative Adversarial Networks, International Conference on Image Processing Theory, Tools and Applications (IPTA), 2022
- Jens Grundmark, Hanna Hamrell, Johan Berneland och David Gustafsson. Frequency Analysis on Neuromorphic Data Using Discrete Fourier Transform, International Conference on Image Processing Theory, Tools and Applications (IPTA), 2023

Examensarbeten:

- Natalie Syrén Grönfelt, Pretraining a Neural Network for Hyperspectral Images Using Self-Supervised Contrastive Learning, LiTH-ISY-EX--21/5382--SE, 2021
- Hannes Freij, Hyperspectral Image Registration and Construction From Irregularly Sampled Data, LiTH-ISY-EX--21/5408--SE, 2021
- Johan Lind, Evaluating CNN-based models for unsupervised image denoising, LIU-IDA/LITH-EX-A--21/011--SE, 2021
- Jakob Eek, Reconstruction of Hyperspectral Images Using Generative Adversarial Networks, LiTH-ISY-EX--21/5447--SE, 2021
- Matilda Granqvist, Infrared and Visible Image Fusion with an Unsupervised Network, LiTH-ISY-EX--23/5540—SE, 2022

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



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
164 90 Stockholm

Tel: 08-55 50 30 00
Fax: 08-55 50 31 00

www.foi.se