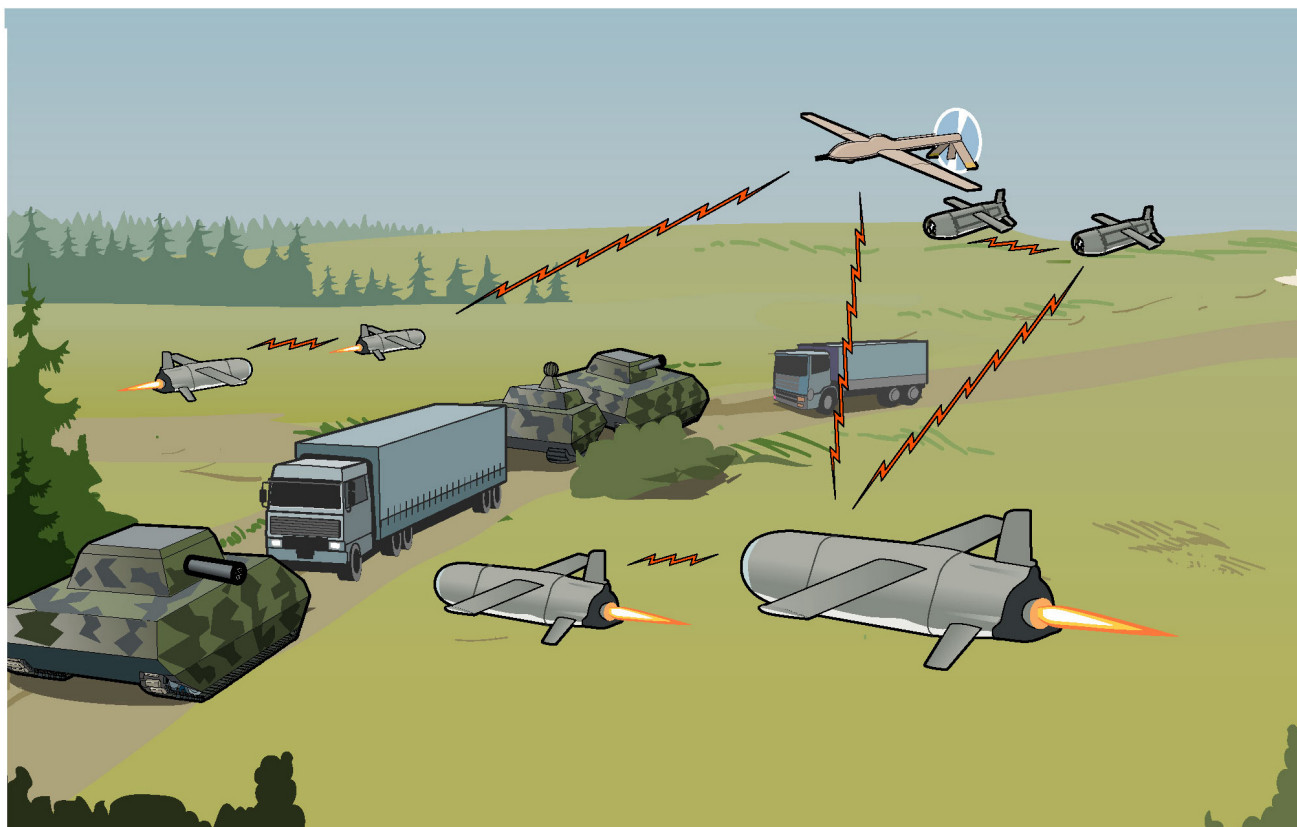


Peter Alvå, Folke Andersson, Ove Steinvall

Ledning och styrning av samverkande robotar

Slutrapport



Peter Alvå, Folke Andersson, Ove Steinvall

Ledning och styrning av samverkande robotar

Slutrapport

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Systemteknik 172 90 Stockholm	Rapportnummer, ISRN FOI-R--0734--SE	Klassificering Användarrapport
	Forskningsområde 5. Bekämpning	
	Månad, år December 2002	Projektnummer E6003
	Verksamhetsgren 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	Delområde 51 VVS med styrda vapen	
Författare/redaktör Peter Alvå Folke Andersson Ove Steinvall	Projektledare Peter Alvå	
	Godkänd av Monica Dahlén	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning FM	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig Martin Hagström	
Rapportens titel Ledning och styrning av samverkande robotar - Slutrapport		
Sammanfattning (högst 200 ord) Ett system av flygande robotar där robotarna kan utbyta information med varandra öppnar för nya möjligheter, till exempel samverkan för att underlätta målidentifiering och målval. Robotsystemets förmåga ökar ytterligare om det dessutom kan kommunicera med ett yttre ledningsnätverk. Rapporten beskriver spelkort för ett attackrobotsystem med laser- och radiolänk för informationsutbyte och för ett UAV-system med möjlighet att samverka med robotsystemet. I ett scenario visas hur attackrobotar och UAV-systemets samordningseffekter kan utnyttjas för att uppnå taktiska fördelar. Forskningsaspekter kring autonoma styrsystem för samverkande robotar behandlas också. Ett samverkande robotsystem torde vara ett effektivt vapen mot rörliga mål på det framtida slagfältet, speciellt om spaningsUAVer, attackrobotar samt ledningsnätverk kan utbyta relevant underrättelse- och mållägesinformation under såväl sök- som anfallsfas.		
Nyckelord Robotsystem, Scenarier, Autonomitet, Samordnad styrning, Ledning, Nätverk, Simulering		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 76 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista Sekretess	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Systems Technology SE-172 90 Stockholm	Report number, ISRN FOI-R--0734--SE	Report type User report
	Research area code 5. Combat	
	Month year December 2002	Project no. E6003
	Customers code 5. Contracted Research	
	Sub area code 51 Weapons and Protection	
Author/s (editor/s) Peter Alvå Folke Andersson Ove Steinvall	Project manager Peter Alvå	
	Approved by Monica Dahlén	
	Sponsoring agency Swedish armed forces	
	Scientifically and technically responsible Martin Hagström	
Report title (In translation) Collaborating missiles systems - Final report		
Abstract (not more than 200 words) The report gives an example of a collaborating missile system and a UAV-system and shows how these can be used to obtain better system performance in tactical situations. The report contains a brief abstract of the current research in the guidance field. A collaborating missiles system shows good potential against moving targets, particularly if the missiles can interact with the C3I system during the attack.		
Keywords Missiles systems, Scenarios, Autonomy, Co-operative control, Command & control, Network, Simulation		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 76 p.	
	Price acc. to pricelist Security classification	

Innehållsförteckning

1	INLEDNING.....	7
1.1	UPPDRAGET.....	7
1.2	ARBETSUPPLÄGG.....	7
1.3	DELTAGARE	9
1.4	RAPPORTDISPOSITION.....	9
2	SAMVERKANDE ROBOTSYSTEM – DAGENS TEKNIK OCH FRAMTIDENS BEHOV	11
2.1	KOMMUNICERANDE ROBOTSYSTEM IDAG.....	11
2.2	OPERATIVA KRAV PÅ FRAMTIDA ATTACKROBOTAR.....	11
2.3	BEHOV AV OCH KRAV PÅ TERRÄNGDATABAS	12
3	SYSTEMSPELKORT.....	14
3.1	BÄRROBOTSYSTEMET "TAURUS TRANSPORTER".....	14
3.2	SUBROBOTSYSTEMET "EURAAS"	16
3.3	ÖVRIGA LASTALTERNATIV TILL TAURUS TRANSPORTER.....	17
3.3.1	MOMAS – Modulariserat Obevakat Nätbildande Marksensörssystem.....	17
3.3.2	SKAVAT – Superkaviterande korthållstorped.....	17
3.3.3	AFORMIN – Avståndsverkande fordonsminsensystem, "Sixpackback"	18
3.4	SPANINGSUAV-SYSTEMET "CASTOR"	18
4	LASERBASERAD RETROKOMMUNIKATION	21
4.1	ALLMÄN BESKRIVNING.....	21
4.2	PRESTANDA.....	22
4.3	TEKNISKA DATA	24
4.4	UTVECKLINGSLÄGET.....	25
5	3 D LASERRADAR	29
5.1	MOTIV FÖR 3 D LASERRADAR	29
5.2	TEKNIKLÄGET	30
6	SCENARIO – ROBOTATTACK MOT MEKANISERAD FIENDE.....	39
6.1	KRIGSUTBROTTET	39
6.2	UNDERRÄTTELSEINHÄMTNING	40
6.3	ROBOTINSATS.....	41
6.4	KOMMENTARER TILL SCENARIOT	48
7	LEDNINGSSYSTEM FÖR SAMVERKANDE ROBOTAR.....	51
8	ALGORITMER FÖR SAMVERKAN - ALLMÄNT.....	55
9	STYRNING FÖR MAXIMAL INFORMATION	57
9.1	DECENTRALISERAD STYRNING AV SAMVERKANDE ROBOTAR MED HJÄLP AV REINFORCEMENT LEARNING.....	57
9.2	CENTRALISERAD STYRNING.....	57
9.3	DECENTRALISERAD STYRNING	57
9.4	DISTRIBUERAD OPTIMERING GENOM PARAMETERSÖKNING I POLICYRUMMET	58
9.5	FORTSATT ARBETE	59
9.5.1	Regulator med flera abstraktionsnivåer.....	59
9.5.2	Kommunikation mellan agenter.....	59
9.6	RELEVANT ARBETE.....	60
10	STYRNING AV ROBOTGRUPPER MED POTENTIALFÄLT	61

11	SIMULERINGSMODELL I RAMVERKET FLAMES	63
11.1	FLAMES	63
11.2	UTFÖRT ARBETE RELATERAT TILL FLAMES.....	63
11.3	FORTSATT ARBETE	65
12	TIDIGARE ARBETE	67
12.1	SYSTEMSTUDIER AV FIBEROPTISKT STYRDA ROBOTAR	67
12.2	BANOPTIMERING FÖR MULTIPLA ROBOTAR	68
12.3	SENSORDATAFUSION	69
12.4	PLANERING AV ROBOTBANOR FÖR SYNKRONISERING I MÅLOMRÅDET.....	70
12.5	SIMULERINGSMILJÖ FÖR SAMVERKANDE ROBOTAR - ROSA	71
13	SLUTSATSER.....	73
14	FORTSATT ARBETE	74
15	REFERENSER.....	75

1 Inledning

Ett system av flygande robotar, där robotarna kan utbyta information med varandra, öppnar för nya möjligheter. Till exempel kan robotarna samverka för att underlätta målidentifiering och målval. Tekniken har i tidigare projekt studerats för ett system av fiberoptiskt styrda robotar [1, 2, 3], där styrningen sker från en gemensam dator i eldenheten med möjlighet till fullständigt informationsutbyte mellan de ingående robotarna under ledning och övervakning av en operatör. I detta projekt har vi studerat ett robotsystem som utnyttjar en radio- eller laserlänk för dataöverföring mellan robotarna, där endast ett begränsat informationsutbyte kan ske.

1.1 Uppdraget

Projektet *Styrning av samverkande robotar* skall enligt uppdraget från Försvarmakten behandla följande frågeställning:

- Hur kan verkan mot olika typer av mål förbättras genom att utnyttja samverkande robotar?
- Hur kan information från underrättelse- och ledningssystem användas för vapenstyrning?

Projektets mål har varit att utveckla teknik och metoder för samordnad (autonom) styrning av flera samverkande robotar.

Projektet har vidareutvecklat ett koncept för samverkande robotsystem där en trådlös kommunikationslänk mellan robotarna utnyttjas.

Projektet har också gett en ökad kompetens framför allt inom området autonom styrning, som också kommer till nytta i flera andra tillämpningar.

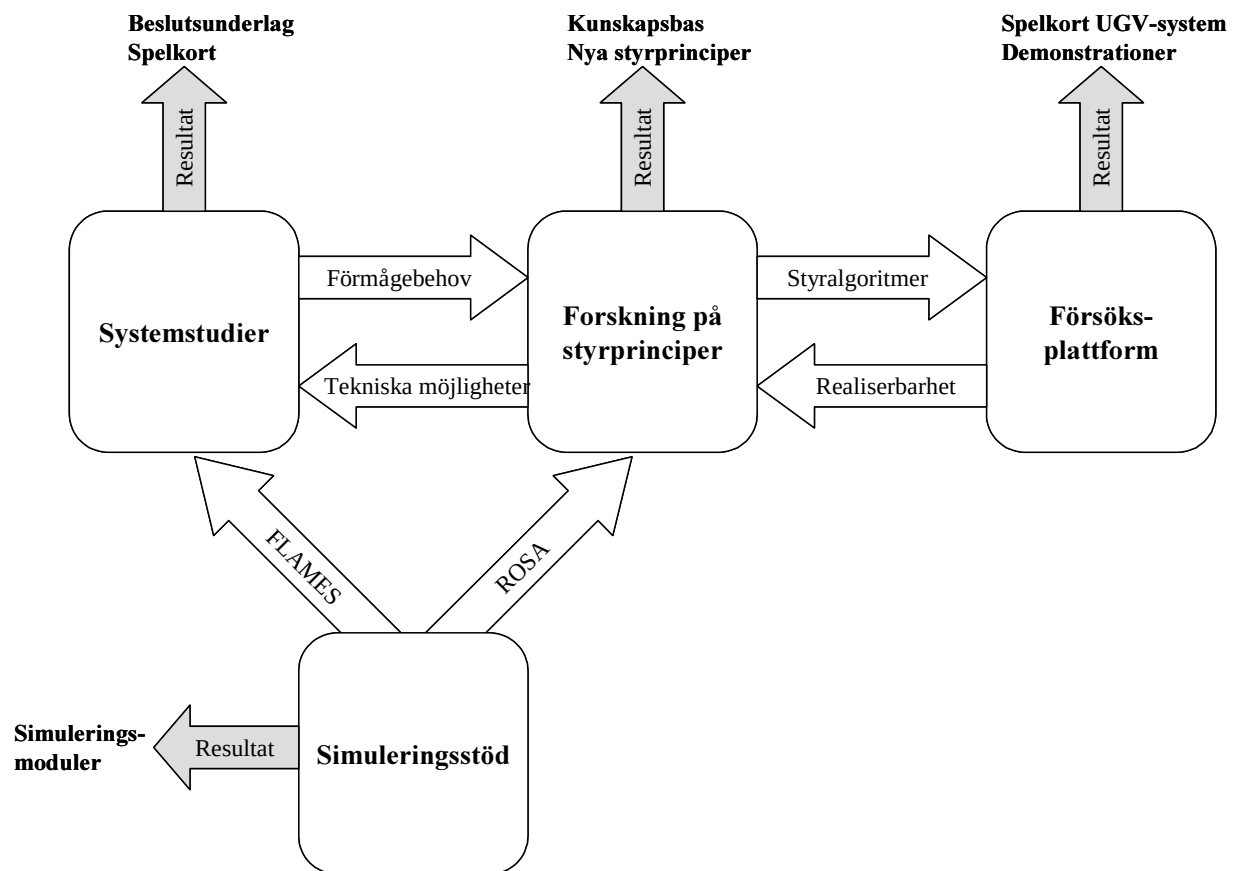
1.2 Arbetsupplägg

Arbetet i projektet har bedrivits på fyra fronter:

- Systemstudier drivs för att belysa taktiska möjligheter med samverkande robotsystem.
- Grundläggande forskning på optimala styrprinciper för samordnad styrning utförs för att lösa några utvalda problem, samt för att bygga upp en kunskapsbas inom området autonoma system.
- Simuleringsstöd för tekniska och taktiska simuleringar utvecklas.
- Försöksplattform för autonom styrning utvecklas.

Verksamheterna kompletterar varandra. Systemstudierna belyser vilka forskningsområden som är kritiska för en realisering av samverkande robotsystem. Forskningen på optimala styrprinciper, å andra sidan, ger ett underlag för att beskriva de tekniska aspekterna av systemstudien. Simuleringsstöd utnyttjas både vid utvecklingen av nya styrprinciper och vid

systemstudier. Försöksplattformen ger en möjlighet att testa robustheten hos styrprinciper när ”verkligheten behagar hålla examen”. Den ger också värdefull kunskap om svårigheten med och kostnaden för att implementera ny teknik.



Figur 1.1 Projektets verksamheter

Resultatet av systemstudierna riktar sig direkt mot kundens (Försvarmaktens) behov genom att ge beslutsunderlag för fortsatt forskning om samverkande robotsystem, samt för planering av framtida vapensystem och analys av framtida hotbild. De spelkort som produceras kan utnyttjas i andra verksamheter, t.ex. i FoRMA-studien som exempel på PE-system.

Resultatet av forskningsverksamheten kommer också Försvarmakten till godo genom att den kunskapsuppbyggnad om autonoma system som sker kan utnyttjas för kommande studier. Framtagna autonoma styrprinciper kan i ett längre perspektiv komma till nytta i framtida svenska vapensystem, men utgör också en viktig grund för internationella kontakter inom området autonomitet.

Arbetet med simuleringsverktyg ger också resultat i form av robotsimuleringsmoduler som kan, liksom spelkorten, utnyttjas av andra studier.

Försöksplattformen, som utvecklas i samarbete med flera projekt på Institutionen för Flyg och Autonoma system, kan också bli ett värdefullt verktyg för forskningen på andra institutioner och avdelningar inom FOI.

1.3 Deltagare

I projektet har följande personer vid FOI deltagit:

Peter Alvå, Flyg och Autonoma System (Projektledare)
 Antonios Fokas, Flyg och Autonoma System (Bitr. projektledare)
 Birgitta Stridh, Flyg och Autonoma System (Sekreterare)
 Folke Andersson, Flyg och Autonoma System
 Åke Arvidsson, Flyg och Autonoma System
 Lars Forssell, Flyg och Autonoma System
 Leif Hagstedt, Flyg och Autonoma System
 Johan Hamberg, Flyg och Autonoma System
 Anders Lennartsson, Flyg och Autonoma System
 Erik Marits, Flyg och Autonoma System
 Daniel Skoogh, Flyg och Autonoma System
 Dag Wallström, Flyg och Autonoma System
 Andreas Alm, Flyg och Autonoma System (Examensarbetare)
 Daniel Martin, Flyg och Autonoma System (Examensarbetare)

Martin Eklöf, Systemmodellering
 Johan Pelo, Systemmodellering
 Jenny Ulriksson, Systemmodellering
 Martin Jerberyd, Systemmodellering (Examensarbetare)

Johan Schubert, Data- och Informationsfusion
 Åke Wernersson, Data- och Informationsfusion

Ove Steinvall, Lasersystem

Staffan Gadd, Radarsensorer

Från Försvarsmakten, projekt ArtDemo, har följande personer medverkat:

Joakim Nyman, Artreg
 Lennart Lindquist, MTK

Bidrag till rapporten har lämnats av, förutom av författarna, Antonios Fokas, Johan Hamberg och Dag Wallström.

1.4 Rapportdisposition

Huvuddelen av rapporten redovisar resultatet av den systemstudie som genomförts under hösten 2002, en studie som har varit en vidareutveckling av tidigare studier i projektet 2000 och 2001 [4, 5]. För att rapporten skall kunna läsas fristående har en hel del resultat från dessa studier också tagits med.

Rapporten är också en slutrapport från projektet Styrning av Samverkande robotar och redovisar därför en sammanfattning av de frågor som har behandlats och de resultat som har uppnåtts.

Rapporten inleds i kapitel 2 med en diskussion om dagens teknikläge och framtidens operativa krav på robotsystem. Därefter presenteras i kapitel 3 de spelkort som använts i studien, för

robotsystem och viktiga delkomponenter såväl som för andra system med vilka robotarna kan samverka. Spelkorten utnyttjas sedan i kapitel 4 i ett scenario för att demonstrera vilka nya förmågor som kan erhållas med samverkande robotsystem.

Laserbaserad retrokommunikation samt 3D laserradar är två viktiga systemkomponenter som utnyttjats i spelkorten och i scenariot. En teknisk beskrivning av dessa ges i kapitel 4 och 5.

Samverkande robotar är också en viktig systemkomponent i ett framtida Nätverksbaserat försvar. I kapitel 7 diskuteras robotarnas koppling till Nätverket och deras möjligheter att såväl utnyttja detta som att bidra till detsamma.

Projektets huvudinriktning är forskning på algoritmer för samordnad styrning. Detta arbete presenteras i kapitel 8-10, först en diskussion om olika aspekter kring styralgoritmer för samverkande robotsystem och därefter en sammanfattning av aktuell verksamhet i projektet.

En simuleringsmiljö har utvecklats i projektet för att utnyttjas dels för arbetet med styralgoritmer och dels för att med taktiska simuleringar stödja systemstudier och systemvärderingar. Denna simuleringsmiljö presenteras i kapitel 11.

Kapitel 12 innehåller en sammanfattning av några resultat från ett tidigare projekt, Fiberoptiskt styrda robotar. Många av dessa resultat har kunnat utnyttjas i projektet Styrning av samverkande robotar.

Vi avslutar rapporten med några sammanfattande slutsatser (kapitel 13), samt en presentation av ett kommande projekt, Samverkande robotar i nätverk, där detta projekts resultat kommer att tillvaratas och vidareutvecklas (kapitel 14).

2 Samverkande robotsystem – dagens teknik och framtidens behov

2.1 Kommunicerande robotsystem idag

Det finns idag inga robotsystem som samverkar annat än på en mycket låg nivå, t.ex. kommunikation mellan robot och skytt. Några exempel på sådana system är:

- Rbs23 Bamse där roboten leds in mot målet av en eldledningsradar monterad på lavetten, det vill säga ett enkelriktat och kontinuerligt informationsflöde.
- Den ryska jaktroboten AA-10 ALAMO, där roboten skjuts mot en punkt och där dess målsökare har möjlighet att låsa på målet. Kommunikation sker endast för att uppdatera roboten om eventuella förändringar i måluppträdandet, det vill säga ett enkelriktat och behovsstyrt informationsflöde. Då AA-10:s målsökare är semiaktiv är roboten även efter mållåsning beroende av radarbelysning från det skjutande flygplanet.
- Den amerikanska luftvärnsroboten PATRIOT som styrs från en markstation, men även utrustats med en målsökare. Målsökarens information sänds ner till markstationen, där den tillsammans med mål- och robotdata uppmätt av eldledningsradarn används för att beräkna styrkommandon, som sedan sänds till roboten, det vill säga ett kontinuerligt dubbelriktat informationsflöde.
- Den huvudsakligen i Tyskland utvecklade roboten POLYPHEM som styrs via optofiber. Styrkommandon beräknas av skytten utifrån information från robotens målsökare, även här ett kontinuerligt dubbelriktat informationsflöde. POLYPHEM-systemet är också intressant med hänsyn till att dess robotar har en gemensam länk till/från avfyringsenheten/operatören och att systemet relativt lätt torde kunna modifieras för att uppträda utifrån principer för delad information.
- LOCAAS är ett amerikanskt turbojetmotordrivet subrobotsystem som i huvudsak är avsett för att inom en given yta självständigt söka efter, identifiera och bekämpa vissa typer av flyttbara eller rörliga mål. LOCAAS-roboten är ursprungligen inte framtagen att utnyttjas för en inbördes samverkan mellan flera individer, men studier för samverkande robotsystem pågår inom ramen för en vidareutveckling av LOCAAS-systemet, där robotar utrustade med laserlänk är tänkta att utgöra agenter.

2.2 Operativa krav på framtida attackrobotar

Framtidens markstrid bedöms ställa nya, hårda krav på attackrobotsystem. Exempel på sådana är (ej i prioritetsordning!)

- förmåga att bekämpa tidskritiska mål (luftvärn, artilleri, stridsfordon etc.),
- förmåga till kostnadseffektiv bekämpning med god yttäckningsförmåga,

- förmåga att genom autonomt låghöjdsuppträdande reducera risken för upptäckt och bekämpning,
- förmåga till måldiskriminering, träffpunktoptimering och bekämpningsoptimering,
- förmåga till graderad verkan och begränsning av oönskade sidoeffekter,
- förmåga till bekämpning av flera mål per insats,
- förmåga till hög funktionssannolikhet oberoende av väder och belysningsförhållanden,
- förmåga till optimal och effektiv insats (varje robot träffar ett mål),
- förmåga att samla in och kommunicera omvärldsinformation för uppdatering av exempelvis syntetiska omgivningar,
- förmåga att kommunicera relevant underlag för verkansutvärdering,
- förmåga att hantera situationer med avsiktlig störning och/eller vilseledning.

Ovanstående krav bedöms kunna lösas av ett system bestående av en flygburen bärrobot som avsondrar ett antal subrobotar, vilka därefter autonomt avsöker ett större område och kommunicerar med såväl bärrobot som varandra för att uppnå optimal verkan och verkansverifiering. Låghöjdsuppträdande (50-300 meter) medger oftast en tillfredsställande meteorologisk sikt för målupptäckt med medförda sensorsystem och möjliggör samtidigt ett uppträdande som reducerar bekämpningsrisken. En avancerad sensor i subrobotarna som utnyttjar aktiv/passiv detektion såväl inom det optiska- som inom RF-området skapar förutsättningar att åstadkomma ett kompakt system för automatisk måligenkänning. Hög upplösning i tre dimensioner ger möjligheter till träffpunktoptimering och att åstadkomma tillräcklig verkan med begränsad sprängkraft. Samverkan mellan subrobotar med attackfunktion ökar förmågan till upptäckt, lokalisering, identifiering och bekämpning av prioriterade mål, samt möjliggör en mellan subrobotarna inbördes optimal målfördelning.

2.3 Behov av och krav på terrängdatabas

Den geografiska informationen spelar en viktig roll för all militär verksamhet. Utveckling och användning av geografiska informationssystem (GIS) är mycket snabb och den höga utvecklingstakten på datorsidan underlättar införandet av mycket kraftfulla system. Vid tillämpning på ett system av autonomt uppträdande och samverkande flygande robotar med spanings-/attackfunktion kan digitala geografiska data utnyttjas för att, med utgångspunkt från systemspecifika krav hos såväl de egna systemen som motståndarens, analysera hur en kombination av olika kriterier påverkar möjligheterna till ett eget optimalt uppträdande i ett stridsområde. Exempel på kriterier kan vara

- optiska siktförhållanden, maskvinklar som förhindrar insyn/utblick,
- elektromagnetisk vågutbredning,
- öppen eller skylande terräng,
- transportvägar,
- framkomlighet.

Under förutsättning att det autonoma verkande robotsystemet ges tillgång till ett högupplöst och systemanpassat GIS-underlag bedöms detta i hög grad öka systemets förutsättningar att, i

en dynamisk stridsmiljö och i nära realtid, såväl analysera som bedöma det egna systemets handlingsmöjligheter utgående från motståndarens handlingsmöjligheter och hans sannolika handlande under inverkan av terrängfaktorer.

3 Systemspelkort

Nedan beskrivs ett antal systemspelkort som tillsammans utgör exempel på hur ett konceptuellt system för samverkande robotar kan vara uppbyggt. Spelkorten bör såväl enskilt som tillsammans betraktas som exempel på ett fiktivt "totalsystem" där de ingående enheterna representerar olika delfunktioner. Systemspelkorten beskriver bland annat en bärrobot (TAURUS Transporter) vilken kan förses med ett antal olika lastalternativ. Det för studien mest intressanta lastalternativet utgörs av åtta stycken turbojetmotordrivna subrobotar (EURAAS). När dessa avsondrats från bärroboten kan de kommunicera såväl inbördes som med i området förekommande bärrobotar, spaningsUAVer (CASTOR) och andra kommunikationsnoder i Nätverket.

Spelkorten beskriver inget i sinnevärlden idag förekommande totalsystem utan baseras på en tänkbar och möjlig vidareutveckling av olika delsystem vilka kan spåras tillbaka i den pågående tekniska evolutionsprocessen. I kapitel 4 ges exempel på några av de taktiska fördelar som kan erhållas med detta koncept vid ett samordnat anfall mot ett antal olika typer av rörliga markmål.

Två viktiga delkomponenter i spelkorten är Laserbaserad retrokommunikation och 3 D laserradar. En utförligare teknisk presentation av dessa följer i kapitel 4 respektive kapitel 5.

3.1 Bärrobotsystemet "TAURUS Transporter".

Som bärrobot har här en utvecklad variant av TAURUS-systemet (KEPD 350) kommit till användning, benämnd "TAURUS Transporter", med bland annat nedanstående fyra lastalternativ.

- MOMAS (12 st.)
- EURAAS (8 st.)
- SKAVAT (2 st.)
- AFORMIN (4 st.)

I studien har vi framför allt utnyttjat det andra lastalternativet, åtta stycken subrobotar av typ EURAAS. Systemkombinationen kan utnyttjas för insats mot såväl fordon som fartygsmål samt RF-emitterande måltyper, t.ex. spanings- eller eldledningsradar.

"TAURUS Transporter" kan bäras, transporteras och avfyras från en flygande vapenbärare exempelvis JAS 39 Gripen, alternativt förses med startraketer som medger utskjutning från en fordonsmonterad marklavett (jfr NEMESIS-projektet).

"TAURUS Transporter" räckvidd överensstämmer i princip med KEPD 350, men vid beräkning av total systemräckvidd bör hänsyn tas till subrobotarnas uppträdande efter det att dessa avsondrats från bäraren.

"TAURUS Transporter" målsökarsystem utgörs av en IR-målsökare integrerad med en laserradar, där de två funktionerna utnyttjar en gemensam apertur. För samband med omvärld-

den utnyttjas huvudsakligen ett speciellt laserlänksystem och som reservalternativ en RF-länk när den optiska länkens prestanda begränsas av nedsatt sikt.

Anm. Laserlänksystemet medger frisiktskommunikation och ett ömsesidigt informationsutbyte med såväl extremt hög bandbredd som hög länksäkerhet och utgående från siktstatistik oftast med en god tillgänglighet.

Data och prestanda (Endast för studien relevanta storheter redovisas här.)

Marschfart, anflygningsfas:	850 km/h (240 m/s)
Marschfart, "UAV-mod":	540 km/h (150 m/s)
Anflygningshöjd:	c:a 30 m över underliggande terräng
Minsta svängradie:	150 m (sustained turn) vid farten 150 m/s

Laserradar

Lasertyp	Diodpumpad YAG eller fiberbaserad laser
Våglängd	1,06 alt. 1,5 μm
Lasereffekt (medeleffekt)	0-25 W
Pulslängd	1-3 ns
Pulsenergi	50-125 μJ
Avsökning	Parallellscan + möjlighet till pekning, zoommod.
Scanner	Galvanometerstyrd spegel+vätskekristall för fin-
avsökning i zoommod över målkandidat	
Scannerfrekvens spegel	80 Hz
Finavsökning i zoommod	10x10 m ² med en uppdatering av 25 Hz.
Lasermottagare	5 cm mottagaröppning
	Detektorarray, 10 element

IR/CCD sensor

Täckning TV/CCD (färg)	1°x0,75° - 14°x10°
Täckning IR:	2°x1,5° - 20°x15°
Vinkelupplösning:	0,1 mrad
Teknik IR	Okyld bolometertyp, kameravikt 1-2 kg
Temperaturupplösning	< 100 mK

Positionering

GPS, alt. Terrnav utnyttjande lasermätt topografi

Kommunikation

Huvudalternativ	Laserlänk (balanserat system eftersom målsensorerna är optiska)
Reservalternativ	RF länk (p.g.a. röjnings och störrisk)

Laserkommunikationslänk

Lasereffekt	1-10 W
Lasertyp	Laserdiodarray
Laserlob	160°x30°
Lasermottagare	
Optik	Hemosfärisk, 3 cm i diameter
Detektor	Fotodiod

Anm. Eftersom det troligen är viktigt med full duplex mellan robotarna har de var sin sändare och mottagare.

Robotarna kan förses med retromodulator som tillåter att de om de laserbelyses t.ex. från marken, kan modulera tillbaka en reflekterad stråle med den information som de har lagrat eller just för tillfället samlar in.

3.2 Subrobotsystemet "EURAS"

EURAS (EUROpean Autonomous Attack System) är ett turbojetmotordrivet subrobotsystem vilket försetts med ett målsökarsystem av laserradartyp som med hjälp av en avancerad målsökaralgoritm, i kombination med ett medfört målbibliotek, vid bekämpningstillfället väljer en måltypsrelaterad stridsdelsmod. För att roboten även skall kunna komma till användning mot emitterande RF-mål har målsökaren försetts med integrerad anordning vars mottagarantennerna utgörs av alternativt:

- Farkostintegrerade konforma antenner.
- Tre kring målsökaraperturen, med 120° inbördes vinkelförskjutning, framåtriktade antennspröt för fasjämförande inmätning av inkommande RF-signaler, jfr RAM (Rolling Airframe Missile).
- Ett "fraktalt antennsystem" med möjlighet till fasjämförande inmätning inom ett brett frekvensområde.

Upp till åtta stycken EURAS kan bäras av en TAURUS Transporter.

Farkostdata

Längd:	0,8 m
Spännvidd:	1,0 m (utfällda vingar)
"Startvikt":	45 kg
Stridsdelsvikt:	7 kg

Farkostprestanda

Flyghastighet:	540 km/h (150 m/s)
Flyghöjd:	50-600 m
Max flygtid:	20 min (motsvarande 120km flygsträcka)
Minsta svängradie:	150 m (sustained turn) vid farten 150 m/s

Laser/IR/CCD system

Stråkbredd:	Flyghöjdsberoende (ung. lika med flyghöjd)
Avsökning:	Framför farkosten (upp till 1000 m) eller rakt under
Måldetekning:	IR/CCD alternativt laser eller kombination
Måligenkänning:	I huvudsak laser (3-D) med stöd av IR/CCD (ATR=Aut. Target recognition)
Signalbehandling ATR:	Storleksmätning (till 0,1 meter noggr.), Orientering, särdragsextraktion, 3-D modellmatchning i medfört målbibliotek
Lagring av terrängdata	För senare användning i uppdaterade högupplösta (10 cm) terrängdatabaser över stridsfältet. Länkas via laser alt. RF-länk till fpl/hkp/UAV i området eller till markstation.
Verkansutvärdering (BDA):	Sensordata länkas via UAVer till ledningssystemet.
<u>Kommunikation:</u>	Laserlänk
Samverkan:	några 10-tal robotar
Max samverkansavstånd	5-8 km, väder- och terrängberoende
Kommunikationsinnehåll	ID varje rb, position, detekterade måltyper, mål-
position, verkansverifiering, lagrade	terrängdata i batchsändning.

Stridsdel:

Av multifunktionstyp med tre olika verkansformer, mot aktivt pansar respektive bepansrade mål och mjuka mål: "stretching rod", "slug", och splitter.

3.3 Övriga lastalternativ till Taurus Transporter**3.3.1 MOMAS – Modulariserat Obevakat Nätbildande Marksensorssystem**

MOMAS är en marksensor av multifunktionstyp avsedd för luftlandsättning. Ett stort antal sensorer sprids ut ur bäraren och faller/styrs med hjälp av GPS till av bäraren utpekade platser. Därefter upprättas automatiskt kontakt med varje MOMAS inom räckvidd och därigenom utgör varje MOMAS en nod i ett marksensornät. Kommunikation mellan marksensorerna sker med frekvenshoppande högfrekvensradio i likhet med den kommersiella standarden Bluetooth.

Varje MOMAS är utrustad med både en riktningskänslig akustisk sensor och en vibrations-sensor. Vidare är varje MOMAS utrustad med en optisk retromodulator för laserlänkkommunikation med externa agenter såsom bäraren eller UAVer.

Upp till tolv stycken MOMAS kan bäras av en TAURUS Transporter.

3.3.2 SKAVAT – Superkaviterande korthållstorped

SKAVAT är en, i sökfasen elmotordriven och under anfallsfasen raketdriven, superkaviterande optofiberstyrd korthållstorped i 150 kg-klassen som efter fällning från TAURUS

Transporter (JAS 39 Gripen) fallskärmsbromsas före medieväxling samt på vattenytan kvarlämnar en antennboj avsedd för länkförbindelse med övriga substridsdelar och operatör. Denna antennboj är utrustad med samma kommunikationssystem som bäraren men kommunicerar med torpeden via en optisk fiber.

Upp till två stycken SKAVAT kan bäras av en TAURUS Transporter.

3.3.3 AFORMIN – Avståndswerkande fordonsmins system, ”Sixpackback”.

AFORMIN är ett avståndswerkande fordonsmins system som förpackats i en ”sixpackback”. Varje ”sixpackback” är försedd med en GPS-styrd glidfallskärm. Beroende på vald fällhöjd kan mins systemets täckningsområde varieras. Sixpackbacken landar i närheten av ett område som skall bevakas och skjuter sedan in marksensorer till området. Marksensorerna är av samma typ som MOMAS men saknar radiolänk, dessa kommunicerar med sixpackbacken via fiber för att inte röja sig. När ett fordon kommer in i bevakningsområdet lobbar sixpackbacken in målsökande stridsdelar i riktning mot målet.

Sixpackbacken är utrustad med samma kommunikationssystem som bäraren för att rapportera läge och status.

Upp till fyra stycken AFORMIN kan bäras av en TAURUS Transporter.

3.4 SpaningsUAV-systemet ”CASTOR”

CASTOR är en kolvmotordriven spaningsUAV som baseras på en tänkbar vidareutveckling och anpassning av UAV-systemet ”SEASCAN A/B” [6].

Valet av SEASCAN som utgångspunkt för en tänkbar vidareutveckling mot ett förbandssatt system i tidsperspektivet 2010-2015 har skett mot bakgrund av dels systemets relativa litenhet, dels dess möjligheter att operera under mycket långa aktionstider. Till detta kan läggas två jämförelsevis okomplicerade startmetoder i kombination med en enkel och innovativ metod för återfångst av UAVn efter fullgjort uppdrag. Sammantaget innebär dessa faktorer att UAV-systemet relativt enkelt bedöms kunna transporteras och operera från dels plattformar av typ (hemvärnsmannens/-kvinnans) personbil med takräcksmonterad startlavett och återfångstanordning, dels (Marinens eller Kustbevakningens) fartyg eller båtar (t.ex. Stridsbåt 90). De sistnämnda måste dock utöver fångstanordningen förses med en inte alltför utrymmeskrävande pneumatisk katapult av teleskoptyp.

CASTOR-systemet är i första hand avsett som ett enskilt uppträdande spaningsUAV-system men kan vid behov även samverka med en eller flera identiska UAV-individer, i svärm eller flock för att lösa spaningsuppgifter över hav eller mot mål i underliggande terräng. Laserlänken medger även att CASTOR kan ingå som en icke stridsdelsbärande flockmedlem tillsammans med länkbärande EURAAS-robotar

Ännu ett tänkbart exempel/scenario är att utnyttja ett antal CASTOR som en flygande kedja av relästationer för att därigenom skapa en möjlighet att med extrem bandbredd och länksäkerhet upprätta samband, samt utöva direkt verksamhetsledning, över långa avstånd.

Option 1. Vid diskussion med företrädare för Hägglunds Vehicle pekade vi på möjligheten att ett framtida enhetsfordon av SEP-typ (Skyddad Enhets Plattform), som utrustats med såväl katapult som fångstanordning samt en kassett innehållande 9- 12 stycken UAVER av CASTOR-typ, därmed skulle kunna utgöra ett exempel på en markrörlig basresurs för systemet.

Option 2. Mot bakgrund av att CASTOR-systemets begränsade fartresurser men, från flera utgångspunkter, fördelaktig långa aktionstid ställs vi inför problemet att över stora avstånd snabbt komma fram till och påbörja verksamhet i spaningsområdet. En möjlig lösning syns därför vara att CASTOR med hopfällda vingar förpackas i en speciell "UAV-kapsel" avsedd att hängas i en yttre vapenbalk på ett stridsflygplan. Därigenom skulle en eller flera CASTOR snabbt kunna flygtransporteras till och fällas över ett insatsområde. Efter fällning bromsas respektive kapsel med hjälp av en fallskärm till en lämplig fart där CASTOR frigörs, fäller ut vingarna, startar motorn och påbörjar tilldelat uppdrag. Efter fullgjort uppdrag återvänder CASTOR med distansekonomisk fart till utgångsbasen alternativt till någon annan av operatören vald landningsplats.

Farkostdata

Spännvidd:	3,1 m
Längd:	1,2 m
Vingyta:	0,75 m ²
Framkantpilvinkel:	23°
Kroppsdiameter:	0,2 m
Max lastförmåga:	7,5 kg (inkluderar nyttolasten sensor- och sambandsystem plus bränsle). Anm. Viktförhållandet mellan nyttolast och bränsle påverkar väsentligen uttagbar aktionstid.

Transportförpackning: (L x B x H) = 2,0 x 0,5 x 0,4 m (= Motsvarar ett kassettutrymme vid transport i ett specialfordon avsett för att operera med ett antal UAV:er).

Energiförsörjning: 70 W startgenerator plus en batterienhet som i samband med en avsiktligt "tyst" glidflykt kan strömförsörja de för uppgiftens lösende väsentliga systemen och därefter medge återstart av drivmotorn.

Farkostprestanda

Fartintervall:	100-180 km/h (~ 25-50 m/s)
Max flyghöjd:	5 km
Stighastighet:	5 m/s
Glidtal:	1:25
Minsta svängradie:	30 m (sustained turn) vid farten 40 m/s
Aktionstid:	> 15 h

Sensorsystem

Alt 1. IR/CCD sensor

Täckning TV/CCD (färg)	1°x0,75° - 14°x10°
Täckning IR:	2°x1,5°-20°x15°
Vinkelupplösning:	0,1 mrad
Teknik IR	Okylad bolometertyp, kameravikt 1-2 kg
Temperaturupplösning	< 100 mK

Alt 2. QinetiQ's "VLADIMIR" (Very Large Array Demonstration Imager for InfraRed) [7]

Den engelska forskningsorganisationen QinetiQ utvecklar för närvarande ett intressant gimbalupphängt IR-kamerasystem med dubbla bildfält, avsett att ingå som bildsensor i UAV-systemet "OBSERVER". IR-kameran är försett med två parallellt riktade linssystem med olika brännvidd, samt två okylade detektorarrayer. Ett "chopper-system" växlar mellan arrayerna och de två bilderna sänds växelvis till en mottagare där de genom överlagring och bildbehandling presenteras på en bildskärm på sådant sätt att bildens centrala delar har en högre upplösning än dess periferi.

Positionering

GPS, alt. Terrnav utnyttjande lasermätt topografi

Kommunikation

Huvudalternativ	Laserlänk (balanserat system eftersom målsensorerna är optiska)
Reservalternativ	RF länk (p.g.a. röjnings och störrisk)

Laserkommunikationslänk

Lasereffekt	1-10 W
Lasertyp	Laserdiodarray
Laserlob	160°x30° grader
Lasermottagare	
Optik	Hemosfärisk, 3 cm i diameter
Detektor	Fotodiod

Anm. Eftersom det troligen är viktigt med full duplex mellan robotarna har de var sin sändare och mottagare.

UAVerna kan förses med retromodulator som tillåter att de om de laserbelyses t.ex. från marken, kan modulera tillbaka en reflekterad stråle med den information som de har lagrat eller just för tillfället samlar in.

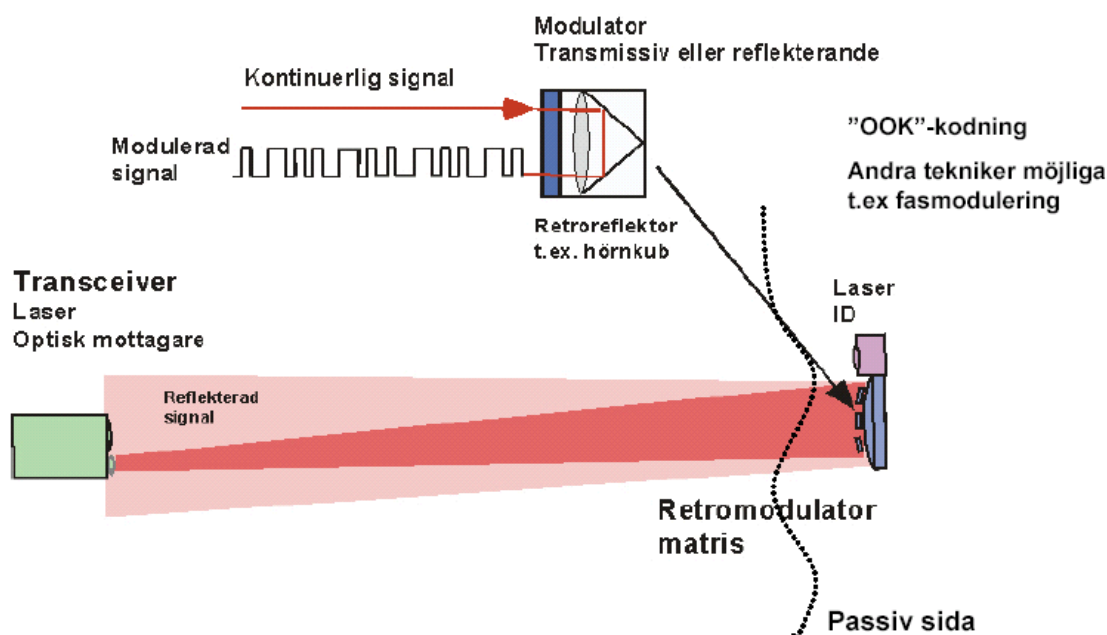
4 Laserbaserad retrokommunikation

4.1 Allmän beskrivning

Kommunikationssystem kommer att ha en central roll i det nätverksbaserade försvaret (NBF). En dimensionerande del kommer att vara möjligheten att tillhandahålla taktiska kommunikationslänkar med höga krav på kapacitet, tillgänglighet, robusthet samt smygegenskaper. Detta kommer att kräva kommunikationstekniker som ligger i teknologisk framkant och som kan kombineras i nätverk. Laserkommunikation är en systemkomponent som innehåller fördelar som t.ex.:

- Mycket höga datatakt
- Mycket hög störtålighet
- Mycket goda smygegenskaper.

Laserbaserad retrokommunikation erbjuder en attraktiv utformning av laserkommunikationslänkar. Principen framgår av figur 1. En kontinuerlig laser belyser en retroreflektor (t.ex. hörnkub eller trafikreflex) där det reflekterade ljuset moduleras genom att någon yta i reflektorn ändrar sin transmission eller reflektion. Med hjälp av en elektrisk insignal styr man modulationen av det reflekterade ljuset. En tänkbar modulationsteknologi kan baseras på halvledarkomponenter (s.k. kvantbrunnsstrukturer) där den teoretiskt möjliga bandbredden kan vara upp emot 1 Gbit/s eller andra tekniker som vätskekristaller (bandbredd upp till 100 kbit/s).



Figur 4.1 Principen för retrokommunikation.

Några fördelar med retrokommunikation relativt konventionella laserlänkar är:

- Endast en sändar/mottagarmodul med tillhörande tracker.
- Enklare länketablering.
- Retromodulatorens kan göras mycket kompakt och effektsnål ($< 10 \text{ g}$, $< 100 \text{ mW}$).
- Potential för tillverkning av ett mycket billigt system som lämpar sig väl för UAV, bojar m.m. samt även för den enskilde soldaten.
- Modulatorenheten kan även användas för bruten siktlinje (i reläfunktion) så att flera mottagare kan observera samma UAV eller samma punkt på en vägg t.ex. för att få information.
- Systemet kan kombineras med icke-mekanisk strålsökning och stabilisering som ytterligare kan användas för att förbättra systemprestanda b.l.a. m.a.p. länkens tillgänglighet (adaptiv optik m.m.).
- Retrokommunikation kan med fördel integreras i andra laser- och EO system t.ex. optikspanare, DIRCM ("Directed Infrared Countermeasures"), siktessystem, attackpodar etc. Det man tar till vara är befintliga lasermottagare, följesystem, IR kameror etc. som tillåter snabb inriktning av den belysande lasern samt mottagning av den reflekterade modulerade strålen.
- I en enklare form kan retromodulatorens användas för IK.

För att säkerställa att retroreflektorn är dold för obehöriga kan man tänka sig att den är försedd med något "lock" som tas bort efter mottagning av viss kod som sänds antingen med radio eller med laser. Man kan även ha tillämpningar där den är optiskt öppen med där den belysande laser ger autencitet samt kommando över vad som skall sändas, t.ex. lagrade data, realtidsdata etc.

Man kan också tänka sig en enklare retromottagare där en modulator placeras i fokalplanet efter en lens. Med hjälp av retroreflexen kan information överföras. Här används en modulator med liten area ($< 1 \text{ mm}^2$), vilket tillåter mycket höga överföringshastigheter (Gbit/s). Tillämpningen är en stationär (t.ex. tillfälligt utplacerad) retromottagare. Nackdelen med en fokalplansreflektor är det smala synfältet, vilket kräver hög peknoggrannhet hos sändar/mottagarenheten.

Ny teknik för icke-mekanisk strålstyrning (t.ex. med optiskt fasmodulerande arrayer) kan medge avsökning och strålstabilisering med hög precision, vilket reducerar lasereffekt behovet.

4.2 Prestanda

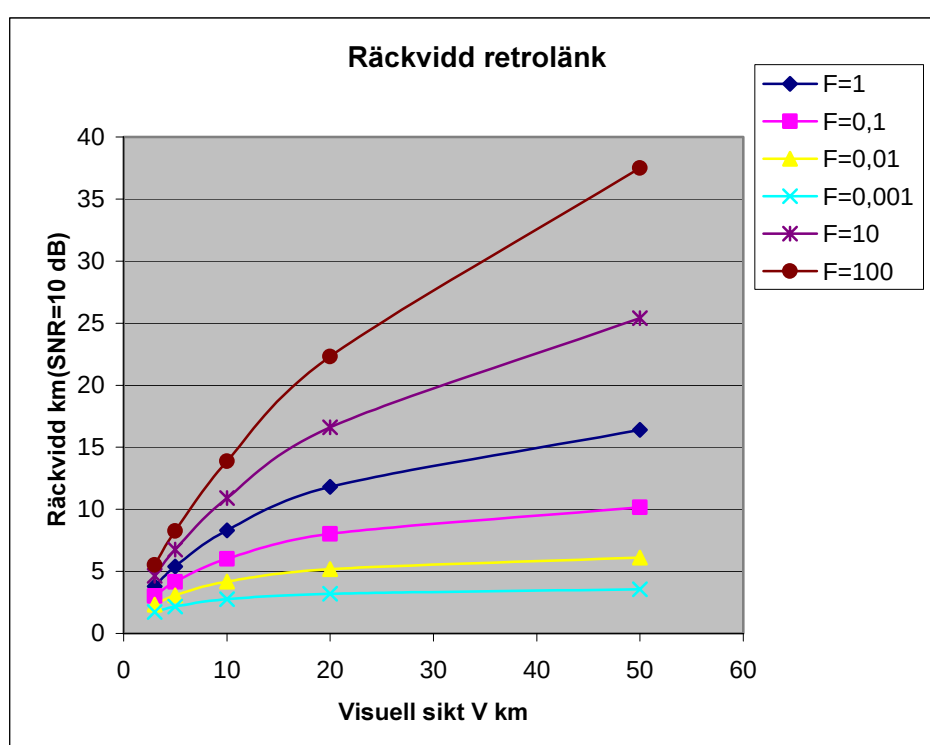
Räckvidd

För ett kvalificerat system med kapacitet motsvarande avsnitt 4.3 nedan (1 W laser, stråldivergens 1 mrad.) erhålls följande räckvidder:

Visuell sikt	Räckvidd mot retrolänk (dag+sol, natt)
3 km	3.8 km, 4.5 km
5 km	5,5 km, 7 km
10 km	8 km, 10 km
20 km	11 km, 17 km
50 km	16 km, 21 km

Tabell 4.1 Räckvidd för kvalificerad retrolänk

För andra system kan man skala räckvidder enligt nedanstående diagram. Faktorn $F=1$ har satts för ovanstående data och $F<1$ anger motsvarande faktorför sämring och $F>1$ förbättring. F är proportionell mot lasereffekt, lasermottagarens area, laserreflektorns storlek, samt omvänt proportionell mot utgående och reflekterad stråles divergens i kvadrat etc.



Figur 4.2 Räckviddsdiagram för retrolänk som funktion av visuell sikt. Faktorn $F=1$ med data enligt tekniska data nedan. $F<1$ anger sämre och $F>1$ bättre prestanda.

Överföringshastighet

Upp till 1 Gbit/s i framtiden, idag 10 Mb/s. BER < 10⁻⁵

Länketablering

Den belysande lasern inriktas med hjälp av annan information t.ex. via visuell, IR eller radarinformation. Man kan tänka sig olika nivåer för inriktningen:

- Manuell inriktning, typ kikare för korthållskommunikation (1-3 km)
- Lasern sammonteras med existerande siktesplattform och följning sker via TV/IR-tracker. Exempel från fartyg till UAV.

- Lasern har en egen avsökning inom ett smalt (upp till 1-2 grader) synfält anvisat av TV/IR eller radar. Lasern söker och låser automatiskt mot reflektorn. I detta fall kan ny teknik för icke-mekanisk strålstyrning bli intressant (se nedan).
- Lasern sammonteras med ett lasersystem med egen förmåga till spaning och länketablering genom detektion av retroreflex, t.ex. DIRCM samt flygburen djupsonderande laser typ "Hawk-Eye".

Tid för länketablering (efter målinvisning) < 1 sekund.

4.3 Tekniska data

Nedanstående tabell ger tekniska data för en tänkt retrolänk. För beteckningar hänvisas till laser/optroniklitteraturen.

Parameter	Värde	Parameter	Värde
Lasereffekt [W]	1	Bandbredd Bw [Hz]	$1,0 \times 10^{-9}$
Stråldivergens [mrad]	1	NEP [W/Hz ^{1/2}]	$0,19 \times 10^{-12}$
Pekjitter [mrad]	0,33	NEP _{det}	$6,00833 \times 10^{-9}$
Sändaraperturdiam- [m]	0,03	FOV _m -[mrad]	2
Våglängd [μm]	0,8	Δλ (filter)-[nm]	1
Mottagardiameter- [m]	0,1	H _λ [W/sr/nm]	0-sol
Retrodiameter [m]	0,1	Resp [A/W]	0,4
Retrovinkel –[mrad]	0,03	Mgain-detektor	135
Optikförlust	0,5	K _{eff} -detektor	0,005
Vis sikt V-km	Var.	F-detektor	2,65762963

Tabell 4.2 Tekniska data för tänkt retrolänk

Vikt och volym

Retromodulator < 10 gram, elektrisk effekt < 100 mW. Flera retromodulatorer kan behövas för att täcka större delen av hemisfären samt reducera inflytande av scintillationer (fading) p.g.a. turbulens i atmosfären.

Lasersändare/lasermottagare: Manuell inriktning, diodlaser samt detektor som byggs in i handhållen kikare. Laserns uteffekt c:a 10-100 mW. Totalvikt kikare < 1-2 kg.

Laser i siktesplattform med länkavstånd upp till 10-15 km. Lasereffekt 1-10 W. Laserenhet/mottagare 1-2 liter, 2-3 kg.

Lasersändare inmonterad i DIRCM eller andra lasersystem-samutnyttjad mottagare/laser < 1 kg.

Prisuppskattning

Retromodulatorenheter: < 10 kkr vid utveckling av många enheter.

Laser/mottagarenhet: 300 kkr exklusive följesystem.

4.4 Utvecklingsläget

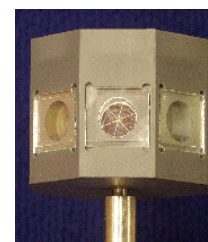
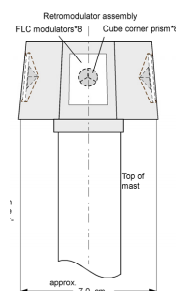
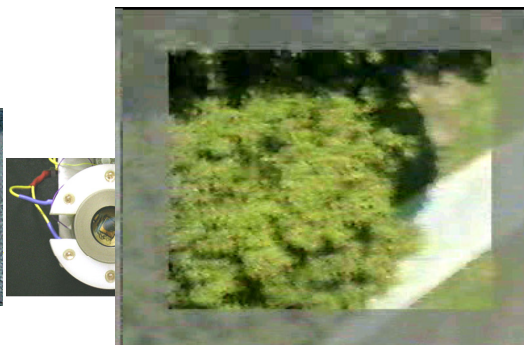
Retrokommunikation

NRL har visat retrokommunikation i systemtillämpning för UAV(se bilder nedan). FOI/Acreo/CTH tar fram en teknisk demonstrator inom fotonikprogrammet. Sverige har f.n. så vitt vi vet världsrekord i hastighet (17 Mbit/s) och kontrast hos modulatern.

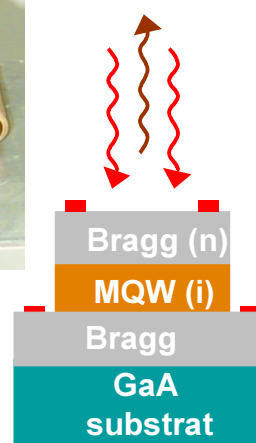
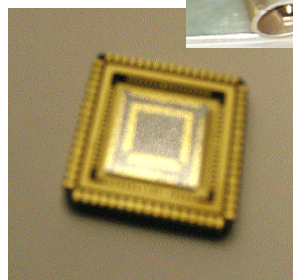
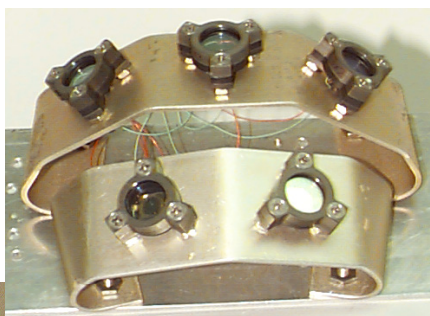
Retrokommunikation - demo i internationellt samarbete



Naval Research Labs (NRL) fältförsök: 1-1/2 meter UAV med monterad retromodulormatris (fem element) fungerar som fyr för följning samt dataöverföring.



Retromodulator (FLC-teknik)
att sätta på boj till havs (FOI)



Figur 4.3 Utveckling av komponenter och demo av retrokom vid NRL och FOI samt Acreo.

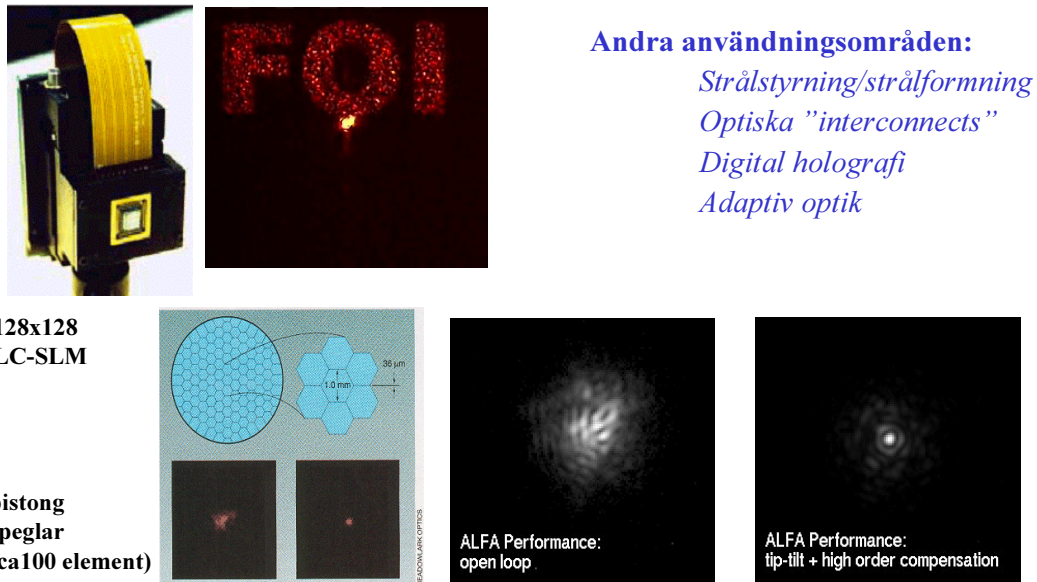
Icke mekanisk strålstyrning.

Icke mekanisk strålstyrning via optisk fasstyrning motiveras bl.a. av:

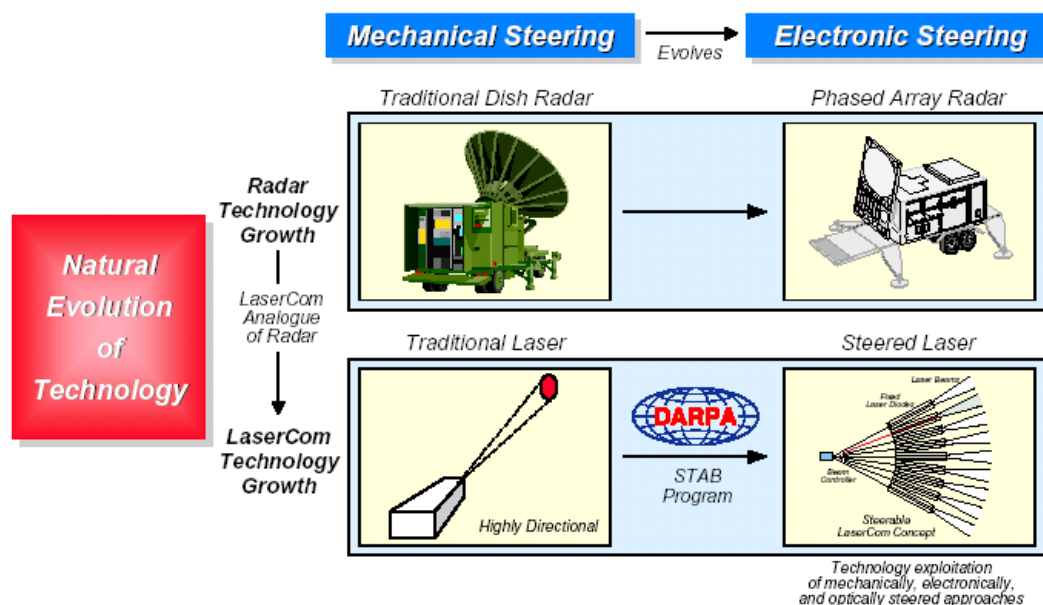
- Inga rörliga delar
- Låg vikt och volym
- Generering av multipla strålar
- Snabba (1 μ s möjligt)
- Låg effektförbrukning.

Optisk fasstyrda arrayer har många användningsområden, bl.a. adaptiv optik, multipel strålgenerering, elektronisk fokusering etc. Jämför mikrovågsteknik med digitala gruppantennar.

SLM - generisk teknologi som kan användas till mycket



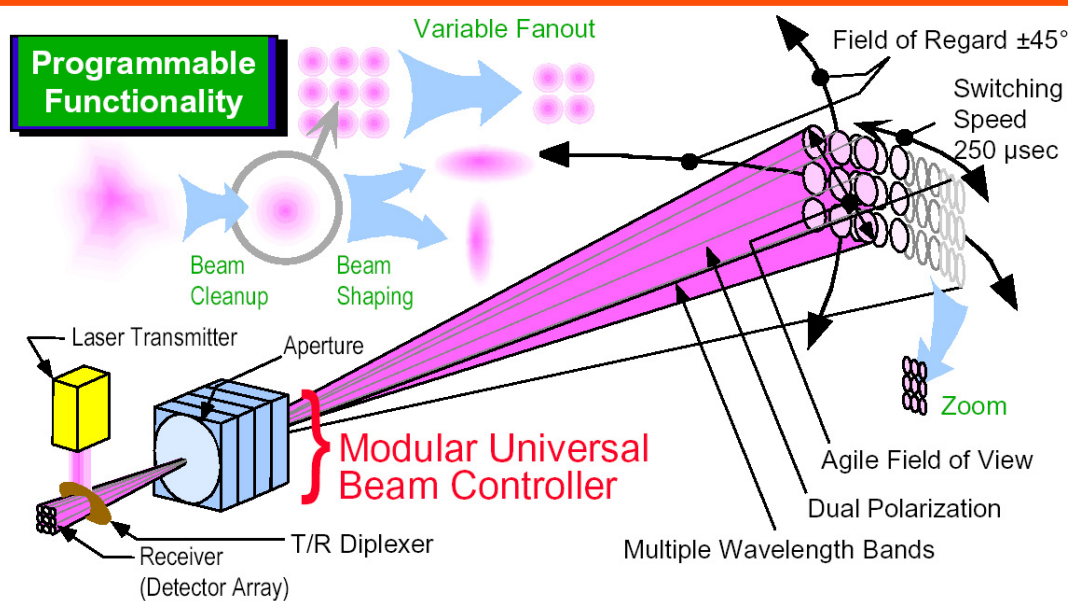
Figur 4.4 Överst FOI strålstyrningsexperiment, under andra strålstyrningsenheter med SLM teknik för strålpekning och strålförbättring (kan även användas för förbättring av upplösning i passiva system).



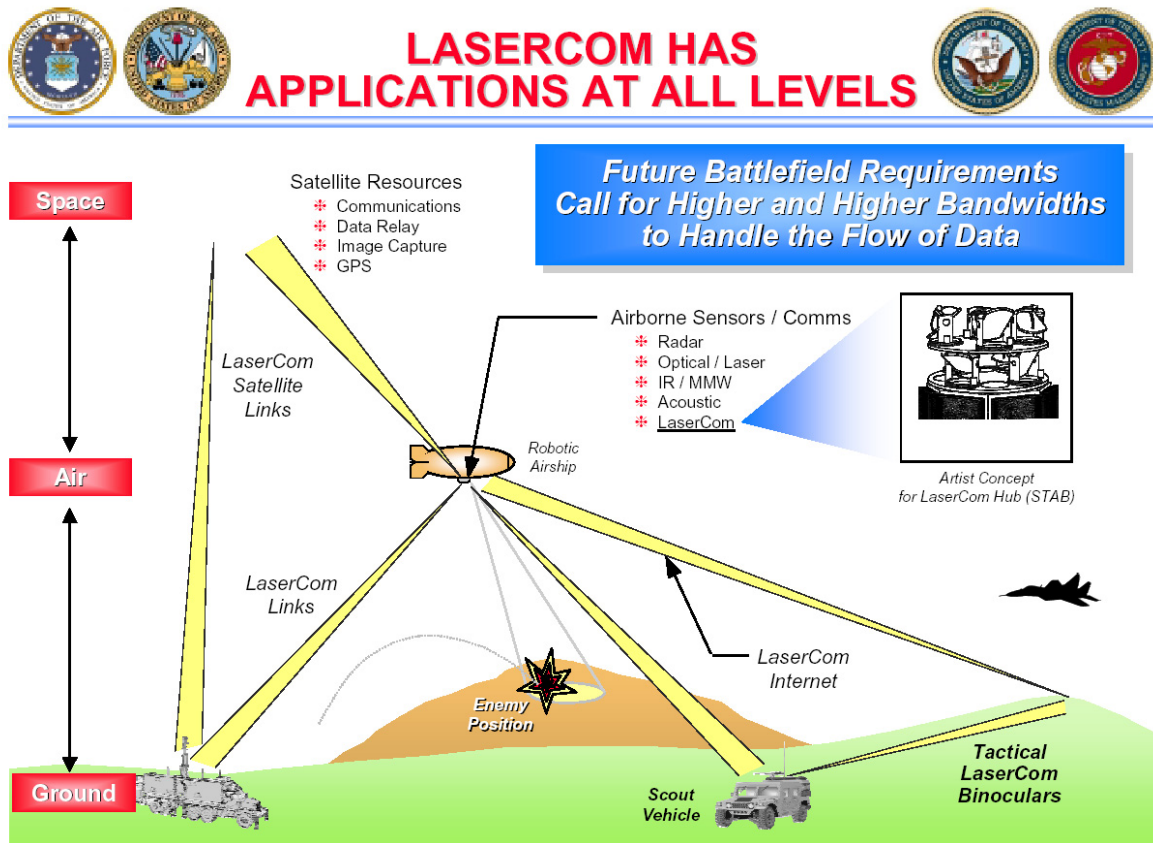
Figur 4.5 Illustration av parallell mellan optik och mikrovågsteknik avseende fasstyrning[8].

UBC Performance Goals

Raytheon
AIR / MISSILE DEFENSE SYSTEMS



Figur 4.6 Raytheon koncept för icke mekanisk strålstyrning[8].



Figur 4.7 Exempel på utnyttjande av laserkommunikation[8].

5 3 D Laserradar

5.1 Motiv för 3 D laserradar

Ett problem med passiva optiska sensorer för måligenkänning är att bakgrundssignatur och klotter varierar, vilket gör att sensorn blir känslig för atmosfärs effekter (vind, temperatur) och skillnader beroende på solens läge. IR-sensorer ger fördelar i mörker men är begränsade avseende upplösning över längre avstånd (>3 km), då stor optik krävs (>20 cm) tillsammans med många pixlar (hög pixelnoggrannhet) i fokalplanet. Passiva optiska sensorer är också relativt enkla att störa ut med lasrar och andra ljuskällor. Användandet av laserbaserade sensorer kan röja användaren, men rätt avpassad belysning (låg kontinuerlig effekt – koherent teknik; hög tillfällig effekt – enskilda pulser) kan denna risk reduceras. Sensorn är också svårare att störa ut då sensorelementen endast behöver vara aktiverade/exponerade under belysningen. I offensiva tillämpningar uppvägs röjningsrisk av stora fördelar som t.ex. penetration av vegetation, kamouflage, erhållandet av avståndsinformation, 3D-avbildning, vibrationssignaturer, m.m. Aktiv hyperspektral information (färg på natten) + 3 D är speciellt intressant vid användning i mörker.

En laserradar kan avbilda omgivningen med cm upplösning vilket leder till helt nya förmågor. Vi skall kommentera några av dessa som är relevanta för UAV.

Automatisk måligenkänning

Som en tumregel krävs 200 pixlar över målet och 15-20 cm avtåndsupplösning i längsled samt 40 cm tvärupplösning för robust ID [9]. Beroende på använd mottagaroptik och laserprestanda kan detta realiseras ut till 10-20 km om så är nödvändigt. Följande egenskaper gör 3 D avbildning attraktiv för ATR.

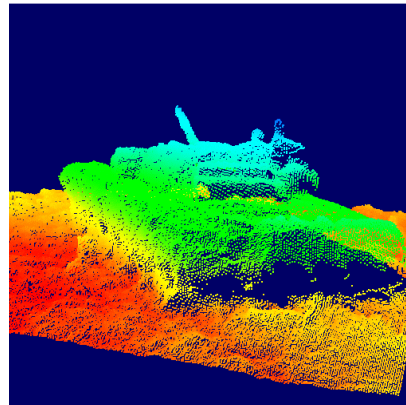
- Målets storlek och avståndsinnehåll är robust signatur till skillnad mot termisk IR eller TV-system som är beroende av sol/skugga etc.
- Man erhåller målets aspekt vilket snabbt reducerar korrelationsproblemet mot målbiblioteket.
- Robust mot existerande motmedel.

Processering är robust – en av de få tekniker som visat sig fungera i reella tillämpningar [10]. Template matchning samt fingeravtryck mäter karakteristiska måldimensioner ned till cm-nivå.

Nya/andra förmågor med 3 D avbildning (upplösning $<10-20$ cm)

- Ger hotriktning till fordon, LV etc.
- Tillåter detektion samt igenkänning av "svåra mål" – under vegetation, i skugga, bakom rök och eld etc.
- Lämplig för skillnadsdetektion som spaningsform.

- Underlättar styrning och navigering speciellt lågflygning i terräng och bebyggelse.
- Förstärkt syn (augmented vision) – innebär att man överlagra andra data till den scen som en aktiv eller passiv sensor för tillfället betraktar. Ett konkret exempel kan t.ex. vara en UAV som kan ”se” i nedsatt sikt, även på längre håll, genom att dess FLIR eller TV bild överlagras en syntetisk 3 D scen där stationära eller rörliga mål erhållna från andra sensorer kan markeras. 3 D informationen kan införas från en databas eller ev. införas ”on line” från en laserradar från samma plattform eller en framförvarande plattform.
- Ökar drastiskt möjligheten att agera i realistiska högupplösta syntetiska omgivningar som kan användas för noggrann uppdragsplanering.
- Tillåter noggrann målinmätning och styrning mot en optimal träffpunkt på målet, antingen via semiaktiv laserpekning eller laserledstrålestyrning alternativt via 3 D sensor i målsökaren.
- För mindre synfält kan ”FLASH” 3 D fokalplanearray (FPA) ge full 3 D bild på någons – alltså inga hårda krav på bildstabilisering p.g.a. plattformsvibration.



Figur 5.1 Högupplöst 3 D bild av stridsvagn.

5.2 Teknikläget

En översikt av teknik för laserbaserad 3 D avbildning är under utgivande [11].

Scannande system

Scannande laserradar finns i ett stort antal konfigurationer för civil terrängkartering. Kompakta militära versioner finns bl.a. i LOCAAS samt i ett antal andra projekt för UAV och robottillämpningar. Ett flertal system för civil kartering finns på marknaden, och intresset ökar.

Den laserpulsenergi som krävs för att få markekon från några hundra meters höjd ligger för en typisk mottagarstorlek (5-10 cm) kring 10 μJ . Från detta kan vi uppskatta den nödvändiga medellaseffekten för att uppnå en viss sonderingstäthet, säg 16 punkter per m^2 , och viss avsökningshastighet.

Vi antar att vi har ett stråk som är 0.7 x flyghöjden. För 100 km^2/h och 16 punkter/ m^2 krävs c:a 1 W i lasereffekt, en relativt blygsam siffra. Från 300 meters höjd motsvarar detta en flyghastighet på 132 m/s (475 km/h).



Figur 5.2 Exempel på en typisk civil terrängkarteringslaser. System med laserpulsfrekvenser upp emot 100 kHz finns på marknaden. Bild Optech Inc. Kanada.



Figur 5.3 Syntetisk vy i 3 D genererad med hjälp av flygburen scannande laserradar (Top Eye) och datafusion med fotografi. Bild – FOI Lasersystem.

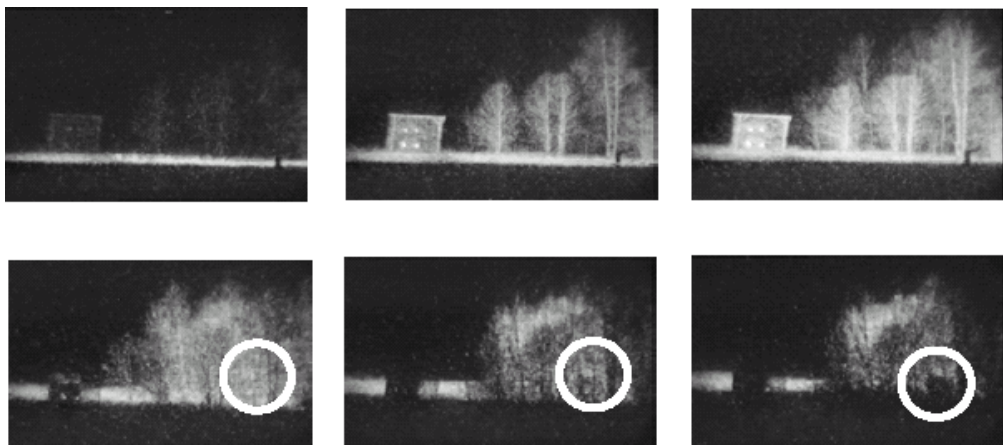
I Figur 5.2 visas ett exempel på ett kommersiellt laserscansystem och i Figur 5.3 exempel på en högupplöst (c:a 10-15 cm) syntetisk omgivning av Kvarn utanför Linköping. Omgivningen är uppbyggd från laseravståndsdatabaser och en matchad textur från ett flygfoto samt vissa digitalfoton.

2 D/3 D avbildning utan scanning

Tidstyrda bildförstärkarrör används för att uppnå bl.a. långräckviddig måligenkänning. Principen brukar benämnas grindad avbildning (gated viewing, GV) Genom att glida med kort grindlucka kan man generera 3 D avbildning av målet. Det finns numera rör som är känsliga för den ögonsäkra laservåglängden 1.5 μm .

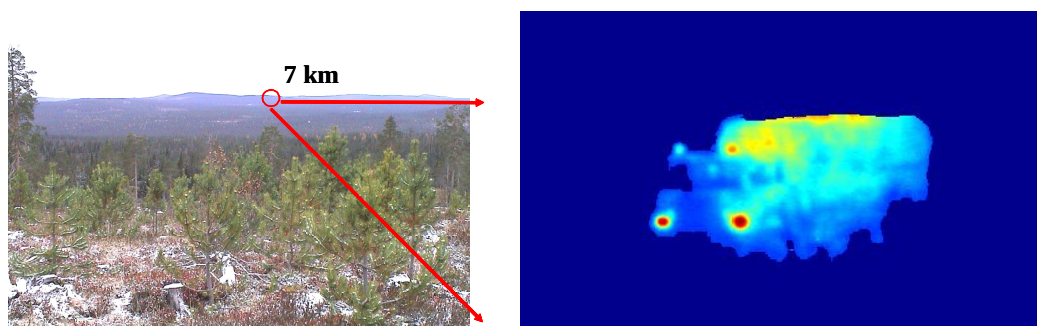
För 2 D avbildning kommer räckvidden att begränsas av visuell sikt, laserpulsenergi, mottagarstorlek och mottagarkänslighet. Typiskt kan räckvidder upp till dubbla siktavståndet uppnås. En passiv CCD sensor registrerar kontrast och har en räckvidd som begränsas av visuell sikt. I ett tidsgrindat system är det den inherent mål-bakgrundskontrasten som är relevant eftersom kontrastförlust p.g.a. atmosfären ”grindas bort”.

Förmåga att se in ”i terrängen” med grindad avbildning illustreras i Figur 5.4. Här ser vi hur grindluckan successivt flyttas in mot skogsdungen och avslöjar mål inne i dungen (terrängbil). Dessutom visas hur ett fordon bakom ett kamouflagenät avslöjas bl.a. genom de starka reflexer som de släckta strålkastarna ger upphov till.

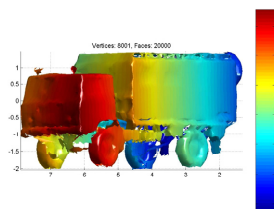


Figur 5.4 Bilder med ett GV system. Bild FOI [11].

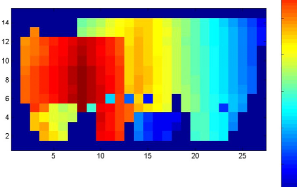
Ett antal successiva grinluckor användas för att bygga upp en 3 D bild som underlättar för automatisk måligenkänning. Det krävs c:a 200 pixlar på målet och 15 cm avståndsupplösning för att nå goda resultat med ATR utnyttjande 3 D [12]. I Figur 5.5 nedan illustreras hur detta kan se ut med ett exempel från ett GV försök från Älvdalen.



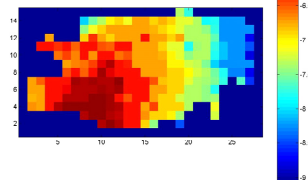
Bibliotekshögupplöst



Sampla ned

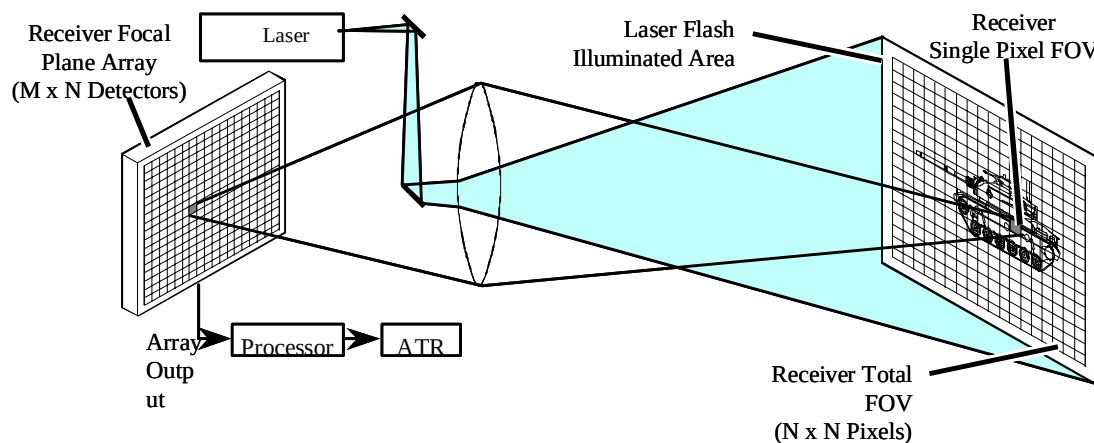


Matcha mot mätt

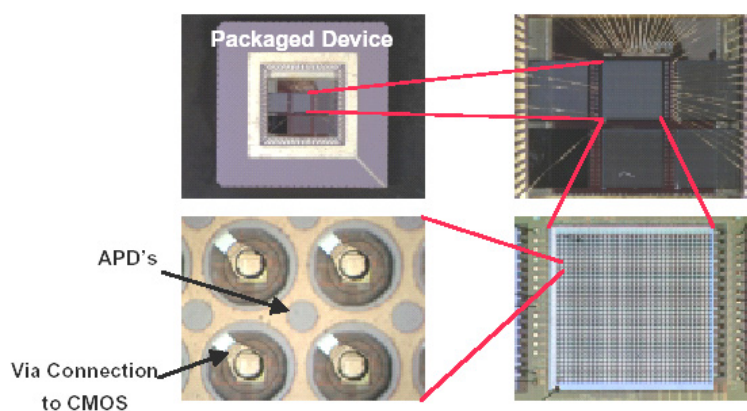


Figur 5.5 Överst t.v. en vy över Älvdalen med mål i terrängen. I exemplet visas hur en terrängbil (efter viss bildbehandling) kan ses av en operatör. Notera personen inne i bilen. En IR kamera med samma optikstorlek skulle inte ha kunnat ge denna upplösning.

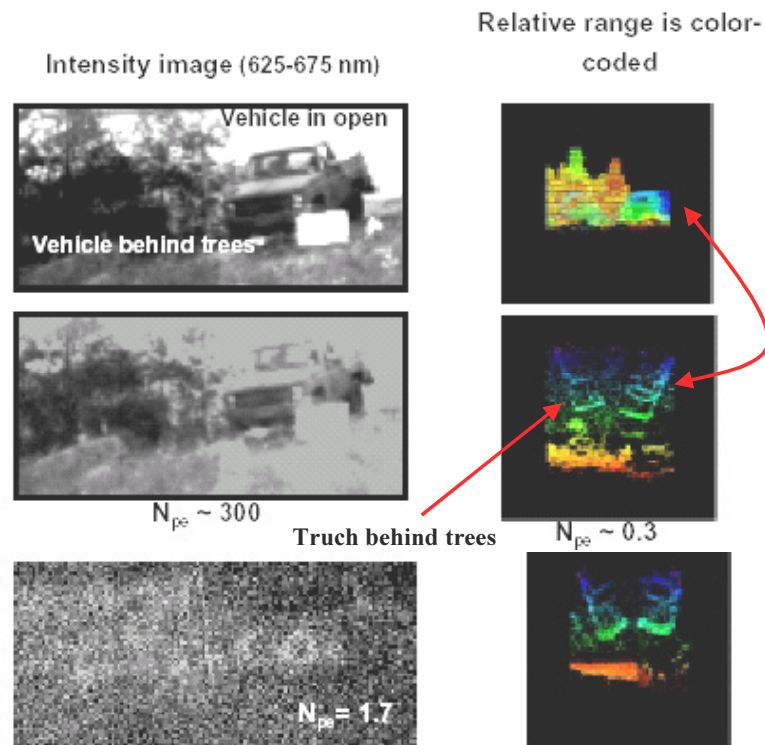
På sikt kommer 2 D avbildning med grindad teknik att ersättas av full 3 D avbildning. En intensiv utveckling av 3 D avkännande arrayer pågår bl.a. i USA och är under uppstart i Europa. I kommande FOI rapport [11] har prestanda för en 3 D FPA array beräknats byggande på resultat från laboratorieprototyper främst från USA. Principen för 3 D array visas i Figur 5.8. Exempel på utförande visas i Figur 5.9.



Figur 5.6 Principen för 3 D avbildning med avståndsavkännande fokalplane-array (3 D FPA), bild Raytheon [13].



Figur 5.7 Exempel på en 3 D FPA baserad på s.k. avalanchefotodiodmartis (APD). Figuren visar en 32*32 array från Lincoln Laboratories [14].

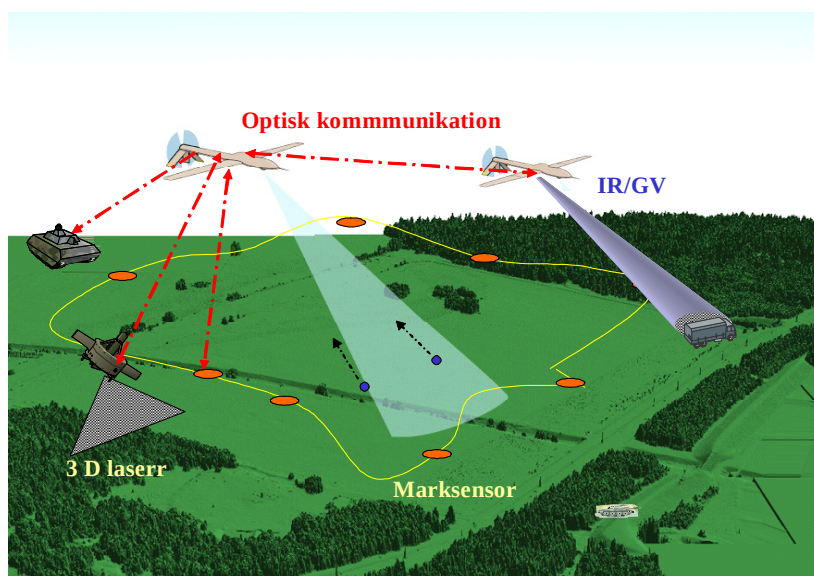


Figur 5.8 Bilder från TV CCD (t.v.) samt en 3 D FPA array t.h. Notera hur i princip ett enda laserskott kan ge en 3 D bild som kan roteras och lätt avslöjar fordonen bakom buskaget. För vidare diskussion se texten nedan.

I Figur 5.8 visas ett exempel från passiva och aktiva bilder från Lincoln Lab⁹. Den visar t.v. CCD och t.h. en avståndsbild med färgkodat avstånd. Notera hur avståndsbilden kan roteras och avslöja de båda fordonen bakom buskaget. I TV-CCD bilden är bara det ena fordonet synligt. Notera även hur mycket känsligare man kan göra laserdetektorarrayen visavi TV CCD:n som använder dagsljus. Genom tidsstyrd förstärkning kan APD-arrayen göra så känslig att man kan "räkna fotoner" i varje pixel. Parametern N_{pe} refererar till antal fotoelektroner/pixel/frame. Bilderna motsvarar av en sammanlagring av 200 frames. För CCD:n erhålles en godtagbar bild ned till $N_{pe} \approx 300$ fotoner medan laserbilden är fullt användbar ned till $N_{pe} \approx 0.3$ fotoner.

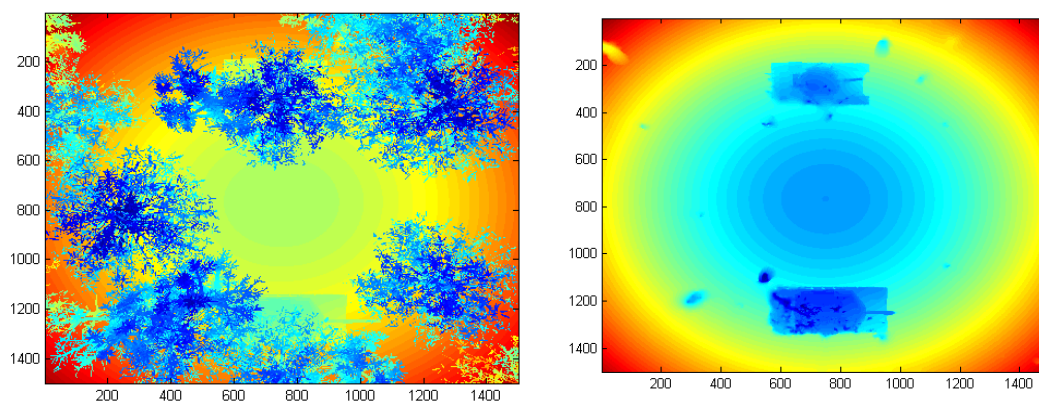
Utveckling av 3 D FPA pågår på flera företag och lab i USA. I Europa har utvecklingen just startat. Låt oss ge några exempel på vad som är möjligt med 3 D FPA. Figur 5.9 ger en vision av ett sammanbundet nät av högflygande radar-UAV med GV för målidentifiering på långa håll samt när-UAV för målidentifiering, eldledning, följning och verkansverifiering. Samverkan kan även tänkas ske med marksensornät.

UAV-svärmar-laserkom-laserr +marksensornät

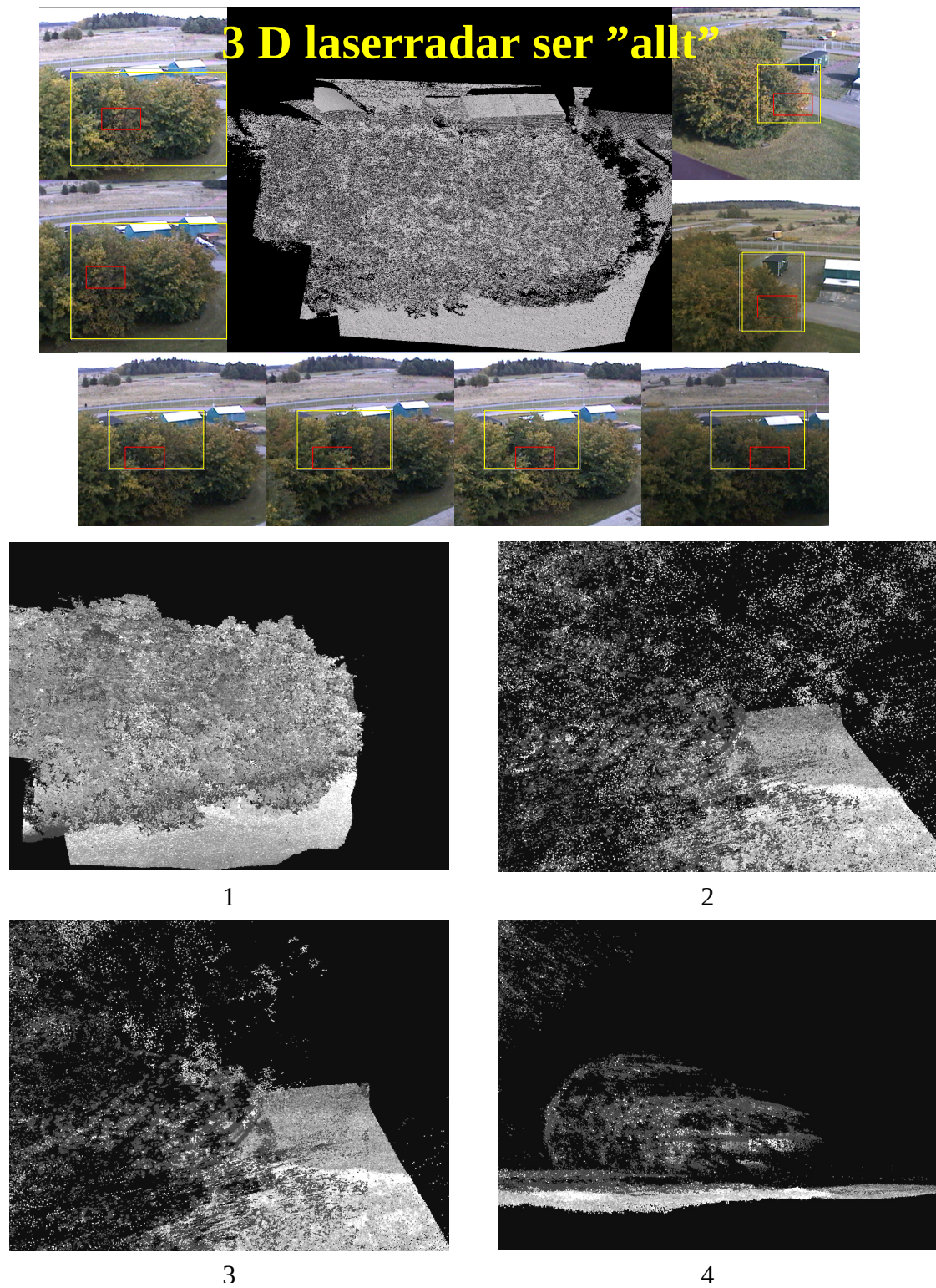


Figur 5.9 Ett tänkbart UAV koncept med högtflygande UAV utrustad med lågfrekvensradar som lokaliserar potentiella mål och små UAV med IR och laserradar som målidentifierar, eldleder och utför verkansverifiering.

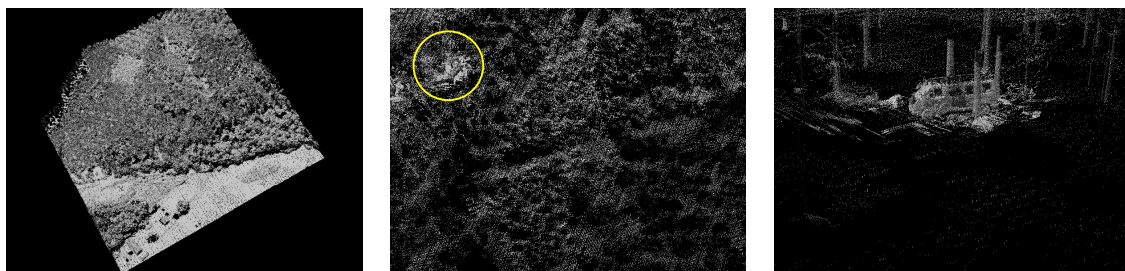
Med en högupplösande laserradar kan UAVn filtrera bort skylande träd och buskage och frilägga mål genom att utnyttja 3 D filtreringsmetoder. I Figur 5.10 visas ett simulerat exempel och i Figur 5.11 och Figur 5.12 exempel från riktiga data upptagna på FOI med scannande laserradarsystem.



Figur 5.10 T.v. en simulerad avståndsbild från en UAV baserad laserradar. T.h. Visas hur den filtreringsalgoritm som utvecklats vid FOI lasersystem kan användas för att "ta bort" vegetation.

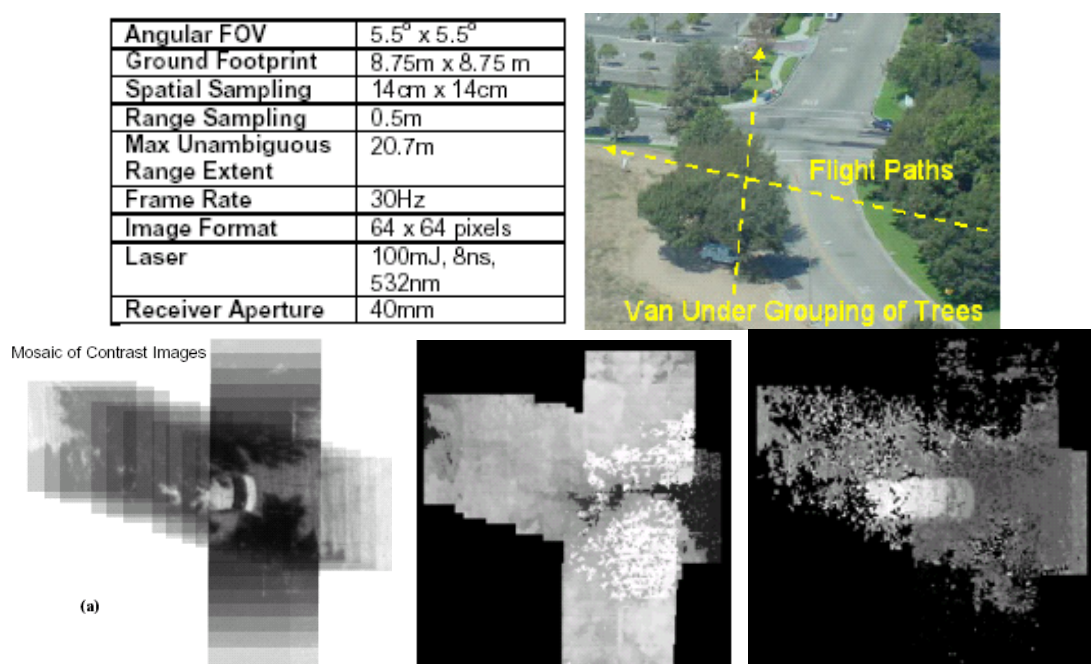


Figur 5.11 Sekvens av 3 D laserradarbilder från olika vyer ger möjlighet att se vad som befinner under den täta dungen genom att kombinera multipla vyer. Bild FOI med scannande laserradar (ILRIS 3 D, Optec).



Figur 5.12 Exempel på 3 D data från Top Eye och ILRIS 3 D illustrerande hur en UAV kan flyga över med en laserradar för ett dels kartera terräng men även att upptäcka mål. Data FOI från Tönnersjö.

En genomgång av laserradarteknik för UAV m.a.p. på vegetationskartering [15] (även relevant för måligenkänning) återfinnes i en nyligen publicerad FOI rapport som även jämför lasersensorer, passiva EO sensorer och lågfrekvent radar. Teknik för 3 D FPA har nyligen börjat demonstreras för vegetationspenetrerande laser radar via multipla vyer, se Figur 5.13. I detta exempel har man råkar använda grön laser – i taktiska tillämpningar kommer 1.06 eller 1.56 μm förmodligen att användas.



Figur 5.13 Exempel på mål under träd detektion med 3 D FPA teknik. Överst scen och systemparametrar, under (från vänster till höger) konsekutiva laserskott med tillhörande bilder, i mitten först eko som ger toppen på trädkronorna och t.v. sista ekot som synliggör bilen undre den täta vegetationen. Från Gelbart et.a. [16]

6 Scenario – Robotattack mot mekaniserad fiende

Vi skall nu utnyttja valda delar av spelkortet från kapitel 3 i ett scenario, där vi vill göra en insats mot en mekaniserad fiende som tidigare har landstigit i Kapellskär. Scenariot är en vidareutveckling av ett scenario som har utnyttjats i FOI-projektet FoRMA för att studera framtida ledningssystem på bataljonsnivå inom ramen för ett framtida Nätverksbaserat Försvar, NBF [17]. En förteckning av de i figurerna använda förbandssymbolerna finns i Bilaga 1.

6.1 Krigsutbrottet

Tidpunkten för scenariot är maj 2020. Spänningen i Östersjöområdet har successivt ökat under ett antal år. En omfattande marinövning öster om Gotland har pågått under några dagar, med aggressivt uppträdande mot svenska fartyg. Beredskapshöjningar har skett vid de svenska förbanden.

Krigsutbrottet sker kl 17.00, då ett antal parallella händelser inträffar:

- Ballistiska robotar anfaller prioriterade mål - ledningsplatser, aerostater, flygbaser m.m.
- ”Trojanska hästar” landar på Arlanda (sabotageförband) resp. landstiger i Kapellskär (en förstärkt mekanisera bataljon).
- El- och telekablar till/från Gotland bryts.
- Den fientliga sjöstyrkan O Gotland angriper svenska ytstridskrafter samt påbörjar landstigningsoperation mot Gotland.
- Omfattande telekrigsinsats mot Sverige.

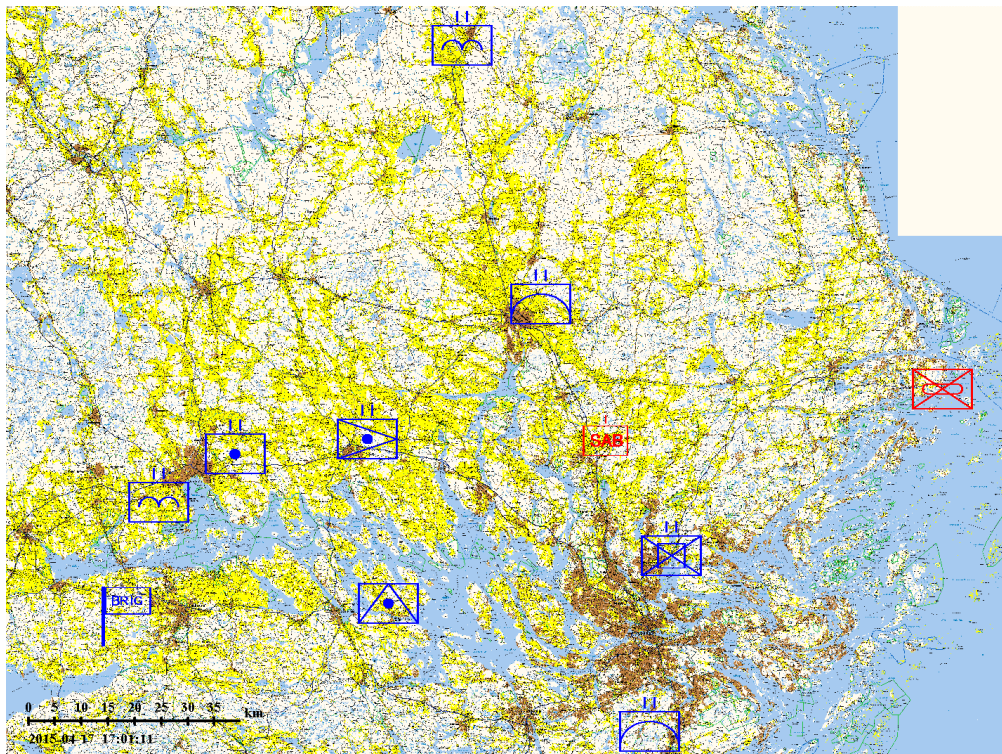
Lite senare inleds ett omfattande luftangrepp mot Sverige med kryssningsrobotar och attackflyg.

Situationen i Roslagen

Svenska enheter som kan sättas in mot fienden i Roslagen är för närvarande ganska få. En brigad är under gruppering i området, dock är endast ett fåtal förband operativa i detta läge.

En mekaniserad bataljon befinner sig på övning norr om Stockholm. Denna får i uppdrag att slå fienden i Kapellskär. Bataljonen har möjlighet att efter begäran erhålla understöd från markrobotförbandet utanför Strängnäs.

Hemvärnet på Rådmansö larmas. Man har dock små möjligheter till vapeninsats mot en mekaniserad fiende, varför den primära uppgiften i detta skede blir att spana mot fiendens framryckning.



Figur 6.1 Läget vid krigsutbrottet

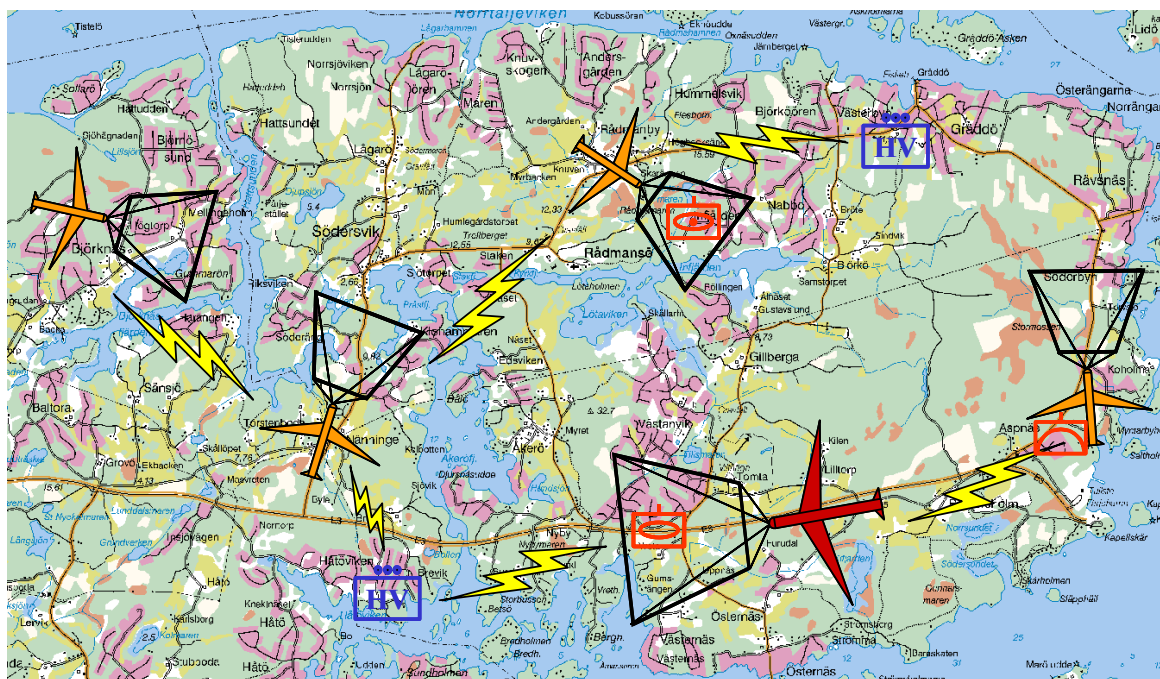
6.2 Underrättelseinhämtning

Över Östersjön befinner sig vid krigsutbrottet tre större UAvér av Predator-typ utrustade med spaningsradarer. En av dessa får order att flyga mot Kapellskär för att spana mot den landstigna fienden.

Den svenska bataljonen norr om Stockholm förfogar över små UAvér, CASTOR (se kapitel 3), utrustade med optiska sensorer för spaning i närområdet. Fyra sådana skickas omedelbart mot Rådmansö och anländer samtidigt som den större UAVn flyger in över området.

På grund av fiendens telekrigsinsats störs den större UAVns radiolänk ut i samma ögonblick som den påbörjar spaningen över hamnområdet i Kapellskär, och markstationen förlorar kontakten med UAVn. Även bataljonen får svårt att styra sina UAvér.

Samtliga UAvér, den stora såväl som de små, är emellertid också utrustade med laserkommunikationslänkar, som vid fri optisk sikt kan överföra data med hög bandbredd på flera kilometers avstånd, och som är betydligt svårare att störa ut. När kontakten med markstationerna bryts övergår de fem UAVerna i en autonom styrmod, upprättar ett lokalt flygande nätverk och överför sensorinformation sinsemellan. Intermittent ges också möjlighet att via laserkommunikationslänken överföra information till hemvärnsförbanden på marken, och därmed förse försvarets nätverk, härafter benämnt Nätverket, med aktuell sensorinformation. Det räcker alltså med att en av UAVerna får kontakt med en markstation för att samtliga UAvér data skall överföras till Nätverket. Vi förutsätter här att Nätverket i övrigt är tillräckligt robust mot fiendens telekrigsinsats i scenariot.



Figur 6.2 UAVer i nätverk. Informationen förmedlas mellan UAVerna och till hemvärnsgrupper i området, som i sin tur överför informationen till försvarets Nätverk.

UAV-spaningen, i kombination med underrättelser från hemvärnets markobservationer och andra underrättelsekällor, fastställer att fienden i Kapellskär utgörs av en mekaniserad bataljon, förstärkt med tungt luftvärn och med tillgång till stridsvagnar och långskjutande artilleri. Dess uppgift antas vara att säkra hamnen i Kapellskär och framryckningsvägarna mot Norrtälje, för att kunna landstiga med nya trupper.

6.3 Robotinsats

Den svenska mekaniserade bataljonen norr om Stockholm har påbörjat sin framryckning mot Norrtälje. Med UAVernas underrättelseinformation som grund gör bataljonschefen bedömningen att fiendens styrka är så stor att han inte kan slå honom enbart med sina egna resurser. Han begär därför målbekämpning med markrobotförbandet i Strängnäs - subrobotar mot främst fiendens artilleri, stridsvagnskompani och skyddande luftvärnsförband.

Bataljonschefens begäran om insats går via OPIL (Operativa Insatsledningen), som ger eldtillstånd med fyra TAURUS Transporter.

Med hänsyn till fiendens styrka bedöms följande mål finnas i området och vara av intresse för markrobotinsatsen.

Stridsvagnar	10 st	(5 st observerade)
Stridsfordon	48 st	
Artilleripjäser	12 st	
Luftvärnsbatterier	6 st	

Utöver dessa enheter finns en stor mängd transportfordon, där några kan utgöra alternativa mål för insatsen, t.ex. bränsletransporter.

Uppdragsplanering

Markrobotförbandet i Strängnäs har noggrant följt händelseförloppet efter krigsutbrottet och analyserat olika insatsalternativ. När insatsordern kommer från OPIL är därför redan robotsystemet försett med en grov uppdragsplan, och de kan avfyras omedelbart. De fyra Taurus Transporter robotarna är bestyckade med totalt tjugofyra EURAAS-robotar. De bär också med sig tolv MOMAS marksensorsystem för att förstärka spanings- och kommunikationsresurserna i området. Lastfördelning på bärrobotarna är

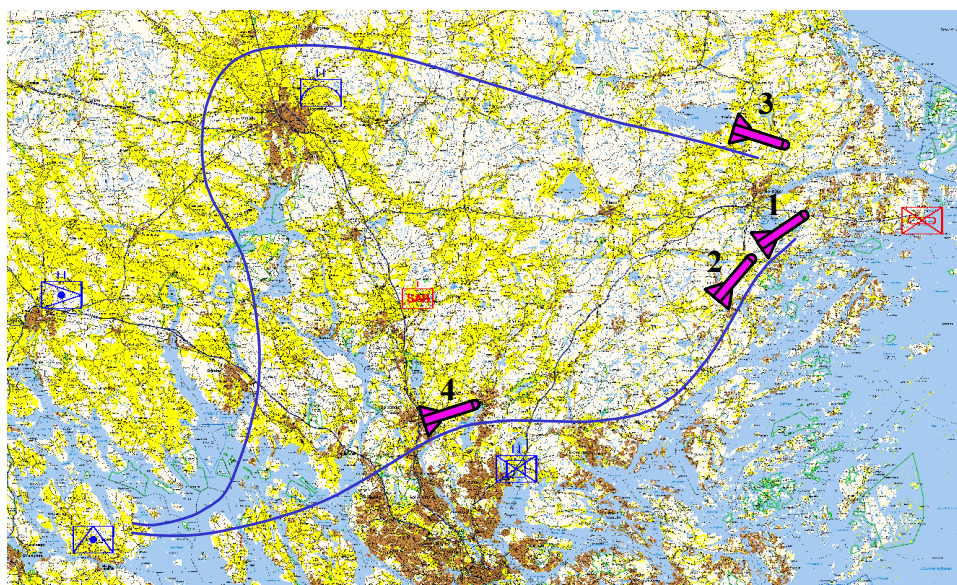
Bärrobot 1 - 4 st EURAAS, 6 st MOMAS

Bärrobot 2 - 8 st EURAAS

Bärrobot 3 - 6 st EURAAS, 3 st MOMAS

Bärrobot 4 - 6 st EURAAS, 3 st MOMAS

Under anflygningsfasen, då operatörerna kan kommunicera med robotsystemet via radiolänk, förfinas sedan uppdragsbeskrivningen. Robotarna förses med olika handlingsalternativ beroende på vilka mål som identifieras under sökfasen. Uppdragsplanen kan modifieras så länge som kontakten med robotsystemet bibehålls. Robotsystemet förses också fortlöpande med uppdaterad underrättelseinformation från Nätverket för att kunna agera autonomt när förbindelsen med markstationen bryts.

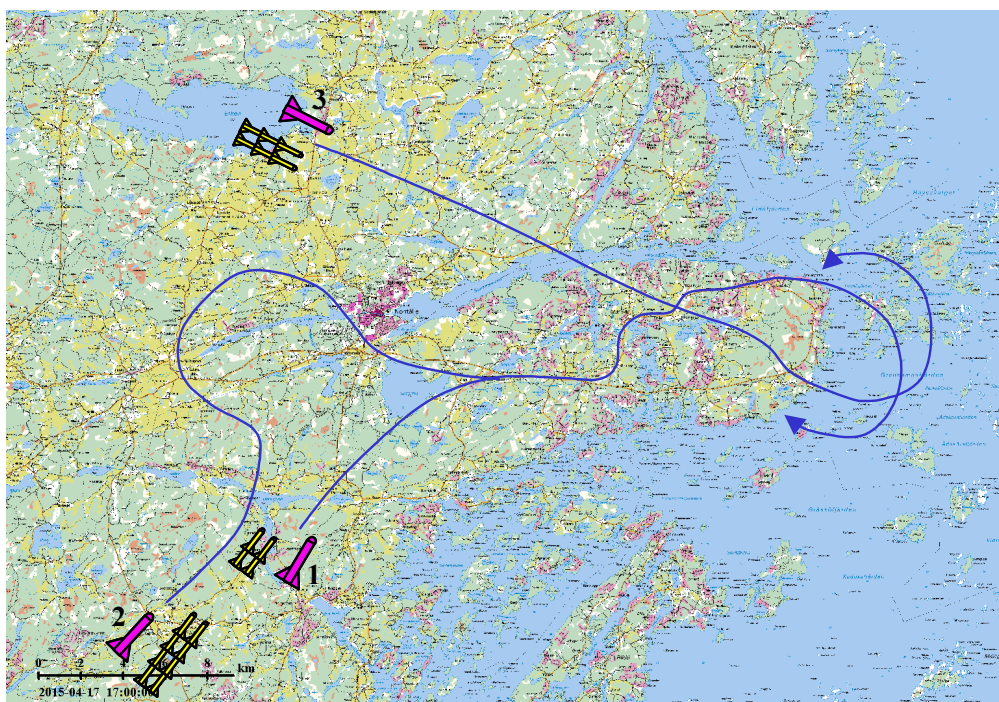


Figur 6.3 Uppdragsplanering - Bärrobotarnas anflygningsväg till målområdet.

Anflygningsfasen

Fem minuter efter avfyrning närmar sig robotarna målområdet. Bärrobotarna som hittills följt de planerade banorna mot målområdet avsöndrar nu sina subrobotar och formerar sig för anfall. Bärrobot 1 går upp något på höjd och flyger in över målområdet för att skapa en sista lägesbild över den tidigare identifierade stridsvagnskolonnen längs vägen. Denna robot bär också med sig sex MOMAS-system, som släpps vid lämpliga platser. Därefter följer de tolv subrobotarna från bärrobot 1 och 2 som genom samverkan fördelar målen sinsemellan för maximal verkan. Bärrobot 2 genomför en fördröjningsmanöver för att genom att öka sin flygsträcka återansluta en bit bakom robotgruppen, med uppgift att resultatspana och skicka

hem underlag för en verkansvärdering. Strax norrut har bärrobot 3 tagit täten mot det grupperande artilleriet följt av sina sex subrobotar. Någon minut bakom följer bärrobot 4 som ännu inte släppt sina subrobotar.



Figur 6.4 Avsöndringspunkter för subrobotar och planerad målspaning.

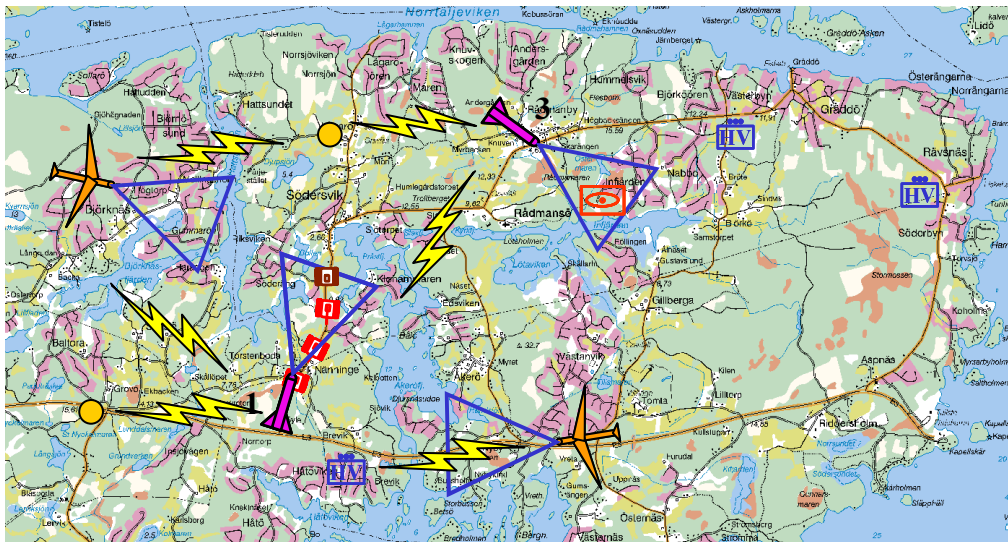
Målspaning

När bärrobotarna avsöndrat sina subrobotar utnyttjas deras sensorer för målsökning över området. Robotarna fungerar i detta läge i princip som ”engångs-UAVer”, förutom att de fortfarande har uppgiften att fälla MOMAS-systemen på lämpliga platser. Målsökningsbanor har beräknats vid uppdragsplaneringen med utgångspunkt från den lägesbild som tidigare erhållits med UAV-spaningen. Avsikten är att tillsammans med de spaningsUAVer som fortfarande är operativa i området uppdatera och förmedla lägesbilden till subrobotarna innan de når in i målområdet för att kraftigt reducera sökområdet för dessa.

Ett par spaningsUAVer har överlevt fiendens motåtgärder under den tidigare spaningen och opererar fortfarande över Rådmansö. Dessa plattformar är utrustade med en likadan laserkommunikationslänk som subrobotarna och bärrobotarna och kan därför bidra till robotsystemets totala lägesuppfattning. SpaningsUAVerna kan också via länken erhålla en sökbana från robotsystemet och kan direkt delta i målsökningsfasen.

Under målsökningsfasen överförs sensorinformationen kontinuerligt mellan bärrobotar och UAV via laserkommunikationslänkarna, så att samtliga plattformar har tillgång till den samlade lägesbilden. Så fort subrobotarna befinner sig inom kommunikationslänkens räckvidd överförs lägesbilden även till dessa.

Vid strategiska platser släpper bärrobotarna sina MOMAS marksensorsystem. Dessa kan också utnyttjas som relästationer för informationsöverföringen, eftersom de också är försedda med laserkommunikationslänkar. Information från marksensorerna kompletterar informationen från efterföljande bärrobotars sensorer vid verkansvärderingen och kan också utnyttjas för målinmätning för subrobotarna från bärrobot 4.



Figur 6.5 Målsökning - utbyte av sensorinformation.

Under målspaningen bekämpas bärrobot 3 av fiendens luftvärn. Detta luftvärn var inte tidigare känt, men bärrobotens sensorer hinner dock registrera avfyrningsplatsen för luftvärnsrobotarna och eldledningsradarns position. Informationen förmedlas till övriga robotar via laserlänken innan den blir utslagen. Bärroboten hinner också släppa sina sista MOMAS, som också förses med informationen. Ifall inte de övriga robotarna hinner uppfatta målangivelserna kan inkommande subrobotar erhålla dessa via marksensorsystemets laserlänk.

Bärrobot 3's sex subrobotar som släpptes precis utanför målområdet har erhållit de inmätta positionerna för eldledningsradar och robotlavett. De omplanerar nu sin insats och styr mot dessa positioner utöver det grupperande artilleriet med fiberstyrda robotar. Även ytterligare en spaningsUAV går förlorad över Kapellskär men även denna hinner mäta in och förmedla luftvärnets position. Dess signaler fångas upp av en hemvärnsman som kan reläa informationen vidare via det fiberoptiska marktelenätet.

Målfördelning

När subrobotarna anländer till målområdet har bärrobotarna hunnit uppdatera hela lägesbilden. Ett stort antal mål har identifierats och tilldelats en prioritetsordning. Robotsystemet gör nu en preliminär målfördelning mellan subrobotarna, där hänsyn tas till värdet av varje mål och sannolikheten för de individuella robotarnas förmåga att slå ut målet. Målfördelningen måste också ta hänsyn till robotarnas möjlighet att samverka för att slutligen identifiera och mäta in respektive mål.



Figur 6.6 Målfördelning mellan grupper av subrobotar.

Figuren ovan visar de viktigaste målen i scenariot som har identifierats under målsökningsfasen. På vägen nordväst om den sprängda bron över Åkeröfjärden har åtta stridsvagnar med två medföljande luftförsvarsvagnar liknande Tunguska-M1 rekognoserats. Nordost om dessa har två grupperande artilleriställningar med fiberstyrda robotar identifierats samt en luftvärnsställning inmätt av bärrobot 3 innan den blev bekämpad.

Målfördelningen resulterar i att de 12 subrobotarna från bärrobot 1 och 2 slår mot stridsvagnskolonnen och de två luftförsvarsvagnarna. De gör en samlad insats där de går mot en stridsvagn vardera och två och två mot luftförsvarsvagnarna. Dessa anfalls från två riktningar för att omöjliggöra bekämpning av båda subrobotarna. En kort tid efter anfallet följer bärrobot 2 som genomför en snabb resultatspaning och måluppdatering.

Samtidigt som anfallet mot fordonskolonnen sker anflyger de sex subrobotarna från den bekämpade bärrobot 3 från nordväst. Två av dem går mot luftförsvarsställningen medan de övriga fyra subrobotarna delar upp sig på grupper om två som samtidigt slår mot varsin av artilleriställningarna.

Efter det första robotanfallet anländer en grupp om sex subrobotar till målområdet. Dessa subrobotar har avsöndrats från bärrobot 4 och skall nu få sina mål tilldelade med hjälp av den nya lägesbilden inhämtad bl.a. från de tidigare bärrobotarnas iakttagelser. När de första subrobotarna har hunnit verka kan dessa nu styras mot de mest lämpliga av de kvarvarande målen.

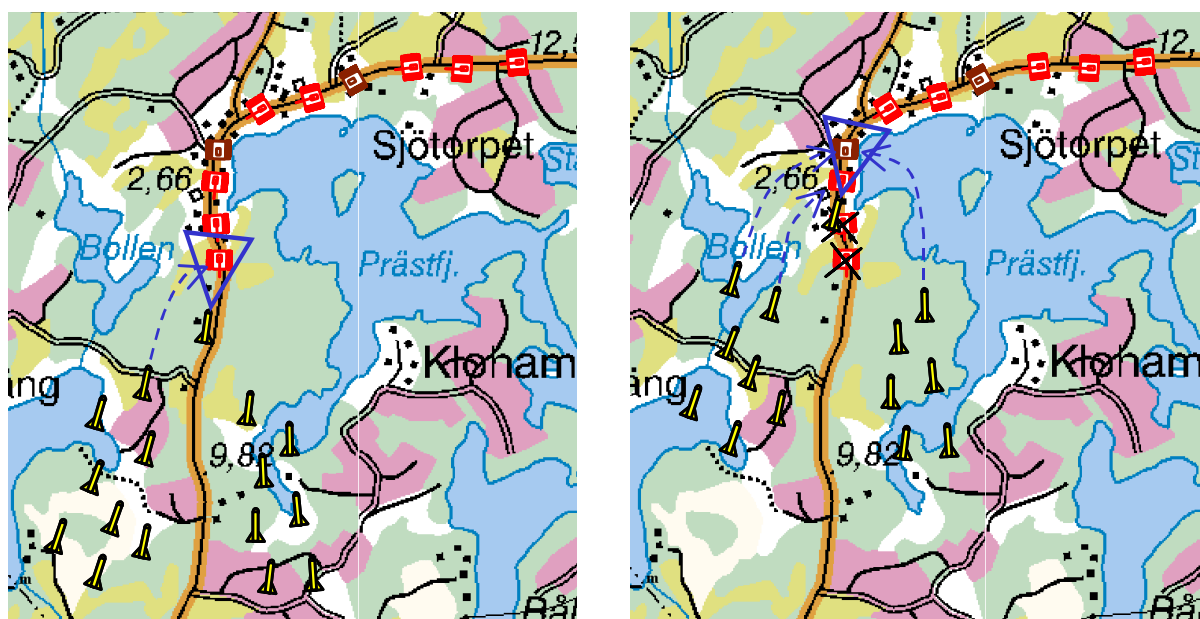
Bärrobot 4 flyger nu in över målområdet och gör en sista resultatspaning innan den tillsammans med de övriga kvarvarande bärrobotarna utnyttjar sitt kvarvarande bränsle som stridsladdning och attackerar lämpliga kvarvarande mål.

Slutfasuppträdande - stridsvagnskolonn

Låt oss följa den grupp subrobotar som fått i uppgift att slå mot de åtta stridsvagnarna och de två luftförsvarsvagnarna i fordonskolonnen på vägen. Robotarna uppträder på så sätt att en

subrobot spanar längs med fiendens förflyttningsväg, medan övriga subrobotarna följer efter bakom. De efterföljande subrobotarna uppträder dolt och utnyttjar om möjligt terrängmask vid sidan av vägen. Den spanande subroboten har tillgång till lägesbilden från bärrobot 1, som endast ett 20-tal sekunder tidigare har mätt in målen. Med hänsyn till stridsvagnarnas förflyttningshastighet beräknar den inom vilket område respektive mål kan förväntas uppträda.

När ett mål identifieras rapporteras målläget till den av de bakomvarande robotarna som ligger bäst till för insats. Medan insatsroboten styr mot det utpekade målet fortsätter spaningsroboten att söka efter ytterligare mål. Om ett mål identifieras som en luftförsvarsvagn liknande Tunguska-M1 tilldelas två subrobotar detta mål och anfaller från två håll för att förhindra att båda blir bekämpade av luftförsvarsvagnen. Vid en eventuell förlust av den spanande roboten tar en subrobot dess plats som "spanare" med ökad risk för nedskjutning som följd. Den styr in över vägen och tar upp för att förbättra sin spaningskapacitet.



Figur 6.7 Robotinsats mot fordon längs väg.

Slutfasuppträdande - laserutpekning av mål

Fiendens artilleri har hunnit gruppera i nordöstra delen av Rådmansö. Eftersom de aktuella målen är stillastående och väl maskerade är de relativt svåra att upptäcka och mäta in av robotarnas eller UAVernas sensorer. Positioner för kända mål har framför allt rapporterats av hemvärnsförband i området. Robotarna är därför också beroende av hemvärnets insatser för en maximal verkan.

De robotarna som har fått insatsorder mot artilleripjäserna har försetts med koordinater för senast kända position hos målen, och styr därför mot denna position. De har som förstahandsalternativ fått order om att söka efter reflekterad laserstråle från laserutpekare och styra mot träffpunkt. I andra hand, om ingen laserstråle detekteras, slår de mot angiven målkoordinat.

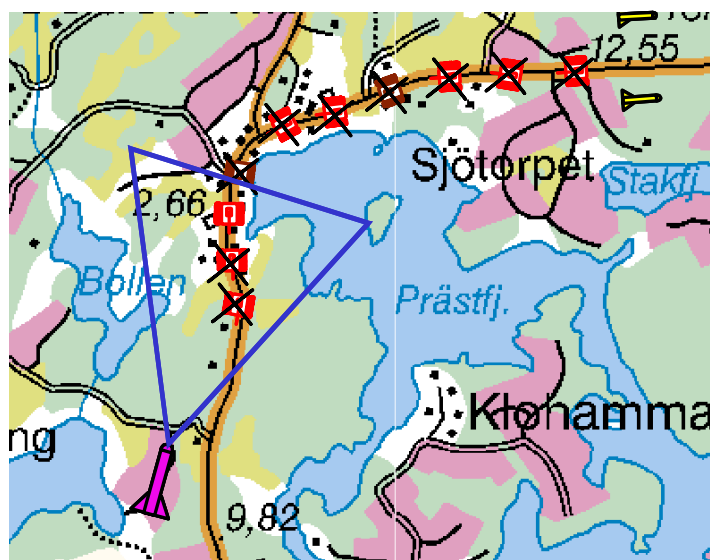
Hemvärnsförbandet får fortlöpande information om exakt tidpunkt för robotarnas anlandande och är berett att peka ut mål i rätt ögonblick. Om måltillgängligheten har förändrats, eller om robotarna av annan anledning skall styras mot alternativa mål, kan de också direkt kommunicera med robotarna via laserkommunikationslänken.

Träfffutfutvärdering

En viktig del av robotanfallet är att också fastställa resultatet av insatsen. Det finns flera möjligheter att samla information om utfallet.

Sista målsökarbilden från varje robot förmedlas via laserlänken omedelbart före träff. Denna kan ligga till grund för en träfffutfutvärdering och verkansberäkning. Denna träfffutfutvärdering och verkansberäkning kan antingen ske automatiskt på en mer förenklad nivå av ledningssystemet, eller mer noggrant och detaljerat av en eller flera operatörer som sammanställer informationen och gör en bedömning av verkan i målet. Bedömningen kan sedan matas in i ledningssystemet och utgöra information för nya insatser, beslutade såväl av operatör som autonomt av de inblandade robotarna.

Flera bärrobotar och subrobotar som samverkar vid målidentifiering, som i exemplet ovan, kan också samverka vid en träfffutfutvärdering genom att en eller flera subrobotar spanar över vägen bakom insatsrobotarna. Deras målsökarbilder ger då information om uppnådd verkan. Genom att fusionera denna information kan robotarna utföra en förenklad träfffutfutvärdering som de förmedlar sinsemellan och tillbaka till ledningssystemet. Om det visar sig att en stridsvagn inte blivit utslagen, kan de efterföljande subrobotarna utnyttjas för en förnyad insats.



Figur 6.8 Träfffutfutvärdering av robotanfallet.

Träfffutfutvärdering kan också med fördel utföras av en bärrobot som i fallet ovan då flera bärrobotar deltagit i samma insats. En spanar då av målområdet först som beskrivet tidigare medan den andra bärroboten följer bakom subrobotarna för träfffutfutvärdering. De eventuellt kvarvarande spaningsUAVerna kan också utnyttjas till detta. Man kan också tänka sig att lokala observatörer (t.ex. hemvärnsmän) kan utföra en träfffutfutvärdering som de sedan förmedlar till ledningssystemet och på så sätt ger robotarna och robotoperatörerna beslutsunderlag för nya insatser.

Marksensorsystemet som fällts av bärrobotarna under målspaningen är också en viktig komponent i träfffutfutvärderingen. Deras akustiska sensorer och vibrationssensorer registrerar förloppet före, under och efter robotinsatsen. Informationen förmedlas via laserlänkarna till Nätverket, och vidare till en underrättelseenhet (bemannad eller autonom) där en informationsfusion sker med robotsensorernas data.

6.4 Kommentarer till scenariot

Autonomitet

Samverkan mellan flera plattformar förutsätter en hög grad av autonomitet hos de ingående systemen för att effekten skall bli optimal och för att systemen skall kunna verka i en telestörd miljö. I scenariot ovan förlorar operatörerna i stort sett möjligheten att styra plattformarna när de når sitt spaningsområde, varför autonomitet är en förutsättning för att kunna fullfölja uppdraget. Men även med fullt fungerande kommunikationslänkar skulle det vara mycket svårt för operatörerna att manuellt beräkna hur en samordning av flera plattformar bör ske, speciellt när systemet mycket snabbt måste anpassa sig till nya situationer. Operatören har dock fortfarande en viktig övervakande roll, och han skall när det behövs kunna ta över plattformsstyrningen. Med fungerande länk till markstationen blir alltså systemet betydligt mer robust än när det tvingas agera fullständigt autonomt.

Målidentifiering

En mycket kritisk funktion hos ett autonomt robotsystem är dess förmåga att i varje läge göra en korrekt målidentifiering, dels för att inte missa viktiga mål och dels för att inte anfälla fel mål. Ett robotsystem med kommunikationslänkar kan i gynnsamma fall kommunicera sensordata till Nätverket och därmed stötts av en eller flera operatörer vid målidentifiering och målfördelning. Men för att systemet skall bli robust och kunna fungera väl i en telestörd miljö måste målidentifieringen kunna ske autonomt.

En autonom målidentifiering utnyttjar ett målbibliotek och försöker matcha sensorinformationen med detta. Denna matchning försvåras dock om målen är maskerade. Vi kan tänka oss några olika metoder ett samverkande system kan använda sig av för att underlätta identifieringen.

Olika plattformar kan vara utrustade med olika sensortyper. I scenariot är subrobotarna försedda med laserradar, de små UAVerna och bärrobotarna med IR/CCD-sensorer och den större UAVn med SAR-radar. Genom att kommunicera sensorbilden från olika plattformar kan dessa fusioneras för att på så sätt öka tillförlitligheten i matchningen. Bilder från likadana sensorer, men från olika vinklar kan på samma sätt fusioneras. En hel del forskning och utveckling krävs dock innan sådana fusionsalgoritmer kan realiseras.

Robotarnas målbibliotek kan uppdateras dynamisk med ny information som erhålls under spaningsfasen. En hemvärnsman som t.ex. identifierar ett maskerat mål skulle kunna fotografera detta, överföra bilden till Nätverket, som i sin tur ser till att robotarnas databaser uppdateras. En stor svårighet torde vara att översätta en optisk bild till motsvarande IR- respektive radarsignatur. Bilden ger dessutom endast information från en vinkel. Det behövs alltså algoritmer som baserat på denna information kan beräkna hur målet borde se ut från andra håll.

Insatsområde

Ett samverkande robotsystem har möjlighet att täcka ett, jämfört med konventionella robotsystem, mycket stort målområde. De enskilda robotarna är inte enbart beroende av sin egen sensor för att mäta in ett mål, de kan erhålla målkoordinater via Nätverket som är inmätta med en godtycklig sensor. Omvänt - en robot som upptäcker ett flertal mål kan också kommunicera målkoordinater till Nätverket som ser till att övriga robotar får kännedom om dessa.

I scenariot ovan har vi, vid vapeninsats, en god uppfattning om var fienden befinner sig. Fienden har också svårt, på grund av geografin, att snabbt lämna det området mot vilket

robotsystemet är insatt. En fråga som uppstår är: När upphör målet, på grund av osäkerhet i information, att vara ”robotvärdigt”?

Två ytterligheter föreligger, i det ena fallet saknar vi detaljerad information om målens exakta läge vid insatstillfället, men terrängen är så beskaffad att fienden inte kan förflytta sig någon längre sträcka under robotarnas anflygningstid.

I det andra fallet är målens individuella läge väl känt men terrängen tillåter god förflyttningsförmåga så osäkerheten i målens predikterade position när robotarna kommer fram är mycket stor. Problematiken är från robotsystemets sida den samma: Hur stort får ett område vara för att en insats med ett samverkande robotsystem skall vara motiverat?

Dessa frågor undersöks lämpligen med en simuleringsmodell av robotsystemet, en simuleringsmodell där det är lätt att ändra på terrängens beskaffenhet, alternativt lätt att ändra terrängavsnitt samt målens rörelseförmåga och robotsystemets anflygningstid.

Strategier för optimal målsökning och målfördelning

I scenariot sker målsökning och målfördelning i flera steg. Den första målsökningen utförs av den mekaniserade bataljonens spaningsUAVer och resultatet ligger till grund för insatsbeslut och uppdragsplanering av robotanfallet. När sedan bärrobotarna anländer till målområdet erhåller de den senaste uppdaterade målbilden av spaningsUAVerna. Utifrån den färskaste målinformationen görs sedan en målfördelning på olika grupper av de inkommande subrobotarna. Eftersom de flesta målen i scenariot är rörliga måste varje grupp av subrobotar utföra en ny målsökning och målfördelning när de väl når fram till sin målkaka, dock inom ett relativt begränsat område. I det ovan beskrivna scenariot leds varje grupp av subrobotar av en bärrobot som spanar och uppdaterar målbilden, men denna uppgift kan även utföras av en subrobot.

Det är viktigt att målsökningen kan ske på ett så snabbt och effektivt sätt som möjligt när det gäller rörliga mål, så att tiden mellan målupptäckt och insats blir kort. En metod för optimal målsökning har studerats inom projektet, där robotsystemet tar hänsyn både till förhandsinformation och till ny information från robotarnas målsökare för att anpassa sitt sökmönster. Se vidare kapitel 6.

Målfördelning utgör också ett optimeringsproblem, där man vill att de mest attraktiva målen skall fördelas på robotarna så att sannolikheten att slå ut dem blir så stor som möjligt. En viktig fråga att diskutera är hur ”autonomt” systemet får vara när det gäller målval och målfördelning – när skall en robot automatiskt styra mot ett upptäckt mål och när måste en operatör avgöra ifall ett mål skall bekämpas?

Sårbarhet – informationskrigföring

I scenariot har vi framför allt pekat på fördelarna med kommunikationslänkar mellan robotarna och den möjlighet till samverkan som dessa erbjuder. I många fall torde detta också minska sårbarheten hos systemet. Det finns emellertid några sårbarhetsaspekter, där kommunikationslänken kan vara en nackdel.

Den mest uppenbara sårbarheten hos det samverkande robotsystemet är ifall kommunikationslänkarna störs eller helt slås ut, på grund av fiendens motåtgärder eller på grund av inverkan av terräng och väderlek. För att hantera detta hot måste styrsystemet kunna hantera olika grader av kommunikationsbortfall, i värsta fall skall varje subrobot kunna utföra sitt uppdrag som en ”konventionell” robot, utan samverkan med övriga subrobotar. Möjlighet till samverkan är en option som i princip kan anses innebära att en enskild subrobot kan tillgodo-

göra sig information från en betydligt större ”stråkbredd” än som vore fallet vid utnyttjande av endast den egna målsökaren.

En annan sårbarhet hos det samverkande robotsystemet är fiendens möjlighet till vilseledning. Om en ”konventionell” robot luras av skenmål medför detta att endast den roboten går förlo-rad. En ”samverkande” robot kan emellertid kommunicera den felaktiga målbilden till hela robotsystemet, vilket kan medföra att skenmålsinsatsen lurar flera subrobotar att gå mot fel mål.

7 Ledningssystem för samverkande robotar

En insats med långräckviddiga robotar mot rörliga mål kräver en möjlighet att uppdatera robotsystemet med aktuellt målläge under an- och inflygning mot målområdet. Detta kan uppnås genom att robotsystemet självt har förmågan att avsöka ett relativt stort område. Med kommunikationslänkarna mellan robotarna är det möjligt att ge varje robot en aktuell mållägesbild över ett stort område, även om varje robot endast avsöker en begränsad del av området. Aktuellt målläge erhållet från andra informationskällor kan också överföras till robotarna via ledningssystemet. I scenariot utnyttjades spaningsUAVerna som informationsförmedlare till robotarna. Vidare kommunicerade spaningsUAVerna med ledningssystemet via förband på marken. Man kan även tänka sig att spaningsrobotarna själva kan kommunicera med ledningssystemet via markförband, likväl som att såväl robotsystemet som spaningsUAVerna kan utbyta information med ledningssystemet via högre flygande plattformar som UAVer och flygplan av typ JAS. Med detta nätverkstänkande blir informationsflödet betydligt mindre sårbart för störningar och sabotage.

En sådan samordning av flera olika plattformar som sker i scenariot ställer stora krav på ledningssystemet för att fungera effektivt och göra det möjligt att agera mycket snabbt även i situationer där man inte har haft någon möjlighet att i förväg planera insatsen.

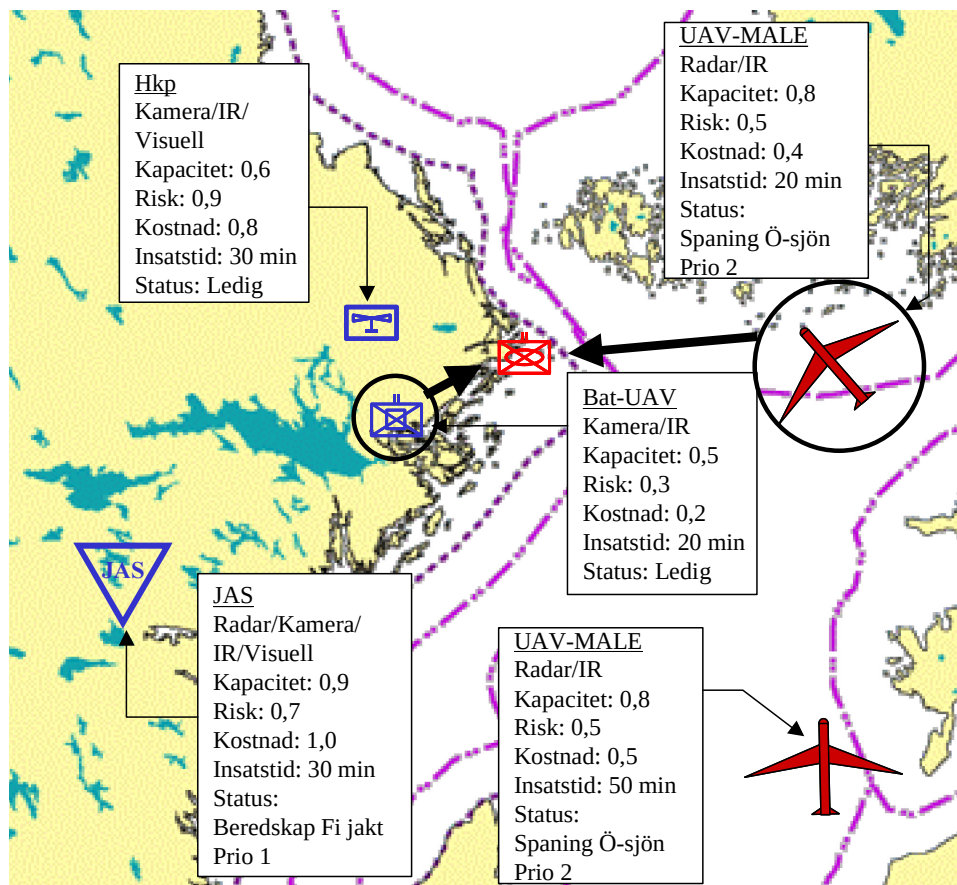
Vi skall i detta kapitel betrakta scenariot ur ett ledningsperspektiv och se var, när och av vem olika beslut fattas, vilken information som ligger till grund för besluten, samt hur insatsen följs upp. Detta görs i ett tänkt framtida NBF-koncept, vi förutsätter att vi har en ledningsinfrastruktur som klarar den bandbredd och den säkerhet som krävs.

Spaningsinsats vid krigsutbrottet

Strax efter krigsutbrottet erhålls underrättelser om fiendens landstigning i Kapellskär. Operativa Insatsledningen (OPIL) beordrar omedelbart Hemvärnslarm, med primär uppgift att spana mot fiendens landstigning.

Man ser dock ett behov av en kraftsamling av spaningsresurser mot Rådmansö för att kontinuerligt kunna följa händelseutvecklingen och för att erhålla målinformation för en eventuell insats med långräckviddiga vapen.

Nätverket förser OPIL med en lägesbild över möjliga spaningsresurser och deras aktuella status. Beslutande chef markerar vilka enheter han vill utnyttja, i detta fall en av de UAVer som för närvarande är insatt över Östersjön och 1 Mekbats UAV-resurs, varvid insatsordern förmedlas till berörda enheter. Nätverket kopplar också upp kommunikationslänkar till och mellan berörda enheter för att möjliggöra en samordning av insatsen.



Figur 7.1 Tillgängliga spaningsresurser, utvalda markerade.

Observera att OPIL inte tar över kontrollen av de insatta UAV-plattformarna. Man ger en insatsorder till förbanden som sedan utför spaningsuppgiften. I det aktuella fallet kan ordern till 1 UAVbat utformas som "Spana mot landstigen fiende Kapellskär, samordning med 1 Mekbat och Hemvärn Rådmansö".

Ledningsnätverket gör det möjligt att effektivt samordna styrningen mellan de insatta UAV-plattformarna. Det tillåter också att samverkan sker autonomt, utan direkt styrning från operatörerna. I scenariot ovan tilldelas de UAVer som sätts in mot Rådmansö ett uppdrag från respektive UAV-operatör – "Spana inom området Rådmansö, samordna spaningen med andra plattformar med samma uppdrag". Uppdraget registreras i Nätverket, vilket samtliga UAVer inledningsvis har kontakt med via sin markstation. Nätverket förser sedan varje UAV med information om vilka andra UAVer som har tilldelats samma uppdrag, och deras aktuella position. Ett logiskt nätverk etableras mellan dessa.

Därefter beräknas en optimal sökbana för varje UAV, med hänsyn till de andra UAVernas position och prestanda. I scenariot kan resultatet bli att de fyra små bataljons-UAVerna delar upp området sinsemellan, medan den större UAVn försöker täcka in hela Rådmansö. Man får då möjlighet att fusionera informationen från optiska sensorer och radarsensorer.

OPIL ger också order till 1 Mekbat att framrycka mot den landstigna fienden. Eftersom bataljonen är den som primärt berörs av underrättelseinformation från UAV-spaningen delegerar man ledningen av spaningsinsatsen till bataljonschefen.

Underrättelsehantering, informationsfusion

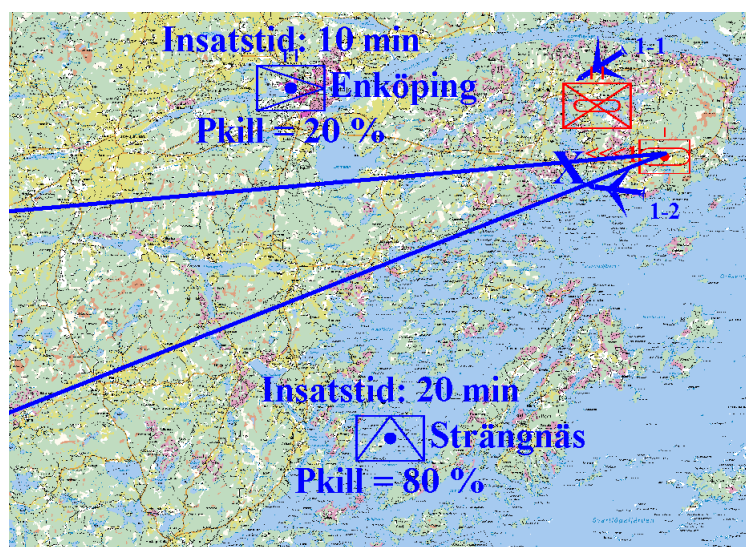
Bearbetning av sensorinformation från UAVerna kan också ske mer eller mindre autonomt. Det är knappast möjligt, och heller inte önskvärt, att överföra obearbetad sensorinformation mellan UAVerna och vidare till Nätverket. En första tolkning av informationen sker i respektive UAV, och enbart sådant som räknas som "indikationer" förmedlas vidare. Den fortsatta bearbetningen och informationsfusionen kan sedan ske i markstationen eller i en underrättelsestab, som via Nätverket prenumererar på UAV-informationen. Den tolkade informationen går sedan tillbaka till UAV-systemet, dels för att utnyttja resultatet för att anpassa den fortsatta spaningen, dels för att kunna förmedla målläge till det inkommande robotsystemet. Man kan också tänka sig att UAVerna utnyttjar avancerade bildtolkningsalgoritmer för att själva extrahera intressant information ur sensordata, utan hjälp av manuell bildtolkning. Systemet kan då fungera även i en svårt störd miljö, där det ytterst sällan har möjlighet till kommunikation med Nätverket.

Berörda enheter kan nu via Nätverket prenumerera på underrättelseinformation från Rådmansö. I vårt fall är primärt bataljonen under framryckning intresserad av fiendeläget och hans styrka. Ifall bataljonschefen identifierar brister i underrättelseläget kan han ge nya direktiv till UAV-spaningen, t.ex. utökad identifiering inom ett begränsat område. Ordern förmedlas av Nätverket direkt till de ingående plattformarna som sedan autonomt planerar om sina flygbanor för att uppfylla de nya direktiven.

Order om robotinsats

Lägesbilden över Rådmansö växer fram efterhand som UAV-spaningen fortskrider. Nätverket förser bataljonschefen med ny information i nära realtid. Han inser därför tidigt vikten av en snabb insats med indirekt eld för att kunna engagera fienden i ett senare läge.

Nätverket innehåller information om samtliga svenska enheters aktuella status och deras förmåga till insats. En beslutsstödsfunktion kan i detta läge automatiskt tala om för bataljonschefen vilka enheter som kan sättas in mot fienden, hur lång tid insatsen tar och vilken verkan den förväntas ha.



Figur 7.2 Insatsmöjligheter med indirekt eld mot landstigen fiende.

Bataljonschefen begär eld med markrobotförbandet i Strängnäs. Nätverket vidarebefordrar begäran till den som äger rätt att fatta beslut, i detta fall OPIL, med orientering om begäran till chefen för markrobotförbandet. Kommunikationslänkar mellan bataljonschef, OPIL och markrobotförband upprättas också automatiskt av Nätverket. På detta sätt har Nätverket medfört en betydande förenkling av beslutsgången och insatsordern kan ges mycket snabbt. Tack vare att markrobotförbandet omedelbart orienteras om insatsavsikten kan det förbereda insatsen redan före ordern, och tiden till avfyrning av robotarna kan därmed ytterligare reduceras.

Samordning av stödjande resurser för robotinsatsen

Robotinsatsen leds av insatsledare vid markrobotförbandet, och samordnas med bataljonschefen för uppdatering av målprioritet. Insatsledaren identifierar också vilka resurser som finns tillgängliga för att stödja robotinsatsen på Rådmansö. Information om dessa erhålls från Nätverkets databas.

Fiendens telestörning över Rådmansö medför att förbindelsen med robotsystemet blir svår att upprätthålla i slutfasen. Över insatsområdet finns två UAVer kvar, han begär att dessa skall rapportera aktuellt målläge direkt till robotarna när de anländer målområdet, samt vara beredd att stödja fortsatt målinmätning. Han begär också att hemvärnsförband i området skall vara beredda att stödja robotsystemet med informationsöverföring samt med målinvisning.

Begäran om stödjande insatser förmedlas av Nätverket direkt till berörda förband, som direkt kan svara på begäran. I de fall konflikt uppstår kring resursutnyttjande förs beslutet upp på högre nivå för prioritering.

UAV-plattformarna, som fortfarande uppträder autonomt över Rådmansö, förses med den nya ordern när de får kontakt med Nätverket. De planerar därefter sina banor på så sätt att de har möjlighet att kommunicera med robotsystemet vid den tidpunkt de beräknas anlända.

Övervakning och styrning av robotinsatsen

Markrobotförbandets insatsledare övervakar robotsystemet via radiolänken så långt det är möjligt och önskvärt. Han har då också möjlighet att kontinuerligt modifiera och förfina robotarnas uppdragsplanering.

När radiolänken blir utstörd av fiendens telekrigsinsats kan han inte längre direkt kommunicera med robotarna. Han är då beroende av Nätverkets förmåga att hitta andra kommunikationskanaler till robotsystemet.

I den telestörda miljön utnyttjar robotarna sin laserlänk för informationsöverföring, mellan robotarna och till UAVer och hemvärnets markstationer. Hemvärdet kan i sin tur förmedla informationen vidare via fasta optofibernät till Nätverket därmed tillbaka till insatsledaren, som därmed kan erhålla uppdateringar om robotarnas status. Via hemvärnsförbandens länkar kan han också förmedla nya order till robotsystemet, t.ex. nya målprioriteringar eller alternativa insatsområden.

Styrning via indirekta länkar i Nätverket innebär naturligtvis en lång och opredikerbar tidsfördröjning, varför man fortfarande är beroende av en mycket hög autonomitetsgrad hos robotsystemet. Robotsystemet bör också förses med styralgoritmer för att aktivt uppsöka kommunikationsmöjligheter med Nätverket efter en viss tid, dels för att förmedla viktig sensorinformation men också för att kontrollera om nya direktiv för robotinsatsen föreligger.

8 Algoritmer för samverkan - allmänt

Ett samverkande robotsystem kan ge stora fördelar men för att det ska bli effektivt måste flera tekniker tas fram eller förfinas. I detta kapitel skall vi belysa några aspekter kring styrsystemet för ett autonomt, samverkande robotsystem. En utförligare beskrivning av styrproblem för multiagentsystem finns i [18].

Systemegenskaper hos samverkande robotsystem

De mest framträdande *principiella systemegenskaperna* hos samverkande robotsystem är att

- styruddragan huvudsakligen är av kinematisk natur,
- systemet dynamiskt skall adaptera sig efter löpande information om sig självt och omgivningen,
- denna information är osäker samt av komplicerad natur och
- systemet har begränsad intern kommunikation.

De första tre egenskaperna finns även hos robotsystem utan ”samverkan”, och den fortsatta diskussionen inriktar sig därför huvudsakligen på den fjärde (och dess relationer till de övriga tre).

Kommunikationsbegränsningar

Det är inte självklart hur man skall definiera ”kommunikation” för samverkande enheter. Eftersom de verkar i en gemensam miljö, kommer de att ingå i och påverka varandras omgivningar. I det följande avses endast kommunikation via särskilda kommunikationskanaler (laserlänk, radio) som avsiktligt införts för ändamålet vid konstruktionen.

Ett robotsystem med obegränsad (fullständig, korrekt, omedelbar och ”gratis”) kommunikation kan anses utgöra ett enda monolitiskt dynamiskt system. Ett exempel på ett system som kan anses vara av sådant slag är de fiberoptiskt styrda robotsystem som tidigare har studerats inom projektet.

Ett robotsystem helt utan kommunikation består i princip av fristående system, även om en samordningseffekt mellan de ingående robotarna kan erhållas genom uppdragsplaneringen. Ett sådant exempel är Sjömålsrobot 15, där flera robotar kan programmeras att gå mot samma målområde, och där målvalskriterier bygger på kunskapen om var de övriga robotarna ”borde” vara.

I båda fallen blir de teoretiska problemen av väsentligen samma slag som för en enda robot, låt vara av radikalt olika komplexitet. För robotsystem med begränsad kommunikation uppstår däremot problemställningar av principiellt annan natur.

Kommunikationsbegränsningarna kan vara av flera slag, bandbreddsbegränsningar, räckviddsbegränsningar, störningar, röjningsrisk m.m. Vissa begränsningar blir av typen ”hårda bivillkor” (omöjligt att använda en viss kanal under vissa omständigheter), medan andra begränsningar är att betrakta som en kommunikationskostnad att väga mot övriga kostnader för systemet.

Autonomi

Frågan om autonomi uppträder här på två nivåer, dels autonomi för hela systemet (avsaknad av ledningscentral), dels för de enskilda robotarna. Samverkande robotsystem kan fungera såväl med som utan ledningscentral, och den eventuella ledningscentralens roll kan variera från ren övervakning med endast nödingripanden till informationsknutpunkt eller regelrätt fjärrstyrning.

Den följande diskussionen avser system utan ledningscentral, men är i stora stycken tillämplig även för system med ledningscentral.

Ett robotsystem utan kommunikation blir autonomt med isärkopplat beteende, men även ett system med obegränsad kommunikation kan uppträda med isärkopplat beteende om detta av någon anledning visar sig vara att föredra. Ett intressant problem är hur systemet kan välja att separera sig i åtminstone partiellt oberoende grupper, samt hur det kan sammansmälta sådana oberoende grupper till en. Måltilldelning hör till denna problemkrets.

Ett system utan särskilt utvald ledare blir robustare mot bekämpning och andra fel. Vissa ledarfunktioner kan ändå tillfälligt tilldelas en robot i systemet, varvid styralgoritmen utväljer den för tillfället och ändamålet mest lämpade roboten. Exempelvis är det lämpligt att två separerade grupper av robotar kommunicerar via korträckviddskanaler (laser) inom grupperna och via röjningskänsliga långräckviddskanaler (radio) mellan grupperna. Den senare kommunikationen bör skötas av den inom gruppen bäst lämpade roboten.

Metoder för utveckling av styralgoritmer

Metoder för att utveckla styralgoritmer för samverkande robotsystem omfattar t.ex. dynamisk programmering, särskilt reinforcement learning tillsammans med interpolation, on line optimering med Pontryagins princip samt potentialfältsstyrning. Algoritmer kan bedömas efter nominella prestanda ("optimalitet"), robusthet, beräkningsmässig effektivitet och konceptuell enkelhet.

Scenarier

Olika scenarier är vägledande för bedömning av den relativa vikten för olika önskade egenskaper hos systemet. I det scenario som presenteras i rapporten är målen många, okända och relativt dåligt försvarade. Där gäller det att identifiera de viktigaste målen och att styra ett begränsat antal robotar mot så många av dessa som möjligt.

I ett sjömålsscenario kan förhållandet vara det omvända, ett flertal robotar skall styras mot ett enda tidigare identifierat men väl försvarat mål. Det gäller då att försvåra för motståndaren att sätta in motåtgärder, t.ex. genom att synkronisera anfallet och att en robot förmedlar målläget till övriga robotar som därmed kan anflyga dolt, och därmed maximera verkan av robotinsatsen.

Urban strid kan innebära ytterligare krav, t.ex. en större betydelse av graderad verkan.

9 Styrning för maximal information

9.1 Decentraliserad styrning av samverkande robotar med hjälp av Reinforcement Learning

Backgrundscenario: Ett robotsystem bestående av flera autonoma och kommunicerande robotar används i ett uppdrag för att söka, lokalisera och bekämpa rörliga mål i ett målområde.

Målområdets innehåll och sammansättning av hot och mål anges initialt med hjälp av en sannolikhetsfördelning. Vid ankomsten gäller att robotarna med hjälp av sina sensorer och lokal kommunikation genomsöka området så snabbt som möjligt.

Det forskningen fokuserar på är att ta fram nya, alternativt vidareutveckla befintliga styralgoritmer inom Multiagent Reinforcement Learning, för optimal (effektiv) avsökning och neutralisering av målen i målområdet. Det innebär att robotarna samordnar sina rörelser dynamiskt så att den totala avsökningstiden blir så kort som möjligt.

Samverkan definierar vi härmed att vara det beteende som uppkommer genom lösning av ett optimeringsproblem.

9.2 Centraliserad styrning

Vi har tidigare studerat samverkan för avsökningsproblemet med ett centraliserat robotsystem [19]. Lösningen baserades på en central databas som uppdaterades med information från robotarna i målområdet, en s.k. entropikarta. Entropikarta uttrycker den kvarvarande osäkerheten i målområdet och uppdateras inkrementellt med hjälp av Bayes teorem i takt med att robotarna avsöker målområdet.

Maximering av en s.k. ”informationsvinst per episod” definierad som minskning av osäkerheten (entropi) på grund av observationer ledde till framtagning av ett styrsystem med nära optimal prestanda. Denna centraliserade systemlösning ställer dock orealistiska krav på kommunikationen mellan agenterna och den centrala styrenheten. Systemet är också kritiskt beroende av centralenhetens tillgänglighet.

9.3 Decentraliserad styrning

Problemet vi har nu studerat är en utveckling av ett decentraliserat styrsystem där varje agent väljer sin sökväg autonomt vars beslutsfattande grundar sig på information från egna observationer och sporadisk kommunikation med de övriga i gruppen.

Varje robot tolkar omvärldskartan ur sitt eget lokala perspektiv samt håller reda på de övriga robotarnas lägesställning.

Agenterna designas att vara identiskt lika d.v.s. de har samma policy, mål och handlings-repertoar. Att agenterna kan i varje ögonblick fatta olika beslut beror på att deras sensor-information återger olika delar av omvärlden från respektive agentcentrerad position.

Fördelen med att ha samma policy är att varje agent kan prediktera de andra agenternas handlingar och avsikter utifrån sin egen policy och ett estimat av deras positioner. Inläringen av policyn förenklas dessutom avsevärt, eftersom varje agent bidrar med sina erfarenheter under träningen.

Inlärningsförfarandet liknar det som i ett singelagentsystem utom i det avseendet att omvärldskartan utökas nu med information om de andra robotarnas position. Den utökande omvärldskartan kodas till en diskret agentcentrerad bild av omvärlden med bestämt antal element oavsett antal agenter.

Policyfunktionens komplexitet blir naturligtvis större än för singelagent men växer linjärt med antalet robotar i gruppen pga. systemets förmåga att generalisera.

Detta system kommer att ha det centraliserade systemets prestanda som övre gräns och varierar nedåt beroende på graden av informationsutbyte mellan agenterna vilket tillåts att vara sporadiskt och med lågt bandbredd.

Den största fördelen med decentraliseringen är främst robustheten i prestanda och "graceful degradation" mot systemfel och störningar.

Eftersom arbetsfördelningen sker dynamiskt och i realtid kan mindre systemfel tolereras utan att de för den skull behöva leda till systemhaveri. Systemet kan genom omfördelning av de befintliga resurserna fortsätta att fungera, om än med degraderad prestanda. T.ex. vid bortfall av några robotar under ett uppdrag övertas automatiskt det uteblivna arbetet av de kvarvarande robotarna i gruppen.

Systemet är även robust mot försämrad kommunikation. Robotarna övergår då gradvis från att ha utnyttjat "global information" för samverkande styrning till mera lokalt baserad styrning. Vid t.ex. bortfall av kommunikation fortsätter systemet att fungera dock som en samling av oberoende aktörer. Varje robot agerar som om den vore ensam aktör i uppdraget och betraktar de övrigas effekt på omvärlden som brus.

9.4 Distribuerad optimering genom parametersökning i policyrummet

Matematiskt kan samverkan formuleras som ett multiagent banoptimeringsproblem tillämpat på en diskretiserad karta av målområdet. Uppgiften är alltså att finna en återkopplad styrlag (policy) som styr varje robot i banor som maximerar den sammanlagda inhämtade informationen från målområdet.

Allmänt kan Reinforcement Learning användas för att beräkna en policy hos en agent som maximerar en för uppgiften uppsatt objektfunktion som i vårt fall är att maximera inhämtad information från målområdet på kortast tid. Ett nödvändigt mellansteg i metoden är framtagning av en s.k. värdefunktion som i varje tillstånd anger en förväntad kostnad för agenten att nå sitt mål givet att den följer en bestämd policy. Slutmålet för agenten i vårt fall är att nå ett tillstånd hos omvärlden där hela området är genomsoekt.

Direkt tillämpning av den klassiska Reinforcement Learning på multiagentfallet skulle kräva en global värdefunktion som värderar hela gruppens policy som funktion av alla agents tillstånds- och handlingsvektor. Problemet är att insignalvektorns dimension skulle variera med antal agenter i gruppen.

Ett rimligt alternativ till den globala värdefunktionen är en Monte Carlo baserad metod GPOMDP (Gradient Partially Observable Markov Decision Process) [20]. Varje agent, under inlärningsfasen estimerar gradienten av objektfunktionen med avseende på sina lokala policyparametrar med hjälp av insamlad data från varje träningsepisod. Agenten uppdaterar sedan sina policyparametrar i gradientens riktning vilket inkrementellt leder till objektfunktionens lokala maximum.

Resultatet blir en distribuerad optimering över flera mindre komplexa instanser, dvs. en för varje agent. Vinsten är snabbare inläring och skalbarhet.

Eftersom agenterna delar på samma policyfunktion men har olika erfarenheter av omvärlden kommer uppdateringarna att resultera till en generaliserad policy. Den färdigtränade policyn kan sedan laddas ned hos varje enskild agent i en grupp med varierande storlek. Gruppstorleken kan under ett uppdrag variera dynamiskt på grund av bortfall eller avbrott i kommunikationen.

Agenternas policyfunktion är i form av ett neuronnät där vikternas värden är policyfunktionens parametrar. Den uppkomna policyn efter optimeringen definierar agenternas ”samverkande” beteende.

Resultatet av våra experiment med två agenter i ett simulerat sökuppslag visar att agenterna under perfekt kommunikation klarar uppgiften på ca 70 % av tiden som en ensam optimal agent skulle ha behövt.

GPOMDP algoritmen visade att den kan finna nästan optimala policyfunktioner och att dess komplexitet (CPU tiden) växer linjärt med problem storleken (kartstorleken). Den långsamma konvergensen som vi erfarit när vi skalade upp problemet och vissa stabilitetsproblem kan dock förbättras enligt förslag i utgiven rapport [18] och är föremål för fortsatt arbete.

9.5 Fortsatt arbete

9.5.1 Regulator med flera abstraktionsnivåer

Ett vanligt problem för alla metoder för styrning av stora (komplexa) system är antalet möjliga situationer och handlingar som regulatorn behöver lära, lagra och interpolera emellan.

Ett sätt att begränsa komplexiteten är att organisera styrsystemet som en flerlagerstidhierarki. Varje lager kan därmed designas så att det får en begränsad komplexitetsgrad. Lagren högre upp i hierarkin representerar abstrakta situationer (abstrakta tillstånd) eller handlingar (makro) som verkar på större tidsrymd än de i lagren under. Tidsskalan i det lägsta lagret motsvarar systemets minsta tidsupplösning.

Det finns ett antal papper som beskriver hur reinforcement learning kan modifieras i denna riktning med bibehållen teoretisk grund när det gäller optimalitet och stabilitet, se t.ex. [21].

9.5.2 Kommunikation mellan agenter

Generellt kan kommunikation i ett multiagentsystem betraktas som processen som leder till att minska osäkerheten i samband med beslutsfattande. Sett ur ett Reinforcement Learnings perspektiv kan sändning av ett meddelande betraktas som en aktiv handling bland de övriga handlingsalternativen att indirekt påverka omvärlden via sina lagkamrater. Analogt kan mottagandet av information från andra i laget betraktas som en extra ”virtuell” lokal sensor.

Varje agents avsikt är att påverka omvärlden i en riktning som maximerar lagets totala summa av erhållna belöningar. När, vad och hur ofta man kommunicerar blir på det sättet styrparametrar som agenterna lär sig genom träning och i samspel med varandra. Beslut om att sända en observation till de övriga medlemmarna kommer att bero på graden av förväntad förbättring som utsändningen kan åstadkomma för gruppen för att nå sitt mål.

9.6 Relevant arbete

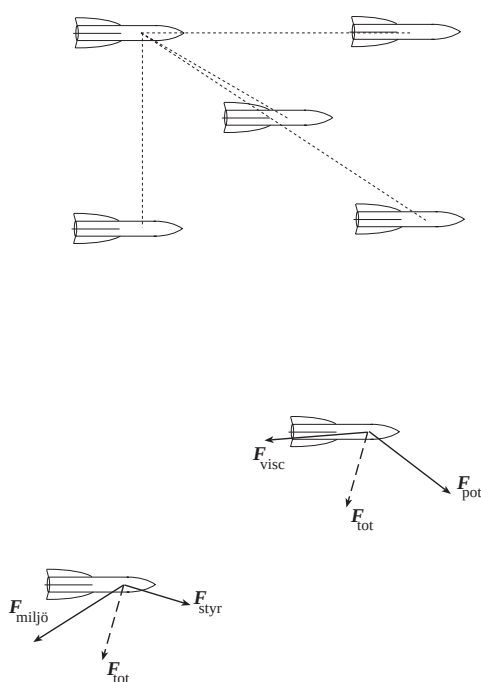
Metoden "parametersökning i policyrummet" liknar till sin struktur en tidig "actor-critic" algoritm som består av två separata funktioner, en "critic" (värdefunktion) som värderar den aktuella policyn och en "actor" (policy) som genererar styrsignaler. Fördelen med denna uppdelning är att policyfunktion kan konvergera till ett lokalt minimum trots onoggrann skattning av värdefunktionen. Detta beror på att värdefunktionen endast behöver värdera de tillstånd som är direkt kopplade till styrsignalmängden vilket oftast är betydlig färre än tillståndsmängden.

I Baxter m.fl. [20] presenteras en "direkt gradientbaserad RL" algoritm där det visas att värdefunktionen inte behöver skattas noggrannare än den man får ur data från en enda singel trajektoria samplad ur den underliggande Markov kedjan.

Peshkins m.fl. [22] använder "RL med parametersökning i policyrummet" för att undersöka problemet för samarbete i ett multiagentsystem. Alla agenter får samma belöningsignal från en global utvärderingsfunktion, men har olika uppfattningar (lokala) om omvärldens globala tillstånd. Parametrarna hos varje agents policyfunktion optimeras genom "gradient descent". Peshkin visar bl.a. i sin rapport att sannolikhetsfördelningen av styrsignaler genererade från alla agenter separat är den samma som den som genereras från en centraliserad policy med vektoriell styrsignalvektor, vilket är en nödvändig förutsättning för distribuerad optimering.

10 Styrning av robotgrupper med potentialfält

Potentialfältsstyrning är ett nytt sätt att styra grupper av farkoster och bygger på en mycket enkel princip. Ställdonen (motorer, roder o.s.v.) sätts till sådana värden att den totala kraften (eller momentet) på den enskilda farkosten blir lika med kraften (momentet) beräknat med ett tänkt potentialkraftfält bestående av parkraftväxelverkan mellan farkosterna och ett yttre potentialkraftfält. Denna ”konservativa” kraft kan kompletteras med en viskös dämpningsterm för stabilitetens skull.



Figur 10.1 Ett robotsystem med den totala kraften uppdelad i verkliga och tänkta komponenter.

I den är att utnyttja de välkända egenskaper som sådana system har, energibalans, rörelsemängds- och rörelsemängdsmomentbalans m.m. System av partiklar med parkrafter och parmoment är välkända från alla delar av fysiken, t.ex. celest mekanik och molekylodynamik.

Metoden har utvecklats av bland andra P. S. Krishnaprasad (U. Of Maryland) och N. E. Leonard (Princeton U.) som använt den till styrlagskonstruktion för samverkande satelliter respektive undervattensfarkoster. Kompletteringen med viskösa krafter och med yttre potential infördes förra året inom detta projekt och har under året också dykt upp ibland annat i arbeten från DARPA.

Ytterligare varianter kan tänkas, exempelvis magnetfältliknande växelverkan (föreslaget för UAV-styrning av Krishnaprasad under 2003) och klusterkonfigurationsberoende potentialer, d.v.s. icke-parkrafter. Med magnetfältliknande växelverkan blir kraften vinkelrät mot hastighetsvektorn på samma sätt som roderkrafter.

Metoden har ett antal egenskaper som gör den intressant för styrning av samverkande robot-system:

- enkelhet
- flexibilitet
- fungerar även vid bortfall av en enhet
- kan kombineras med andra tekniker
- matematiska metoder finns utvecklade för studiet av dess rörelseekvationer

I formler kan man uttrycka principen på följande sätt. Man föreskriver accelerationerna så att för varje robot (här: för enkelhets skull masspunkt) gäller att

$$m_A \ddot{\mathbf{r}}_A = - \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}_A} U(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_N, t) - k_A \dot{\mathbf{r}}_A$$

$$U(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_N, t) = \sum_{A < B} u(|\mathbf{r}_A - \mathbf{r}_B|) + \sum_A U_{ext}(\mathbf{r}_A, t)$$

Här låter man funktionen U_{ext} ha gropar i målområden, prioriterade vägar etc. samt toppar i områden som bör undvikas. Parpotentialen $u(r)$ innehåller flera delar:

- en repulsiv ”kärna” som förhindrar kollision
- en långräckviddsdel håller ihop gruppen
- funktionen planar ut mot ett gränsvärde om gruppen skall kunna delas upp

Metoden har framgångsrikt simulerats både i två och tre rumsdimensioner och med ett varierande antal robotar. Ett exempel på dynamisk uppdatering av potentialerna beroende på tidigare rörelser har också studerats. Potentialberg byggs då upp i områden där robotarna har vistats mycket, varefter dessa områden undviks i fortsättningen. Detta skulle kunna användas för spaning.

Exempel på uppdrag som skulle kunna utföras med hjälp av potentialstyrning och dess varianter är formationsbildning, formationsflygning ruttplanering samt spaning. Troligtvis lämpar sig metoderna mindre väl för vissa andra typer av uppdrag och får då kompletteras med andra tekniker såsom exempelvis optimal styrning.

11 Simuleringsmodell i ramverket FLAMES

De ovan beskrivna forskningsområdena är inriktade på styrproblem av teknisk karaktär för samverkande agenter. För projektet är det också av stort intresse att kunna göra en fördjupad forskningsinsats på det taktiska utnyttjandet av samverkande robotar, där erfarenheter från den mer grundläggande forskningen är en viktig del.

För detta ändamål utvecklas en simuleringsmodell för ett samverkande robotsystem anpassad för taktiska simuleringar. En utförligare presentation av detta arbete finns i [23].

11.1 FLAMES

För implementation av ett samverkande robotsystem har simuleringsramverktyget FLAMES från Ternion använts. FLAMES är ett simuleringsramverk som tillåter komplexa simuleringar av enskilda system men också system uppbyggda av flera olika undersystem. Ramverket tillhandahåller allt ifrån enkla klipp-och-klistra funktioner för utveckling av mycket komplexa modeller, även beteendebaserade (s.k. kognitiva) modeller. Eftersom FLAMES levereras med ett antal exempelmodeller kan produkten användas omedelbart för enklare scenarier och med tillräckligt god kännedom om verktyget och exempelmodellernas begränsningar kan betydligt mer komplexa scenarier utvecklas och studeras. Med FLAMES kan användaren utveckla, exekvera, analysera och visualisera scenarier i både 2 D och 3 D. Verktyget kan användas bl.a. till visualisering av problem, taktiska simuleringar och beteendeanalys.

FLAMES är ett av de kraftfullaste simuleringsramverktygen för simuleringar av många mot många dueller på marknaden idag. Det är utvecklat för att användas främst inom den militära sektorn och tillhandahåller åtskilliga användbara exempelmodeller inom området.

FLAMES är även utvecklat för att kunna passa många olika syften såsom exempelvis wargaming, systemanalys, taktisk utvärdering etc. Ramverktyget är också ett av de få som stödjer fri utveckling av kognitiva modeller. Sammantaget så gjorde dessa egenskaper att FLAMES valdes som det lämpligaste simuleringsramverktyget för taktiska simuleringar med det samverkande robotsystemet.

11.2 Utfört arbete relaterat till FLAMES

En robotmodell har utvecklats i flera steg, först implementerades ett autonomt uppträdande hos en robotmodell [24] och sedan implementerades samverkan i den nu autonoma roboten [25]. Robotmodellen har sedan utnyttjats i ett demonstrationsscenario, där valda delar av det scenario som presenteras i denna rapport har modellerats. Demonstrationsscenarioet beskrivs i [26].

Simuleringsmodellen av robotsystemet har varit baserad på komponenter som simuleringsramverket tillhandahåller, samt en kognitiv modell där det autonoma beteendet och funktionalitet för samverkan implementeras.

Konceptet "samverkande robotar" skiljer sig till stor del från traditionella robotsystem, vilket får till följd att det samverkande robotsystemet inte till fullo kan modelleras med de exem-

pelmodeller som följer med FLAMES. Vid modelleringen av demonstrationsscenariot utkristalliserade ett behov av nya moduler både för att ersätta exempelmodellerna och för att tillföra helt nya funktioner till modellen.

Syftet med arbetet har varit att koncentrera utvecklingen an några nyckelkomponenter men samtidigt identifiera nya vitala funktioner för att underlätta scenariomodelleringsarbetet.

Under 2002 har ett antal moduler tagits fram och implementerats i demonstrationsscenariot.

FOICollabMissile – en robotmodell

Tidigare har de samverkande robotarna modellerats med hjälp av FLAMES exempelmodell för ett flygplan. Det har inneburit både fördelar och nackdelar. De främsta fördelarna har varit att snabbt komma igång med modelleringsarbetet genom att de samverkande robotarna har betydligt mer genensamt med FLAMES exempelmodell för ett flygplan än de har med FLAMES exempelmodell för en robot, det är band annat inte tillämpligt att knyta en kognitiv modell till robotexempelmodellen vilket är en grundförutsättning för arbetet. Nackdelarna har varit att flygplant inte kan vara ammunition i ett vapensystem och är inte avsedda att attackera ett mål genom att flyga in i det.

Därför har beslut tagits om att ta fram en robotmodell till vilken man kan knyta en kognitiv modell men samtidigt behåller sina egenskaper som ett vapensystem.

Arbetet har kunnat genomföras enligt två huvudlinjer. Det kanske mest naturliga linjen är att skapa en ny robot modell genom att modifiera den existerande exempelroboten. Den andra linjen som också har valts är att inkorporera en existerande robotmodell i FLAMES. Anledningen till att den senare strategin har valts har varit att undersöka hur genomförbart det är att inkorporera existerande kod i FLAMES. Det är av stor vikt att utreda då det redan finns ett stort antal modeller framtagna, vars funktion skulle kunna vara intressant att undersöka i ett större scenario utan att för den skull tvingas skriva om hela modellen. Det är också intressant för det fall där ett systems egenskaper best lämpar sig att beskriva i ett annat verktyg än FLAMES men systemets egenskaper vill kunnas simuleras som ett delsystem i ett större scenario i FLAMES.

Den robotmodell som tagits fram i projektet är modellerad så att många av dess egenskaper så som aerodynamik och motordata är parametersättbara för att modellen ska var tillräckligt flexibel för att kunna representera ett flertal tänkta och existerande system.

Roboten kan arbeta i två moder. I den första moden flyger den mot en målpunkt, det ligger på den kognitiva modellen att beräkna och förse styrsystemet med nya målpunkter. Roboten styr alltid mot den senast angivna målpunkten. Om ingen ny målpunkt finns att tillgå när avståndet mellan roboten och målpunkten understiger ett fördefinierat värde fortsätter roboten med konstant kurs och hastighet tills en ny målpunkt levereras. I den andra moden anfaller roboten styrvägen. Om målpunkten, i detta fall ett mål, innehåller information om målets hastighet används syftbäringsstyrning för att uppnå kollision annars används hundkurvestyrning.

För framdrivning kan roboten förses med upp till tre motorsteg. Varje steg kan bestå av antingen en raketmotor eller turbofläktmotor.

En utvecklad kognitiv modell

Den kognitiva modellen har även utvecklats i flera steg – från att beskriva ett enkelt beteende med slumpartad sökning inom en cirkel till att innehålla funktioner för att låta robotarna flyga i formation och söka efter mål utefter i förväg utlagda flygbanor. Dessa flygbanor läggs ut över det område där det är mest troligt att en fiende kan tänkas rycka fram.

Modellen innehåller även funktioner för att identifiera mål hantera de problem som uppstår då ett antal sensorer upptäcker och rapporterar olika mål, mål som andra robotar kanske redan rapporterat.

Kommunikationsmodell

Ett samverkande robotsystem är beroende av kommunikation. För att kunna simulera alla aspekter med ett samverkande system måste således en kommunikationsmodell kunna simulera ofullständig kommunikation. Då FLAMES exempelmodell för kommunikation bara medger perfekt kommunikation har en ny kommunikationsmodell tagits fram. Denna nya modell sorterar slumpvist bort ett antal meddelanden. Hur många meddelanden som försvinner är beroende på avståndet. På avstånd över ett visst förbestämt värde mellan sändare och mottagare bryts kommunikationen helt.

Målsökarmodell

Ett förslag till målsökarmodell har modellerats. Den är en anpassad modell av en IR-sensor som dels medger att sannolikheten för upptäckt varierar och dels kunna identifiera och klassificera olika typer av mål. Upptäcktssannolikheten är bland annat beroende på vilken typ av mål sensorn tittar på och i vilken terrängtyp det befinner sig i.

Rörliga markfordon

Nya markfordon som utgör mål i scenariot har tagits fram. Dessa markfordon förflyttar sig längs i förväg utstakade vägar.

11.3 Fortsatt arbete

Under arbetet med att utveckla modeller i FLAMES har vissa önskemål framkommit för att förenkla framtagningen av nya och mer komplexa modeller. Som redan nämnts har en del av årets arbete gått ut på att undersöka metodiken för att inkludera existerande modeller i FLAMES. Då detta har visats sig fullt möjligt har intresse av att inkludera modeller skrivna i Matlab visats. Ett annat önskemål har varit att inkludera kognitiva modeller skrivna i språk som är framtagna just för att beskriva olika typer beteende så som Soar.

Kognitiv modell

Den kognitiva modellen behöver utökas med funktioner för att kunna utnyttja att robotarna har varierbar hastighet. Den bör också utökas för att bland annat kunna hantera de algoritmer för autonom sökning som har tagits fram inom projektet.

Kognitiv modell för markfordon

För att kunna genomföra mer realistiska simuleringar bör de markfordon som utgör mål utrustas med en kognitiv modell som medger att de reagerar på robotarnas närvaro och anpassar sitt uppträdande för att till exempel försvåra upptäckt.

Terränghantering i FLAMES

Terrängen hör inte egentligen ihop med det samverkande robotsystemet men då robotarna söker efter mål i terrängen är resultatet av en simulering starkt beroende av en lämplig ter-

rängdatabas. Därför är den terrängdatabas som FOI-projektet Informationsfusion tagit fram i samarbete med Ternion av mycket stort intresse. Projektet skulle kunna vinna mycket på att införliva denna terrängdatabas i demonstrationsscenariot. Målsökarmodellen bör då även ses över för att fungera ihop med de olika terrängtyper som ingår i den nya terrängdatabasen.

12 Tidigare arbete

Forskning på autonoma styrprinciper med inriktning mot samverkande robotsystem startade 1995-07-01. Under hösten 1995 genomfördes en förstudie för att klargöra kunskapsläget och inriktningen för den fortsatta verksamheten [1]. Arbetet delades därefter upp i två huvuddelar, studier av nya styrprinciper för samverkande robotar samt studier av systemaspekter för fiberoptiskt styrda robotar.

Några resultat av det tidigare arbetet presenteras nedan, resultat som utnyttjas i nuvarande projekt.

12.1 Systemstudier av fiberoptiskt styrda robotar

Under 1996-1997 utfördes en systemstudie av ett fiberoptiskt styrt robotkoncept, där systemets informationsbehov, insatsmöjligheter, taktiskt uppträdande, överlevnad, operatörens roll m.m. belystes [2]. Framför allt betonades effekten av samverkan mellan de ingående robotarna.

Under 1998-1999 fortsatte vi med en fördjupad systemstudie av robotkonceptet, där målsökarens egenskaper och operatörens roll vid samverkan ägnades stort intresse [3].

Några slutsatser från dessa studier:

Fördelar med ett fiberoptiskt robotsystem

- Störsäkert
Den fiberoptiska länken är i praktiken omöjlig att upptäcka och att störa ut.
- Operatörskontroll
Den optiska fibern kan överföra sensordata till vapenplattformen och styrkommandon till roboten, vilket ger skytten en möjlighet att påverka styrningen utan att ha fri sikt till målet och över en lång räckvidd. Möjligheterna till målidentifiering är goda, liksom möjligheterna att vid behov i sista stund avbryta en inledd bekämpning. Möjligheterna till val av träffpunkt och därigenom graderad verkan är goda.
- Informationsutbyte - samverkan
Informationen från flera robotars sensorer överförs till samma vapenplattform och styrdator. Robotanfallet kan därmed samordnas och bli effektivare.
- Spaningseffekt
Robotarnas målsökare kan under anflygning och anfall täcka in ett mycket stort område, vilket kan ge värdefull underrättelseinformation för andra vapeninsatser.
- Träffutvärdering
Sista bilden från robotens målsökare innan den träffar sitt mål kan användas för att bedöma utfallet av insatsen. En efterföljande robots målsökare kan också användas för träffutvärdering.

Begränsningar med en fiberoptisk länk

- Begränsad flyghastighet
Fibers draghållfasthet och dagens hasplingsteknik gör att robotens flyghastighet begränsas till strax under ljudhastigheten, 340 m/s.
- Risk för fiberavbrott
Om den optiska fibern skadas förloras kontakten med roboten, och operatören har inte längre någon möjlighet att påverka styrningen.

Fiberoptiskt styrda robotar förefaller att vara mycket väl lämpade för insatser på det fragmenterade slagfältet, där egna, fientliga och civila enheter förekommer uppblandade med varandra.

Robotsystemet kompletterar många av dagens system. Fiberoptiskt styrda robotar är *inte*

- någon utpräglad luftvärnsrobot, men är kanske det bästa system som finns för att bekämpa helikoptrar, även från ubåt. Andra lämpliga mål kan vara UAVer,
- något utpräglat artillerisystem, men det bedöms ha mycket bättre förmåga att bekämpa punktmål än dagens system, även på långa avstånd,
- någon utpräglad sjömålsrobot, men har troligen god verkan mot små och medelstora sjö-mål,
- någon utpräglad pv-robot, men kan förmodligen bekämpa alla typer av stridsfordon, inklusive stridsvagn, på helt andra avstånd än dagens system.

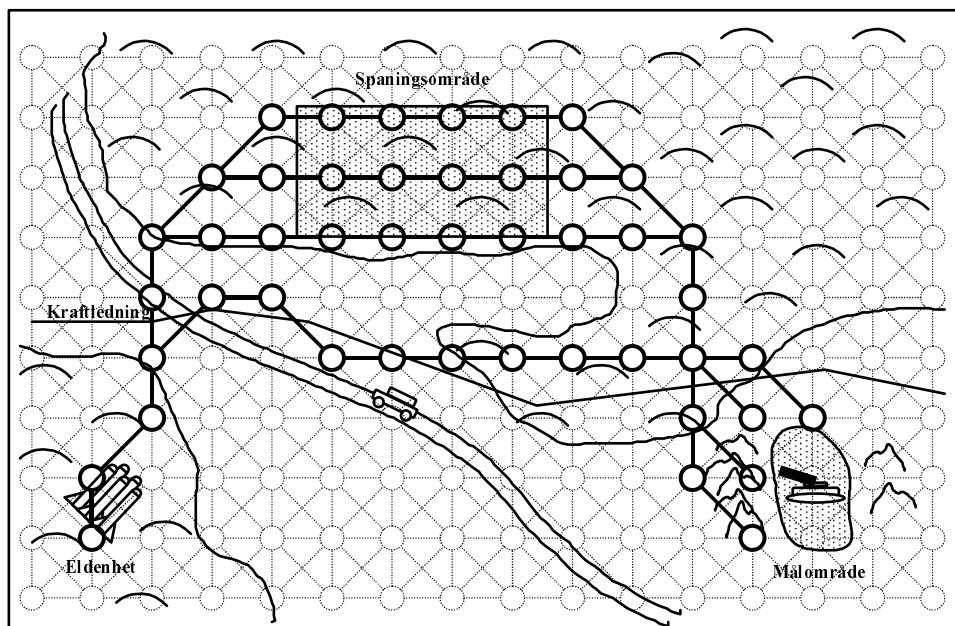
Systemet torde passa särskilt bra vid internationella operationer på grund av att en operatör har tillgång till målsökarbilden och kan vid behov själv styra roboten till önskad träffpunkt, alternativt avbryta uppdraget.

12.2 Banoptimering för multipla robotar

När ett beslut om vapeninsats har tagits inleds den första fasen i anfallet, planering av uppdraget. Med utgångspunkt från tillgängligt underrättelseunderlag beräknar datorsystemet var målet/målen sannolikt kommer att befinna sig vid vald eller möjlig anfallstidpunkt. Därefter föreslås lämpliga robotbanor, med hänsyn till systemprestanda, terräng, egna förband, fientlig motverkan, behov av kompletterande underrättelser, taktik i målområdet m.m. Operatören godkänner sedan uppdragsplaneringen och avfyrrar robotarna.

Robotarna följer de planerade banorna mot målområdet. Under anflygningen kan dock förut-sättningarna för uppdraget komma att förändras. Ny underrättelseinformation alternativt förlust av en robot under anflygningen, på grund av bekämpning eller fiberavbrott, kan komma att kräva en förändrad anfallsstrategi och därmed innebära att robotarna kan behöva ändra sitt uppträdande.

En metod att beräkna optimala banor för multipla robotar har föreslagits i [27]. Ett nätverk läggs över kartan, där varje nod i nätverket representerar en position och varje båge, d.v.s. förbindelse mellan två noder, representerar en "kostnad" att förflytta sig från en position till en annan. Ju högre kostnad en båge har desto högre risk är det för en robot att färdas denna väg. Målet är att hitta de banor som ger lägst kostnad när man summerar bågkostnaderna som tillhör dessa banor.



Figur 12.1 Nätverk för optimal vägplanering - "Billigaste" vägarna markerade

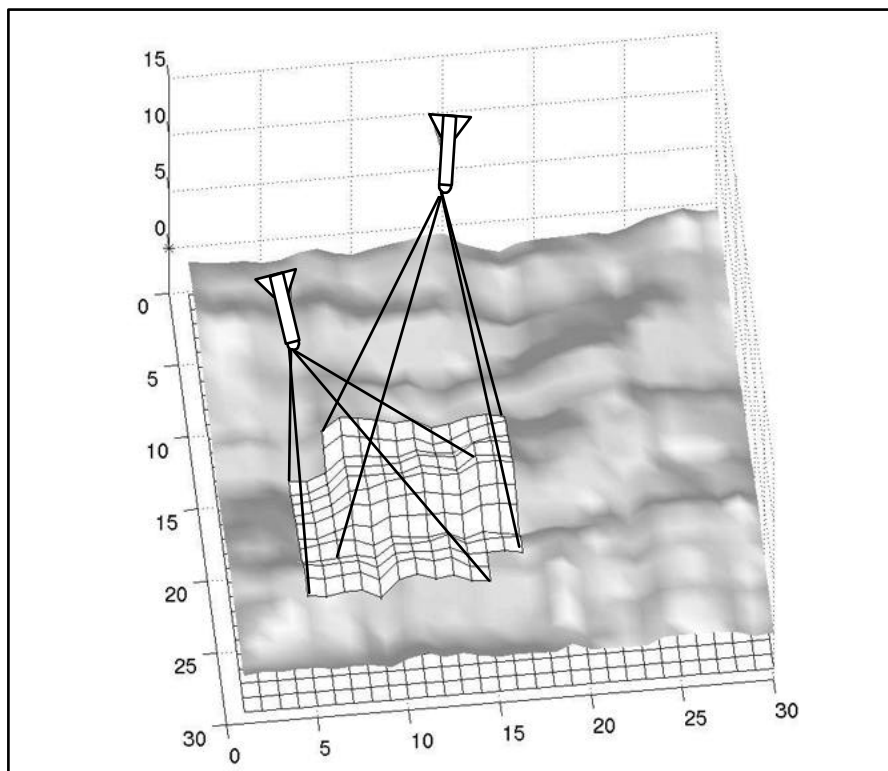
Den föreslagna metoden utnyttjar dynamisk programmering för att lösa optimeringsproblemet. För att förkorta beräkningstiden sker banplaneringen i flera steg. Först görs en grov planering med låg upplösning där man finner de optimala banorna i form av bredare "korridorer". Sedan förfinas upplösningen i dessa "korridorer" och mer exakta banor beräknas för varje robot. Algoritmerna kan också hantera omplanering av robotbanorna om förutsättningarna för uppdraget ändras under anflygningen.

En viktig forskningsuppgift är att definiera "kostnaderna" i nätverket utifrån de aktuella förutsättningarna, "kostnader" som i många fall förändras med tiden. Detta har emellertid ännu inte studerats närmare i projektet.

12.3 Sensordatafusion

Den fiberoptiska länken mellan robot och utskjutningsplattform gör det möjligt att överföra målsökarinformation direkt till den markbaserade styrdatoren, och i denna utföra all bildbehandling. Eftersom flera robotar samtidigt kan styras från samma dator har vi också en möjlighet att väga samman information från två eller flera målsökare för att få en säkrare målidentifiering.

Problemet med sensordatafusion av två robotars målsökarinformation har behandlats i [28]. Vi betraktar problemet när två robotar samtidigt riktar sina målsökare mot samma område.



Figur 12.2 Två robotar betraktar samma målområde

Informationen från robotarnas målsökare behandlas först var för sig. Denna bildbehandling ger oss målangivelser i form av position och egenskaper, samt ett mått på osäkerheten i angivelserna. Datorsystemets terrängdatabas i kombination med positionsdata från robotarnas navigeringssystem används för att förbättra noggrannheten i analysen.

Måldata från de två målsökarna vägs sedan samman för att ge en större tålighet mot falska mål och klotter, samt en bättre positionsangivelse. Det är viktigt att robotarnas position är känd med stor noggrannhet för att man skall veta att man betraktar samma område och samma mål.

Studien visade på en metod att sammanväga målangivelser från två målsökare. I ett par scenarier beräknades informationsvinsten med sensordatafusion jämfört med att låta två robotar var för sig avsöka samma område. Sensordatafusion visade sig ge bättre noggrannhet i målpositionering och målidentifiering, samt gjorde det lättare att finna mål som utnyttjade terrängmask. Priset för detta var en betydligt lägre avsökningskapacitet, samt krav på större beräkningskapacitet.

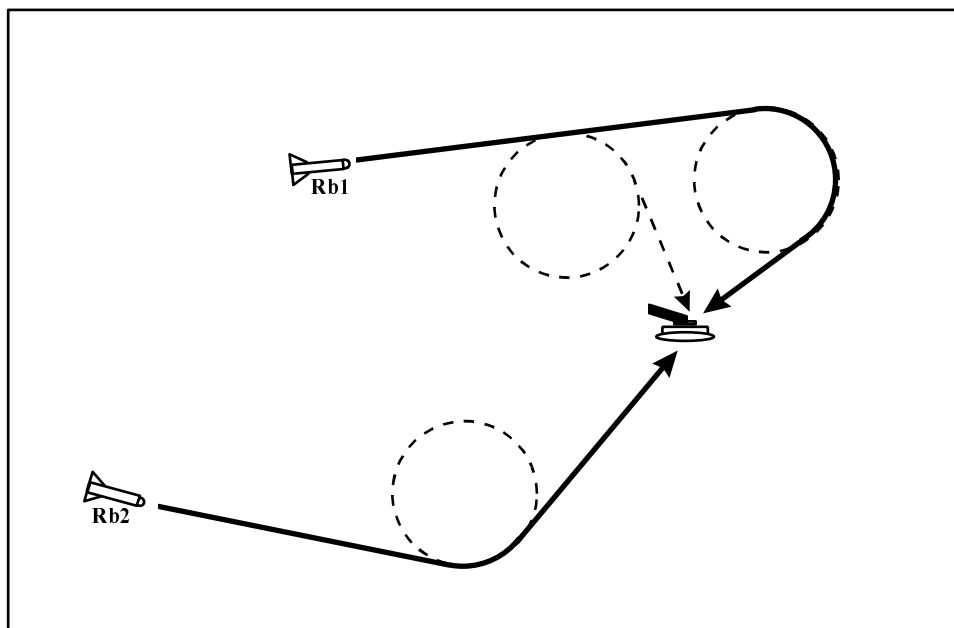
12.4 Planering av robotbanor för synkronisering i målområdet

En viktig taktisk fördel med ett fiberoptiskt robotsystem är möjligheten till insats trots osäker målinformation vid utskjutningstillfället. Robotbanorna planeras då utifrån en trolig målfördelning i målområdet. När sedan målinformation erhålls från de första robotarnas målsökare kan en omplanering bli nödvändig.

Ett viktigt kriterium vid vägvalet i slutfasen syns vara att robotarna skall anlända samtidigt för att uppnå överraskning och mättnad i fiendens försvarssystem. De skall också anlända i målområdet från rätt håll, så att de på bästa sätt skall kunna bekämpa de utvalda målen. Genom

att lösa detta slutfasproblem för flera robotar och samtidigt utnyttja den senaste observationen av aktuell måltyp och dess omgivning, kan man bestämma vilka robotar som bäst kan bekämpa varje inmätt mål.

Vi tittar på ett enkelt fall, där vi vill uppfylla samtidigthetskriteriet för två robotar. Små justeringar av ankomsttiden kan åstadkommas med hjälp av hastighetsreglering. Den eller de robotar som har längst väg kvar ökar helt enkelt hastigheten så att de anländer samtidigt som de robotar som befinner sig närmast. Om vägskillnaden mellan robotarna är större måste emellertid även robotbanorna modifieras. De närmaste robotarna får ta en längre väg mot målet.



Figur 12.3 Rb1 förlänger sin bana för att nå fram till målområdet samtidigt som Rb2

I Figur 12.3 ser vi hur banan för den närmaste roboten kan förlängas, så att vägen till målområdet blir lika lång som för den robot som befinner sig längst ifrån. Vägvalet begränsas framför allt av robotarnas manöverförmåga, de kan inte utnyttja en godtyckligt liten svängradie.

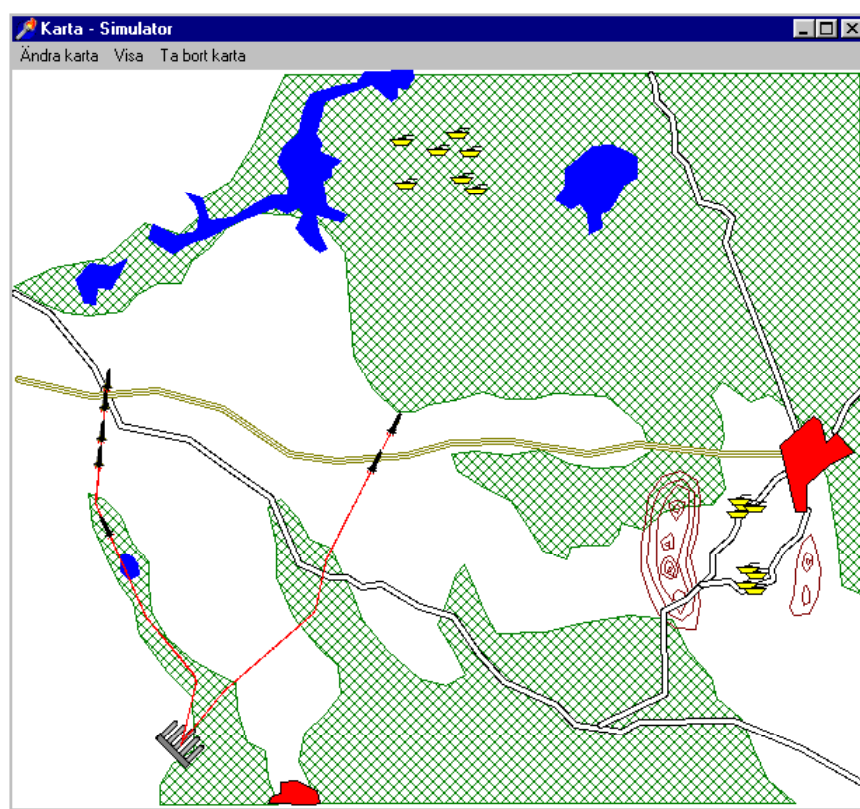
Målet med denna del av forskningen är att få fram algoritmer för vägval i slutfasen för att erhålla synkronisering i målområdet. En jämförelse med ett osynkroniserat robotanfall skall visa hur mycket prestanda hos robotsystemet kan förbättras med samverkan mellan de ingående robotarna.

12.5 Simuleringsmiljö för samverkande robotar - ROSA

Arbetet i projektet har resulterat i ett antal nya styrprinciper för samordning av ett robotanfall. Som ett hjälpmedel för att utvärdera dessa styrprinciper har vi också utvecklat simuleringsmiljön ROSA (ROBotSAMverkan) [29, 30]. Simuleringsmiljön består av två delar, en simulator och en styrdator. Ett enkelt terränggenereringsprogram ingår också. Programpaketet är anpassat för Windows-miljö. Realtidskärnan i operativsystemet utnyttjas för att åstadkomma exekvering av parallella processer. Programmen har utvecklats med hjälp av Delphi 5, med Object Pascal, ett kraftfullt verktyg för Windows-tillämpningar.

De båda programmen utbyter data via en kommunikationskanal, en kanal som simulerar de fiberoptiska trådarna i robotsystemet. Simulatorens tar emot styrsignaler från styrsystemet, beräknar robotarnas uppträdande och producerar sensordata som skickas tillbaka till styrdatorn. Simulatorens uppdaterar också omvärldsmodellen där robotarna agerar, till exempel målens uppträdande. I styrdatorn bearbetas de simulerade sensordata som erhålls från simulatorprogrammet och utnyttjas som indata till de algoritmer för samordnad styrning som skall utvärderas. Dessa algoritmer producerar nya styrsignaler som skickas tillbaka till de simulerade robotarna.

Programpaketet ROSA används också för att demonstrera möjligheterna med ett fiberoptiskt styrt robotsystem och andra robotsystem med samverkande robotar. Därför innehåller det också ett kraftfullt grafiskt presentationssystem som ger en överskådlig bild av ett simulerat robotanfall.



Figur 12.4 Terrängkarta med robotar och mål

13 Slutsatser

Rapporten beskriver ett långräckviddigt robotsystem med möjlighet till kommunikation och samverkan mellan de ingående robotarna och med övriga delar av ledningssystemet. I ett scenario belyses några taktiska fördelar med ett samordnat robotanfall mot rörliga markmål, där insatsen också samordnas med ett antal UAVer under målsökningsfasen.

Ett problem vid insats med långräckviddiga robotar mot rörliga mål är att de aktuella målen hinner förflytta sig över ett stort område under tiden från insatsbeslut till leverans av verkansdel. Med ett samverkande robotsystem löses detta genom att flera robotar samordnar målsökningen och därmed kan täcka ett stort målområde på kort tid. Robotarnas kommunikationslänkar kan också utnyttjas för att ta emot mållägesinformation från andra källor, t.ex. UAVer eller målutpekare på marken.

Ett samverkande robotsystem kan också, tack vare möjligheten till informationsutbyte, utföra en effektiv målfördelning sinsemellan för att uppnå en optimal effekt av robotinsatsen.

Den totala informationen från robotarnas målsökare kan också fortlöpande förmedlas till ledningssystemet, som kan utnyttja informationen för träffutvärdering och som underlag till förnyad vapeninsats.

Ett samverkande robotsystem torde vara ett effektivt vapen mot rörliga mål på det framtida slagfältet, speciellt om robotarna kan kommunicera med ledningssystemet under hela anfallet.

Framtida utveckling av samverkande system

I scenariot uppträder både robotsystem och understödjande UAV-system med en mycket hög grad av autonomitet. Operatörerna behöver i princip enbart ange spanings-/verkansområde samt några ”förhållningsregler”, därefter klarar sig systemen själva. Det lär dock dröja ganska länge, långt senare än 2020, innan ett system med en så hög grad av autonomitet kan realiseras. De autonoma styralgoritmerna måste klara av många olika typer av uppdrag för att systemet skall vara flexibelt. Styrlagarna måste vara robusta, de skall kunna hantera bristfällig information och kunna sälla bort felaktig information. De skall kunna reagera på oväntade händelser och på fiendens motåtgärder. Att utveckla ett sådant system kommer att kräva stora resurser och ta lång tid.

Vi kommer troligen att få se en evolutionär utveckling, där gradvis fler och fler funktioner hos systemen görs autonoma, och operatörernas roll övergår från plattformsstyrning till uppdragsstyrning och övervakning.

Den evolutionära utvecklingen av autonoma robotsystem behöver inte innebära en ständig nyanskaffning av robotar. Det räcker med en uppdatering av systemets mjukvara för att införa nya styrfunktioner. Modulära robotsystem, där också sensorer, kommunikationslänkar m.m. enkelt kan bytas ut ökar också flexibiliteten hos systemet, och gör framtida uppgraderingar billigare.

14 Fortsatt arbete

Projektet Styrning av samverkande robotar avslutas december 2002. Emellertid kommer ett nytt projekt att starta, Samverkande robotar i nätverk, där forskningen kring autonoma system får en naturlig fortsättning.

Detta nya projekt, som planeras pågå t.o.m. 2005, skall behandla följande frågeställning:

- Hur förbättra verkan mot olika typer av mål genom att utnyttja samverkande robotar?
- Hur kan underrättelse- och ledningssystem i NBF utnyttjas för vapenstyrning?

Projektet skall dels presentera metoder för samordnad styrning av flera robotar i nätverk dels värdera taktiska för- och nackdelar med samverkande robotar i NBF.

Projektet skall också ge en ökad kompetens framför allt inom området autonom styrning, som kommer till nytta i flera andra tillämpningar.

Arbetet kommer att bedrivas i nära samarbete med projektet Precisionsvapen i NBF, där ett flertal olika vapensystem och deras koppling till det framtida ledningssystemet kommer att belysas.

15 Referenser

- 1 Alvå P., Berglund E., Carlsson L., Laurent C., *Fiberoptiskt styrda robotar - förstudie*, FOA-R--96-00313-2.5--SE, oktober 1996.
- 2 Alvå P., Andersson F., Berglund E., *Fiberoptiskt styrda robotar - Systemaspekter*, FOA-R--97-00614-314--SE, november 1997.
- 3 Alvå P., Andersson F., Carlsson G., Karlsson M., *Fiberoptiskt styrt robotsystem - Aspekter på samordnade robotanfall*, FOA-R--99-01345-314--SE, december 1999.
- 4 Alvå P., Andersson F., Wallström D., *Studie av samverkande robotsystem – Insats mot landstigen mekaniserad bataljon*, FOA-R--00-01799-314--SE, december 2000.
- 5 Alvå P., Andersson F., Sandblom A., *Studie av samverkande robotsystem - Ett vapensystem ingående i ledningsnätverket*, FOI-R--0321--SE, december 2001
- 6 <http://www.insitugroup.net>.
- 7 IDR, oct 2001, pp 53-52.
- 8 <http://www.darpa.mil/mto/stab/index.html>
- 9 Qinfen Zheng, Sandor Z. Der and Hesham Ibrahim Mahmoud, "Model-Based Target Recognition in Pulsed Ladar Imagery", *IEEE Transactions on image processing*, Vol. 10, No. 4, April 2001.
- 10 ARMDEC US Army research and development and engineering centre.
- 11 O. Steinvall et.al. Laser based (flash) 3-D imaging for target recognition and terminal guidance-Technical overview and research problems- FOI rapport under sammanställning.
- 12 Q. Zheng, S.Z. Der and H. I. Mahmoud, "Model-Based Target Recognition in Pulsed Ladar Imagery", *IEEE Trans. on image processing*, Vol. 10, No. 4, April 2001.
- 13 M.J. Halmos, M. Jack, J. Asbrock, C Anderson, S. Bailey, G. Chapman, E. Gordon, P. Herning, M.Kalisher, L. Klaras, K. Kosai, V. Liquori, M. Pines V. Randall, R. Reeder, J. Rosbeck, S. Sen, P. Trotta, P. Wetzal, A. Hunter, J. Jensen, T .W. Trussell , A. Hutchinson, R. Balcerak , "3-D FLASH LADAR AT RAYTHEON, ", *Proc. of SPIE Vol. 4377, Laser Radar Technology and Applications VI*, 2001.
- 14 R.M. Heinrichs†, B.F. Aull, R.M. Marino, D.G. Fouche, A.K. McIntosh, J.J. Zay-howski, T.Stephens, M.E. O'Brien, M.A. Albota, R.M. Heinrichs, B.F. Aull, R.M. Marino, D.G. Fouche, *Three-Dimensional Laser Radar with APD Arrays*, *Proc. of SPIE Vol. 4377, Laser Radar Technology and Applications VI*, 2001.
- 15 O. Steinvall, D. Letalick, U. Söderman, L. Ulander och A. Gustavsson, " Laser radar for vegetation mapping", FOI-R—0232—SE, oktober 2002.

-
- 16 Asher Gelbart., Brian C. Redman, Robert S. Light, Coreen A. Schwartzlow, and Andrew J. Griffis, "Flash lidar based on multiple-slit streak tube imaging lidar", Proc. of SPIE Vol. 4423, Laser Radar Technology and Applications VI, 2002.
 - 17 André T., Isacson T., Kihlström G., Svensson J-E, *FoRMA/LUST Årsrapport 2000 - Situationsuppfattning och Ledning för Rätt insats*, FOI-R--0016--SE, Januari 2001.
 - 18 Fokas A., *Optimering av robotinsats med samverkande robotar - En litteraturstudie*, FOA-R--001800-314--SE, December 2000.
 - 19 Fokas A, *Styrlag för nära optimal målsökning för ett system med fiberoptiskt styrda robotar*, FOA-R--99-01346-314--SE, December 1999.
 - 20 Baxter J., Bartlett P., L. (2000) *Reinforcement learning in POMDP's via direct gradient ascent*. Proc. 17th Intern. Conf. on Machine Learning, p 41-48. Morgan Kaufmann, San Francisco, CA.
 - 21 McGovern Amy , Precup Doina, Ravindran B., Singh Satinder, Sutton Richard S. *Hierarchical Optimal Control of MDPs*, Proceedings of the 10th Yale Workshop on Adaptive and Learning systems, 1998
 - 22 Peshkin L., Kim K., Meuleau N., Kaebbling L. P. (2000) *Learning to cooperate via policy search*. In proc. of 16th Intern. Conf. on uncertainty in AI.
 - 23 Eklöf M., Pelo J., Ulriksson J., Wallström D., *Styrning av samverkande robotar – En Studie av Modellering och Simulering i FLAMES*, FOI-R-0322--SE, december 2001.
 - 24 Sandén E., *An Investigation and Preliminary Implementation of a Cognitive Model for Autonomous Missile Behaviour in FLAMES*, FOI-D--0013--SE, maj 2001.
 - 25 Ulriksson J., *An Investigation and Prototype Development of a Simulation Model of an Autonomous Co-operating Missile System*, FOI-D--0017--SE, maj 2001.
 - 26 Eklöf M., Pelo J., Ulriksson J., Wallström D., *Modellering av komponenter för att realisera ett Samverkande Robotsystem i FLAMES*, FOI-R--0733--SE
 - 27 Raicevic P., *Fibreoptic Guided Missiles - Optimization of flight paths - A Master's Thesis*, FOA-R--97-00663-314--SE, december 1997
 - 28 Brolund D., *Fibreoptic Guided Missiles - A Missile Seeker Model and Methods for Fusing Seeker Data in a System with Multiple Missiles*, FOA-R--97-00664-314--SE, december 1997
 - 29 Alvå P., Kallstenius S., Åström U-S, *ROSA - En simuleringsmiljö för samverkande robotar - Användarhandledning och programbeskrivning*, FOA-R--98-00889-314--SE, oktober 1998
 - 30 Alvå P., Åström U-S, *ROSA 2.0, Vidareutveckling av simuleringsmiljö för samverkande robotar, Användarhandledning och programbeskrivning*, FOA-R--00-01798-314--SE