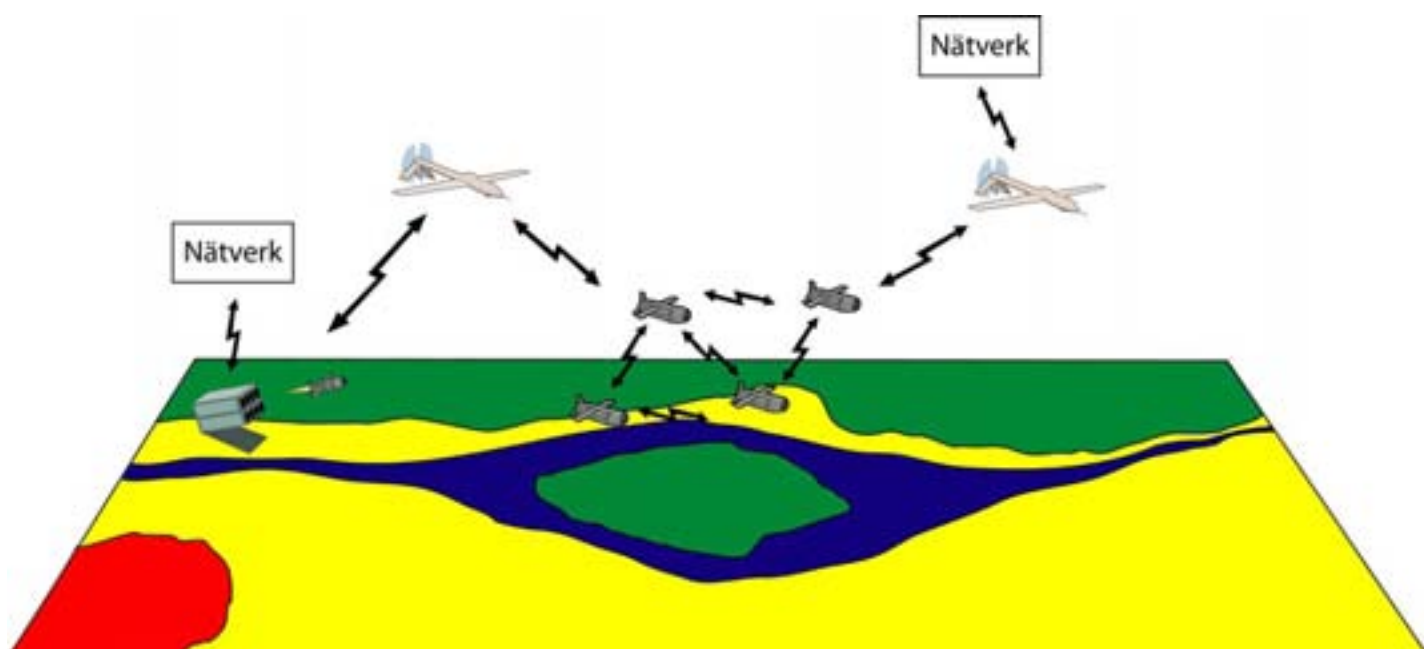


Samverkande robotar i nätverk - Slutrappport

Peter Alvå, Folke Andersson, Martin Hagström,
Johan Pelo, Dag Wallström, Sven-Lennart Wirkander,
Petter Ögren



FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1350 anställda varav ungefär 950 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömningen av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
Systemteknik
164 90 Stockholm

Tel: 08-555 030 00
Fax: 08-555 031 00

www.foi.se

Peter Alvå, Folke Andersson, Martin Hagström,
Johan Pelo, Dag Wallström, Sven-Lennart Wirkander, Petter Ögren

Samverkande robotar i nätverk - Slutrapport

Utgivare FOI - Totalförsvarets forskningsinstitut Systemteknik 164 90 Stockholm	Rapportnummer, ISRN FOI-R--1826--SE	Klassificering Användarrapport
	Forskningsområde 5. Bekämpning och skydd	
	Månad, år December 2005	Projektnummer E6003
	Delområde 51 VVS med styrda vapen	
	Delområde 2	
Författare/redaktör Peter Alvå Petter Ögren Folke Andersson Martin Hagström Johan Pelo Dag Wallström Sven-Lennart Wirkander	Projektledare Peter Alvå	
	Godkänd av Monica Dahlén	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning Försvarsmakten	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig Maria Sjöblom	
Rapportens titel Samverkande robotar i nätverk - Slutrapport		
Sammanfattning <p>Ett system av samverkande flygande robotar med en kombinerad spanings- och attackfunktion, vilka försetts med ett målsökarsystem, som med hög automatiseringsgrad kan särskilja olika måltyper och dessutom kan utbyta information med varandra, öppnar nya möjligheter för att underlätta målidentifiering och målval. Systemets förmåga ökar ytterligare om det dessutom kan kommunicera med ett yttre ledningsnätverk, till exempel ett dubbelriktat samband till en operatör. Systemet medger att vapenverkan kan ske helt autonomt, då ROE (Rules of engagement) medger detta. Normalt torde dock vapeninsatsen ske semiautonomt via en nätverksuppkopplad operatör med vetorätt.</p> <p>Ett samverkande flygande robotsystem torde vara ett effektivt vapen mot rörliga mål på det framtida stridsfältet, speciellt om spaningsUAVer, robotar och ledningsnätverk kan utbyta relevant underrättelse- och mållägesinformation under såväl sök- som anfallsfas. Algoritmer för samverkande autonomt uppträdande är också relevanta för andra framtida system, såsom UAV- och UGV-system.</p>		
Nyckelord samverkande system, simulering, autonoma system, styrda vapen		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 57 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Systems Technology SE-164 90 Stockholm	Report number, ISRN FOI-R--1826--SE	Report type User report
	Programme Areas 5. Strike and protection	
	Month year December 2005	Project no. E6003
	Subcategories 51 Weapons and Protection	
	Subcategories 2	
Author/s (editor/s) Peter Alvå Petter Ögren Folke Andersson Martin Hagström Johan Pelo Dag Wallström Sven-Lennart Wirkander	Project manager Peter Alvå	
	Approved by Monica Dahlén	
	Sponsoring agency Swedish Armed Forces	
	Scientifically and technically responsible Maria Sjöblom	
Report title (In translation) Collaborating missiles in a C3I net - Final report		
Abstract <p>A system of collaborating missiles, with a combined surveillance and attack capability, a highly autonomous target recognition functionality and information exchange between individual missiles, will present new possibilities for target identification and target selection. Communication with an external command and control network will further increase the system's total effectiveness. Target engagement can be fully autonomous or, more likely, semiautonomous with an operator linked to the network.</p> <p>A collaborating missiles system shows good potential against moving targets, particularly if the missiles can interact with surveillance UAVs and the C3I system during the attack. Algorithms to control collaborating autonomous missile systems are not exclusively for weapon systems. They can also be applied to UAV and UGV control systems.</p>		
Keywords collaborating systems, simulation, autonomous systems, weapon guidance		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 57 p.	
	Price acc. to pricelist	

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1	INLEDNING.....	6
1.1	UPPDRAGET.....	6
1.2	ARBETSUPPLÄGG.....	6
1.3	RAPPORTENS INNEHÅLL OCH DISPOSITION	8
2	VAD MENAS MED SAMVERKANDE ROBOTAR?	9
3	SAMMANFATTNING AV VERKSAMHET 2003-2005	12
3.1	FORSKNING PÅ AUTONOMA FUNKTIONER	12
3.1.1	<i>Målvalsalgoritm</i>	<i>12</i>
3.1.2	<i>Uppdragsplaneringsverktyg för SEAD-uppdrag.....</i>	<i>12</i>
3.1.3	<i>Hinderundvikande UVer som skapar och bryter formationer.....</i>	<i>14</i>
3.1.4	<i>Hinderundvikande UGVer.....</i>	<i>16</i>
3.1.5	<i>On-line Banplanering för lågtflygande luftfarkost.....</i>	<i>17</i>
3.1.6	<i>Uppgiftsfördelning och sekvensering för grupp av UVer.....</i>	<i>17</i>
3.2	SYSTEMSTUDIER.....	17
3.3	UTVECKLING AV SIMULERINGSVERKTYG OCH MODELLER.....	19
3.4	FÖRSÖKSPLATTFORM UGV	21
4	TAKTISK ANALYS AV SAMVERKANDE AUTONOMA SYSTEM.....	23
4.1	TYPSSITUATION – SKYDD UNDER FÖRFLYTTNING OCH FRAMSKJUTEN SPANING.....	23
4.2	SYSTEMSPELKORT	23
4.3	UAV-SPANING OCH ROBOTINSATS	24
4.4	KILLER BEE FÖR SPANING OCH VAPENINSATS	28
4.5	JÄMFÖRELSE MELLAN DE BÅDA TYPSSITUATIONERNA	29
4.6	SCANEAGLE MED SLUTFASSTYRDA ARTILLERIGRANATER.....	30
5	TEKNISK SIMULERING AV MÅLVALSALGORITM.....	31
6	SAMMANFATTNING AV PRELIMINÄR ALGORITMLITTERATURSTUDIE	38
6.1	SPANING OCH NEDTRYCKNING	38
6.1.1	<i>Grafsökning.....</i>	<i>38</i>
6.1.2	<i>Andra metoder.....</i>	<i>39</i>
6.2	MÅLTILLDELNING OCH SEKVENSERING	39
6.3	FLYGBANAN TILL MÅLET.....	39
7	SLUTSATSER.....	41
8	FORTSATT ARBETE.....	42
8.1	PROJEKTET SAMVERKANDE AUTONOMA SYSTEM MED BANPLANERING	42
8.2	TAKTISK SIMULERING AV TYPSSITUATIONEN	42
9	REFERENSER.....	45
	BILAGA 1.....	49

1 INLEDNING

Ett system av samverkande robotar, UAVer och UCARar med en kombinerad spanings- och attackfunktion samt möjlighet till informationsutbyte öppnar nya möjligheter att lösa komplexa uppgifter. Systemets förmåga ökar ytterligare om det dessutom kan kommunicera med ett yttre ledningsnätverk. Vapenverkan kan ske helt autonomt, då insatsreglerna (Rules of engagement) medger detta, men normalt torde dock vapeninsatsen ske semiautonomt via en nätverksuppkopplad operatör med vetorätt. Ett sådant system kräver dock att nya autonoma funktioner utvecklas för att fungera effektivt och tillförlitligt, även i de fall systemet opererar semiautonomt.

Tekniker för samordnad styrning och koncept för system av samverkande robotar har studerats i tidigare projekt. Inledningsvis har system av fiberoptiskt styrda robotar studerats [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. Därefter har fokus legat på robotsystem som utnyttjar en radio- eller laserlänk för dataöverföring mellan robotarna, där endast ett begränsat informationsutbyte kan ske [4, 5, 6].

I projektet Samverkande robotar i Nätverk ligger fokus på autonoma styrprinciper för system av kommunicerande och samverkande plattformar, med möjlighet till interaktion med andra aktörer via ett nätverk. Projektet studerar också såväl vilka taktiska möjligheter som samverkande robotsystem erbjuder, som de svårigheter implementeringen av den nya tekniken medför.

Ett autonomt samverkande system är av komplex natur, och dess uppträdande i relevanta typsituationer kan vara svårt att analysera. Därför har ett simuleringsverktyg med tillhörande modeller för att analysera såväl taktiskt/stridstekniska som tekniska aspekter av samverkande agenter i ett nätverk tagits fram.

1.1 Uppdraget

Projektet *Samverkande robotar i nätverk* har enligt uppdraget från Försvarsmakten haft som uppgift att 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 genomförts 2003-2005.

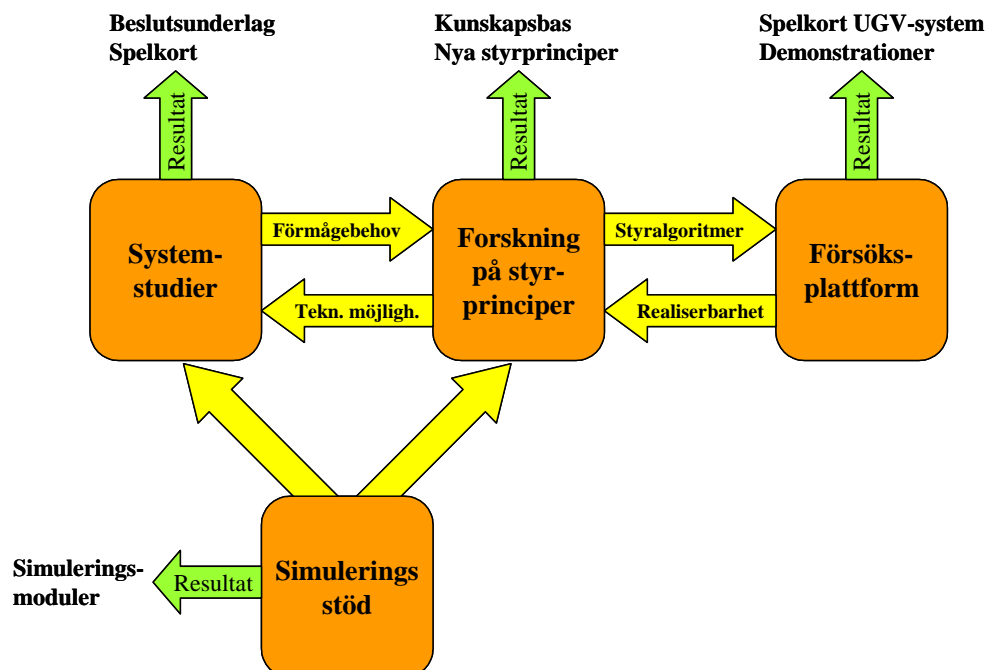
1.2 Arbetsupplägg

Arbetet i projektet har bedrivits på fyra fronter:

- Systemstudier för att belysa taktiska möjligheter med samverkande robotsystem.
- Grundläggande forskning på styrprinciper för samordnad styrning för att lösa några utvalda problem, samt för att bygga upp en kunskapsbas inom området autonoma system.

- Utveckling av simuleringsstöd för tekniska och taktiska simuleringar.
- Försök med samverkande autonoma UGVer.

Verksamheterna har kompletterat varandra. Systemstudierna har belyst vilka forskningsområden som är kritiska för en realisering av samverkande robotsystem. Forskningen på styrprinciper, å andra sidan, har gett ett underlag för att beskriva de tekniska aspekterna av systemstudien. Simuleringsstöd har utnyttjats både vid utvecklingen av nya styrprinciper och vid systemstudier. Försöksplattform UGV har gett en möjlighet att testa robustheten hos styrprinciper när ”verkligheten behagar hålla examen”. Den har också gett värdefull kunskap om svårigheten med och kostnaden för att implementera ny teknik.



Figur 1.1 Projektets verksamheter

Resultatet av systemstudierna riktar sig direkt mot Försvarens behov genom att ge beslutsunderlag för fortsatt forskning om samverkande system – robotsystem, UAV/UCAV-system, UGV-system, m.fl. – samt för planering av framtida vapensystem och analys av framtida hotbild. De spelkort som har producerats kan utnyttjas i andra verksamheter, t.ex. har projektet haft ett samarbete med FoRMA-studien i detta avseende.

Resultatet av forskningsverksamheten kommer också Försvarens till godo genom att den kunskapsuppbyggnad om autonoma system som har skett 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 har också gett resultat i form av simuleringsmoduler, som, liksom spelkortet, kan utnyttjas av andra studier och verksamheter, t.ex. FLSC.

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

1.3 Rapportens innehåll och disposition

Detta är en slutrapport för projektet Samverkande Robotar i Nätverk, och innehåller därför en sammanfattning av verksamheten under 2003-2005 (kapitel 3). Mycket av denna verksamhet har publicerats i en rad rapporter under perioden, och referenser till dessa ges i texten.

Under hösten 2005 genomfördes en systemstudie där taktiska aspekter av samordnad styrning belystes, och där simuleringar genomförts av en målvalsalgoritm för att visa på teknikens möjligheter och begränsningar i en specifik taktisk typsituation. Studien redovisas i denna rapport, kapitel 4-5.

Under hösten 2005 har också en bred litteraturstudie gjorts för att hitta nya forskningsområden och algoritmer som är intressanta för militära tillämpningar av samverkande autonoma system. Detta arbete presenteras i en kommande rapport, men sammanfattas också i kapitel 6.

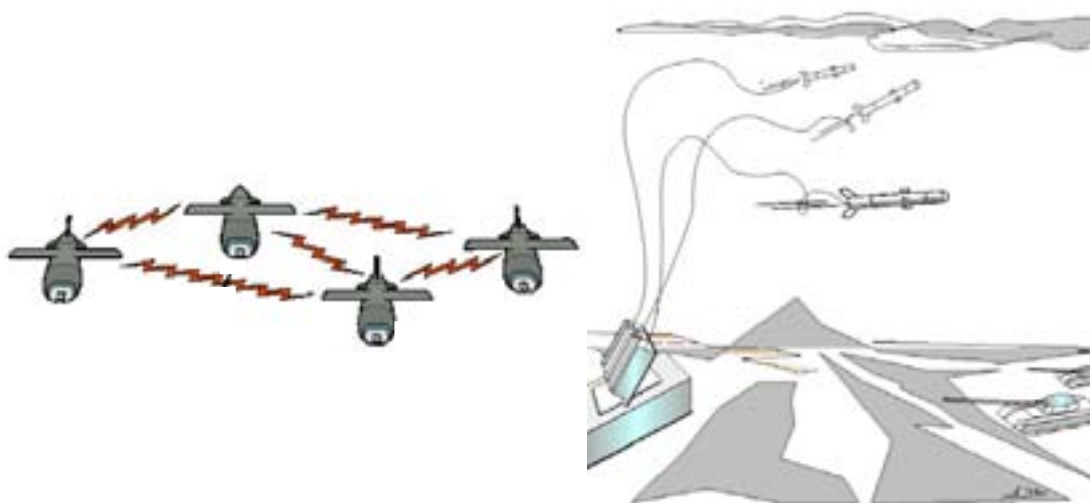
Rapporten inleds i kapitel 2 med en diskussion om begreppet Samverkande robotar och vad som ur perspektivet vapenstyrning är unikt för dessa system. Den avslutas i kapitel 7 med en diskussion om fortsatt verksamhet inom området Samverkande autonoma system, en verksamhet som får en fortsättning i projektet Samverkande Autonoma System med Banplanering, under 2006.

I en bilaga till rapporten presenteras några spelkort som har använts i höstens systemstudie.

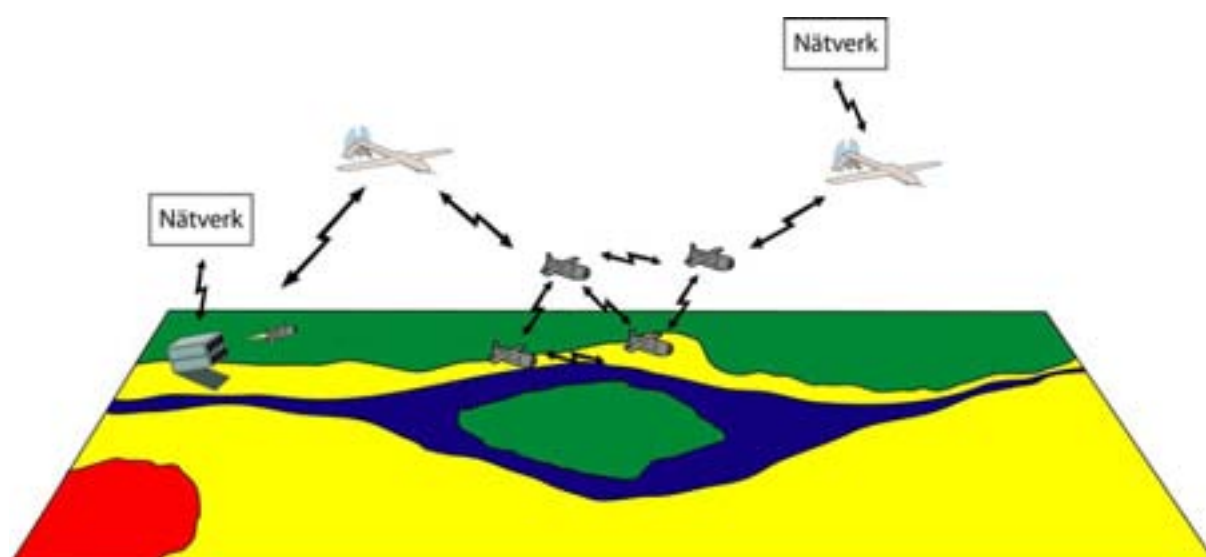
2 VAD MENAS MED SAMVERKANDE ROBOTAR?

I detta arbete definieras samverkande robotar i princip som ett system där de enskilda robotarna efter avfyrning kan utbyta information med varandra, och därmed kan utföra sitt uppdrag mer effektivt än om denna möjlighet till samordning inte existerade.

I de flesta fall tänker vi oss att informationsutbytet sker genom direkt kommunikation mellan de enskilda robotarna. I projektet har koncept studerats som utnyttjar såväl radiolänk som laserskommunikationslänk. Informationsutbytet kan emellertid också vara indirekt. Ett exempel är ett system av fiberoptiskt styrda robotar där varje robot kommunicerar med eldenheten via en optisk fiber, som hasplas ut efter roboten. Informationen från en robot kan då länkas till övriga robotar för att möjliggöra ett samordnat anfall. I detta fall sker ett logiskt informationsutbyte mellan de enskilda robotarna.



Figur 2.1 Direkt respektive indirekt informationsutbyte



Figur 2.2 Informationsutbyte i nätverk.

En stor skillnad mellan de båda koncepten är möjligheten till operatörsmedverkan. I det fiberstyrda fallet har eldenheten tillgång till all information från robotarna, och en eller flera operatörer kan direkt medverka vid styrningen. I radiolänksfallet har robotarna begränsade möjligheter att kommunicera med eldenheten, varför systemet måste kunna uppträda autonomt.

I ett utbyggt nätverksförsvar ges nya möjligheter med samverkande robotsystem. De enskilda robotarna utgör noder i det stora nätverket, de kan utbyta information inte bara mellan sig själva utan också med andra noder i nätverket. Via nätverket kan en operatör överföra styrkommandon till robotsystemet, varvid en lägre grad av autonomitet hos robotsystemet kan erhållas, precis som i det fiberoptiskt styrda systemet.

Systemegenskaper hos samverkande robotsystem

Här belyses några aspekter kring styrsystemet för ett autonomt, samverkande robotsystem. En beskrivning av styrproblem för multiagentsystem återfinns också i [7].

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

- styruddragen huvudsakligen är av kinematisk natur,
- systemet dynamiskt skall anpassa 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.

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 sjömålsrobotsystemet RBS 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, bandbredds begränsningar, 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 fristående/enskilt beteende, men även ett system med obegränsad kommunikation kan uppträda så om detta av någon anledning visar sig vara att föredra. Ett intressant problem är hur systemet kan välja att dela upp sig i åtminstone partiellt oberoende grupper, samt hur det kan sammansmälta sådana oberoende grupper till en. Målfördelning 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 väljer ut 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.

- icke-linjär Lyapunovteori,
- ”min cost flow”-optimering,
- ”weight constrained shortest path”-problem,
- 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 ett scenario där målen är många, okända och relativt dåligt försvarade 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 maximera verkan av robotinsatsen.

Urban strid kan innebära ytterligare krav, t.ex. en större betydelse av graderad verkan, och möjlighet för operatör att välja/godkänna mål.

3 SAMMANFATTNING AV VERKSAMHET 2003-2005

Projektets verksamhet har bedrivits på fyra olika fronter,

- forskning på algoritmer för autonom styrning,
- systemstudier,
- utveckling av simuleringsstöd och
- arbete med försöksplattform.

Algoritmforskningen har varit grunden för verksamheten, men övriga delar har också varit viktiga komplement. I detta kapitel sammanfattas verksamheten under projektets tid, med referenser till tidigare publicerade rapporter och artiklar.

3.1 Forskning på autonoma funktioner

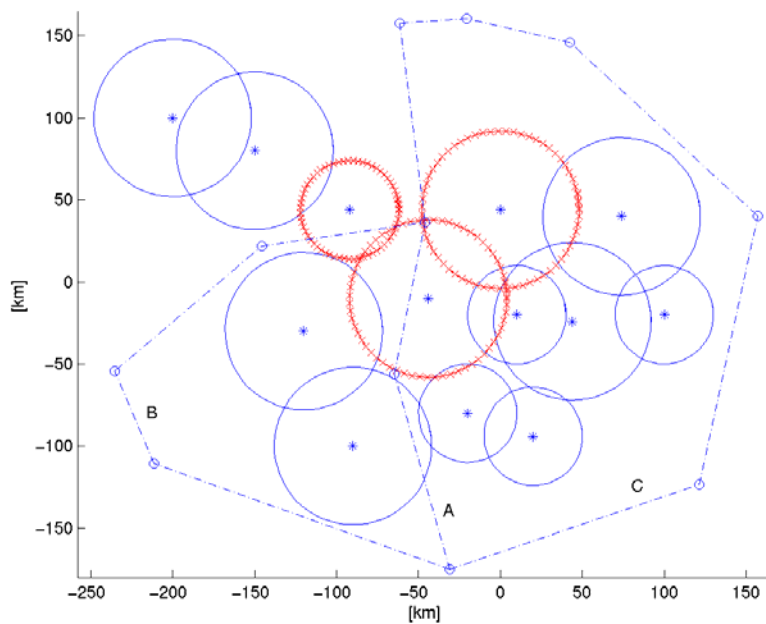
I detta kapitel presenteras de områden som har studerats och som har publicerats i rapporter och konferensbidrag. Under hösten 2005 har en bred litteraturstudie gjorts för att hitta nya forskningsområden och algoritmer som är intressanta för militära tillämpningar av samverkande autonoma system. Detta arbete presenteras i kapitel 6.

3.1.1 Målvalsalgoritm

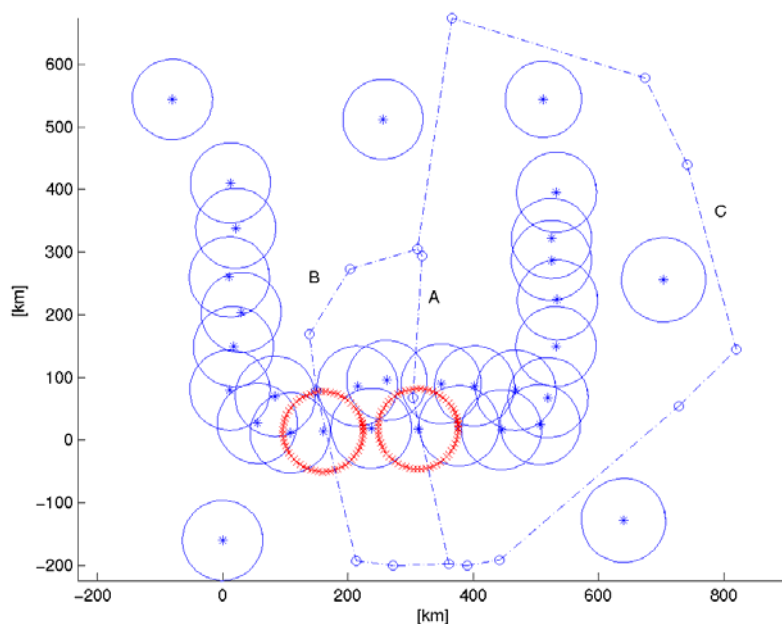
En algoritm för distribuerat målval för ett system av samverkande luftfarkoster, robotar eller UAv'er, har utvecklats. Denna presenteras i detalj i samband med simuleringarna i kapitel 5.

3.1.2 Uppdragsplaneringsverktyg för SEAD-uppdrag

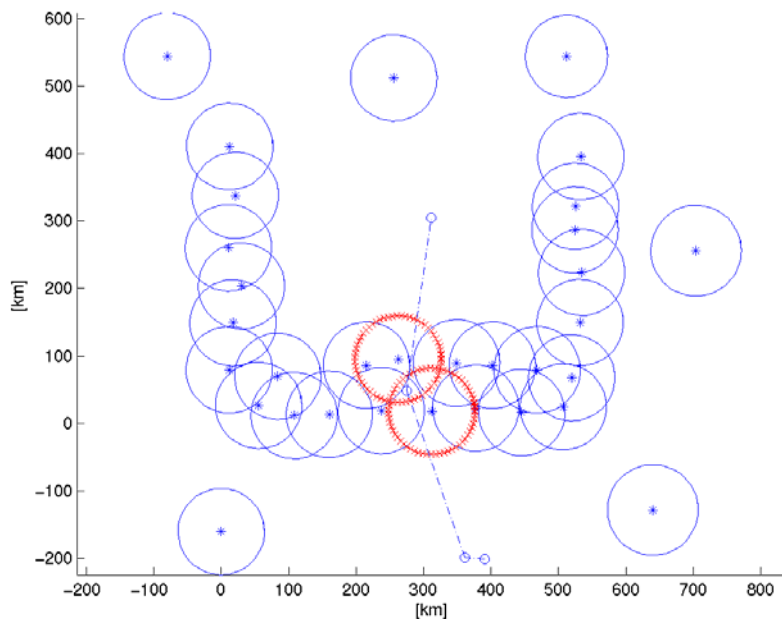
Väg- och målval vid så kallade SEAD uppdrag (Suppression of Enemy Air Defence) har studerats. Syftet med ett SEAD uppdrag är att bekämpa eller genom hot därom trycka ned, fientligt luftvärn för att på så sätt göra luftrummet tillgängligt för egna luftstridskrafter. Resultaten behandlar metoder för att göra planeringen och genomförandet av ett sådant uppdrag av en grupp UAv'er mer autonomt. Algoritmer har tagits fram som på ett tydligt sätt ger en mänsklig operatör hjälp att välja den väg som minimerar risken under givna begränsningar i flygsträcka. Algoritmen föreslår vilka luftvärnsställningar som skall flygas runt och vilka som skall bekämpas och passeras, baserat på ett antal beväpningsalternativ, samt olika antal signalsökande robotar, som operatören har att välja mellan. Planeringsverktyget kan sedan även användas reaktivt under uppdragets gång för att kontinuerligt övervaka risknivån och ge operatören möjlighet att avbryta om de nya förutsättningarna, t.ex. nedskjuten UAV eller nyupptäckta hot, gör genomförbarhets sannolikheten för låg. I Figur 3.1 och i Figur 3.2 respektive Figur 3.3 ses två olika scenarier med tillhörande föreslagna flygbanor.



Figur 3.1 Cirklarna visar luftvärns räckvidder. De tjocka cirklarna marker luftvärn som skall angripas med signalsökande- eller markmålsrobotar. Med flygsträcke- begränsningen 250 km fås flygbana A, med 32 % överlevnadssannolikhet. Begränsningen 500 km ger flygbana B med 85 % överlevnadssannolikhet. Med ett överflöd av bränsle motsvarande begränsningen 1000 km fås bana C med tillhörande sannolikhet 99 %.



Figur 3.2 Tre föreslagna banor. Begränsningen 600 km ger bana A med 20 % överlevnads- sannolikhet. Begränsningen 1000 km ger bana B, med 80 % överlevnadssannolikhet. Begränsningen 2000 km ger slutligen bana C helt utan risk.



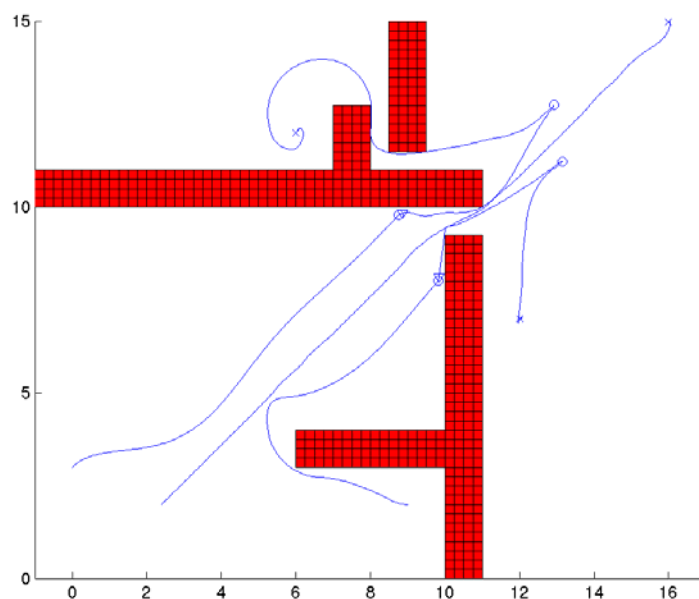
Figur 3.3 Med 2 signalsökande robotar och en begränsning på 600 km får vi ovanstående bana, och en överlevnadssannolikhet på 69 %.

Detta arbete redovisas i rapporten [8], samt en fördjupad version i artikeln [9]. De två viktigaste vetenskapliga bidragen är det formellt korrekta sättet att ackumulera riskuppskattningar, samt sättet att approximativt lösa bränslebegränsade vägvalsproblem.

Studien ovan är del i ett Europeiskt samarbetsprojekt inom ramen för GARTEUR (Group for Aeronautical Research and Technology in Europe). Inom detta samarbete har det vidare SEAD-problemet studerats. Förutom ovanstående arbete har projektet även bidragit med en matematisk modell för ett SEAD-scenario. Denna modell finns beskriven i [10].

3.1.3 Hinderundvikande UAVer som skapar och bryter formationer

I detta arbete har vi studerat en algoritm för att autonoma fordon decentraliserat skall kunna skapa och bryta formationer. Att röra sig i formation kan ha flera fördelar. Genom att samutnyttja sensorkapacitet och annan information kan den individuella lägesbilden förbättras. Genom taktiskt uppträdande kan även vapenresurser samordnas, för att ge hela gruppen ett bättre skydd än individerna skulle ha var för sig. I en situation där ett antal robotar rör sig i samma miljö kan det således vara idé att skapa formationer när så är möjligt, och att sedan bryta dessa när omständigheterna, t.ex. att fordonen har olika slutdestinationer, så kräver. En metod har utforskats för att åstadkomma ett decentraliserat slutande och brytande av formationer, utan att riskera de problem som ofta är förknippade med att byta mellan två olika styrlagar.



Figur 3.4. De tre helikoptrarnas banor sedda ovanifrån.

De simuleringar som har genomförts använder en modell som är lämplig som högnivåbeskrivning av t.ex. en helikopter, d.v.s. ett fordon som kan röra sig i alla riktningar men med begränsad acceleration och hastighet. En visualisering har genererats där tre helikoptrar rör sig på låg höjd i en stadsmiljö och sluter och bryter triangelformation när de rör sig mellan husen. Artikeln har presenterats på IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2004), [11].



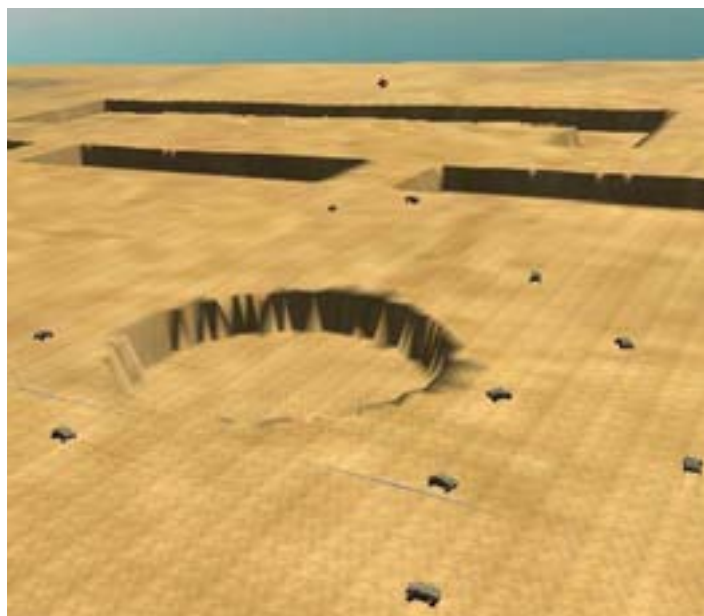
Figur 3.5. Stillbild där helikoptern i mitten just har kommit ut bakom byggnaden.

3.1.4 Hinderundvikande UGVer

I detta arbete har idéer från kontrollerad yttäckning kompletterats med en funktion för hinderundvikande för att möjliggöra en naturlig rörelse för en stor grupp fordon. Algoritmen kan användas för att förflytta grupper av robotar till ett förutbestämt mål, utan att de kolliderar med varandra eller med hinder. På vägen håller de ihop i en formation. Vi har kombinerat en potentialbaserad metod, som används för att hitta kortaste vägen till målet, och en yttäckningsmetod för att optimera placeringen av sensorer på ett öppet fält.



Figur 3.6. Ett terrängfordon ur simulatormiljön.



Figur 3.7. Gruppen rör sig på båda sidor om hindret.

Vår algoritm är bevisat säker mot kollisioner, oavsett form på hindren. Den har visat sig ge pålitlig konvergens till målet i simuleringar och robotarna bildar hexagonala gitterformationer när de rör sig på öppna ytor. Algoritmen är helt decentraliserad och mängden beräkningar som varje robot behöver göra ökar försumbart när fler gruppmedlemmar tillkommer. Artikeln beskriver algoritmen och dess egenskaper och redovisar resultat från simuleringar i två olika miljöer. Dels har vi simulerat i Matlab, och dels i en grafisk datormiljö, där robotarna har modellerats efter terrängfordonet HMMWV, se Figur 3.6 och Figur 3.7. Resultaten redovisades i rapporten [12].

3.1.5 On-line Banplanering för lågtflygande luftfarkost

I samarbete med avdelningen för Optimeringslära och systemteori på KTH bedrivs forskning på Realtids, eller on-line, banplanering och trajektorieoptimering för luftfarkoster. Samarbetet sker i form av en delfinansierad doktorandtjänst.

Traditionellt löses banplanering med hjälp av klassiska metoder från optimal styrteori. För att kunna verka i en föränderlig miljö och mot rörliga mål behövs emellertid algoritmer som kan köras i realtid på vapenplattformen. Sådana metoder studeras vilket bl.a. har resulterat i artikeln [13].

3.1.6 Uppgiftsfördelning och sekvensering för grupp av UAVer

Inom ramen för ett examensarbete studeras olika varianter av och lösningsmetoder för problem liknande det s.k. Traveling Salesman Problemet (TSP). Detta problem handlar om att välja ordning på ett antal punkter som skall besökas. Sådana problem är mycket relevanta när ett antal UAVer skall besöka ett antal mål på t.ex. så kort tid som möjligt.

3.2 Systemstudier

Syftet med systemstudier är att lyfta fram de taktiska och stridstekniska effekter som nya metoder för samverkande autonom styrning kan ge, och visa på vilka tekniska system som kan komma att utnyttja tekniken. Studierna visar på konsekvenserna av utvecklingen inom autonomi för förmågan hos såväl egna förband som för tänkbara motståndare. Systemstudierna belyser också vilka forskningsområden som är kritiska för en realisering av samverkande system, vilket ger underlag för att inrikta algoritmeforskningen på de mest relevanta områdena.

Systemstudierna inleddes 2003 med en relativt bred analys av tänkbara systemkoncept, och ett antal typsituationer skissades, för att belysa de autonoma egenskaperna hos dessa system [14]. De typsituationer som behandlades var, Skydd under förflyttning – framskjuten spaning, Indirekt bekämpning av mekförband, SEAD/DEAD (Destruction of Enemy Air Defence), Samverkan mellan radar-UAV och jaktrobot och Insats mot ytfartyg.

Under 2004 gjordes en fördjupning av en typsituation där en svensk snabbinsatsstyrka har satts in i en konfliktsituation på den afrikanska kontinenten [15]. Typsituationen hämtades från PerP-studiens spelverksamhet tillsammans med FOI-projektet FoRMA under hösten 2004. Fokus under denna del låg på att utveckla metoder för simuleringsstödd taktisk systemanalys.

Samverkande robotar har i tidigare studier i princip betraktats som ett långräckviddigt indirekt vapensystem, som också förutsätter en förmåga hos systemet att själv svara för målinmätning, med utgångspunkt från den underrättelseinformation systemet förses med före avfyrning. Med ett nätverksförsvar uppstår nya möjligheter, där sensor och vapendel inte längre behöver vara så starkt integrerade. Ett robotsystem som kan kommunicera med nätverket kan inviseras mot

lämpligt mål av annan sensor, t.ex. en UAV. Den kan också ”manuellt” in visas av utpekare i målområdet.

Vid systemstudierna har skissats på ett antal vapensystem som utnyttjar samband för att fullfölja sin uppgift. Några av dessa system är:

Robotsystemet ”EURAAS”

EURAAS (EUROPEAN Autonomous Attack System, en vidareutveckling av LOCAAS-systemet) är ett turbojetmotordrivet robotsystem 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.

Systemet utnyttjar en laserkommunikationslänk, räckvidd 5-8 km, för informationsutbyte mellan enskilda plattformar. Länken kan också utnyttjas för kommunikation med andra typer av system, t.ex. UAVer eller målutpekande MARKUS-soldat.

SpaningsUAV-systemet ”CASTOR”

CASTOR är en kolvmotordriven spaningsUAV som baseras på en tänkbar vidareutveckling och anpassning av UAV-systemet ”SEASCAN A/B” [16].

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.

TAURUS Transporter – Bärrobot med samverkande substridsdelar

Denna grupp av spelkort beskriver en bärrobot (TAURUS Transporter, en utvecklad variant av KEPD 350) som kan bära två olika lastalternativ. Det första alternativet utgörs av åtta stycken EURAAS. När dessa avsöndrats från bärroboten kan de kommunicera såväl inbördes som med i området förekommande bärrobotar, spaningsUAVer och andra kommunikationsnoder i Nätverket.

Det andra alternativet är 12 stycken MOMAS – Modulariserat Obevakat Nätbildande Marksensorssystem, som är en marksensor av multifunktionstyp, utrustad med både en riktningskänslig akustisk sensor och en vibrationssensor, avsedd för luftlandsättning. Efter fällning upprättas automatiskt kontakt med varje MOMAS inom räckvidd, samt med andra enheter som är utrustade med kompatibel kommunikationsutrustning.

LARUS - Loitering Aerial Robotic Ubiquity System

Spelkortet beskriver ett obemannat aerodynamiskt patrullerande nätverksintegrerat transport-, underrättelse- och bekämpningssystem med (semi-)autonom förmåga att etablera och under lång tid utgöra ett trovärdigt lufthot mot rörliga eller flyttbara markmål (även lättare sjösmål) inom ett geografiskt avgränsat område. Med en operatör i beslutsloopen kan systemet betraktas som en ”svärmuppträdande” flygande eldunderstödsreservoar med hög tillgänglighet för insatser mot mål med begränsad exponeringstid.

Systemets ”taktiska grundenhet” utgörs av fyra samverkande LARUS-UAVer, varav den första, här kallad ADMINISTRATOR, svarar för funktionerna översiktlig spaning, målinvisning och sambandsnod (”koncentratornod”) med ”gateway”-funktion till operatör. De övriga tre enheterna, här kallade EFFECTOR, är försedda med dels en målsökare av LADAR-typ (jfr. LOCAAS), dels en verkanslast bestående av tre substridsdelar av BONUS-typ. Multifunktions-UAVn i systemet tillåter dock ett flertal andra lastalternativ, varför systemet kan anpassas till många olika taktiska situationer. Systemet kan också samverka med andra system.

Eldunderstödssystemet “NETFIRES”

NETFIRES är ett plattformsoberoende, nätverkskopplat indirekt eldunderstödssystem, som med utgångspunkt från krav på en flexibelt användbar bekämpningsförmåga, specificerats och utvecklats för att, dels avge indirekt eld, dels lösa uppgifter av typen väpnad spaning med (semi-)autonom vapeninsats. Auktoriserad användare (t.ex. en MARKUS-soldat), som har utrustats med en för ändamålet lämplig sambandsutrustning, kan efter att ha tilldelats ett lösenord utnyttja ett eller flera i stridsområdet grupperade NETFIRES. För de båda i systemet ingående robottyperna (LAM resp. PAM) kan dubbelriktat samband upprättas mellan operatör och robot, såväl före som efter avfyring, för exempelvis mållägesuppdatering eller överföring av spaningsinformation.

LAM-roboten är turbofläktmotordriven och har relativt lång aktionstid men begränsad stridsdelsstorlek. Den är i huvudsak avsedd för väpnad spaning, med egen möjlighet till vapeninsats mot ”halvhårda” måltyper. PAM är försedd med en drivkraftsreglerbar raketmotor och avsedd för insats mot såväl fasta som rörliga markmål inom avståndsintervallet 0,5 – 50 km från utskjutningsplatsen.

NETFIRES, som bedöms vara operativt år 2011, samutvecklas av Lockheed-Martin och Raytheon.

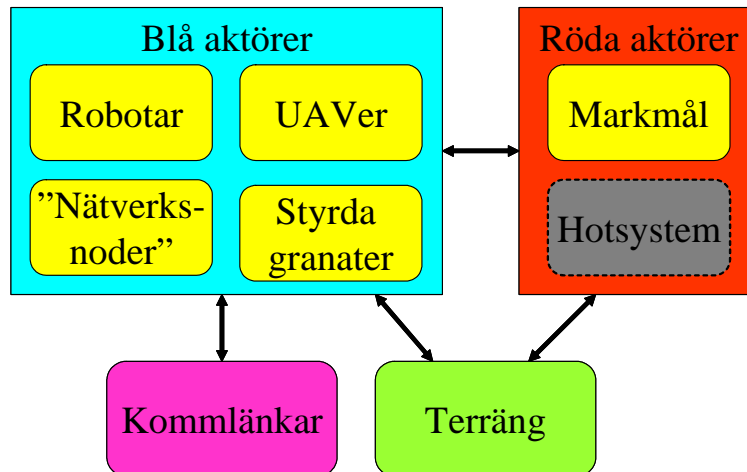
3.3 Utveckling av simuleringsverktyg och modeller

En ambition i projektet har varit att kunna utföra taktiska och stridstekniska simuleringar med en lägre upplösning, för att stödja en taktisk värdering som till största delen genomförs som ett analytiskt spel. Sådana simuleringar behöver inte ställa lika höga krav på alla ingående modeller. Till exempel kan robotsystemets förmåga till sensortäckning över tiden simuleras utan att terräng och målobjekt har modellerats i detalj. Det har visat sig att utveckling av modeller på taktisk nivå för ett samverkande robotsystem innebär en liknande metodik som vid forskning på styralgoritmer. En iterativ utvecklingsprocess behövs, där nya idéer till modeller behöver utprovas i förenklade typfall, ibland fristående och ibland tillsammans med andra delar av robotsystemet.

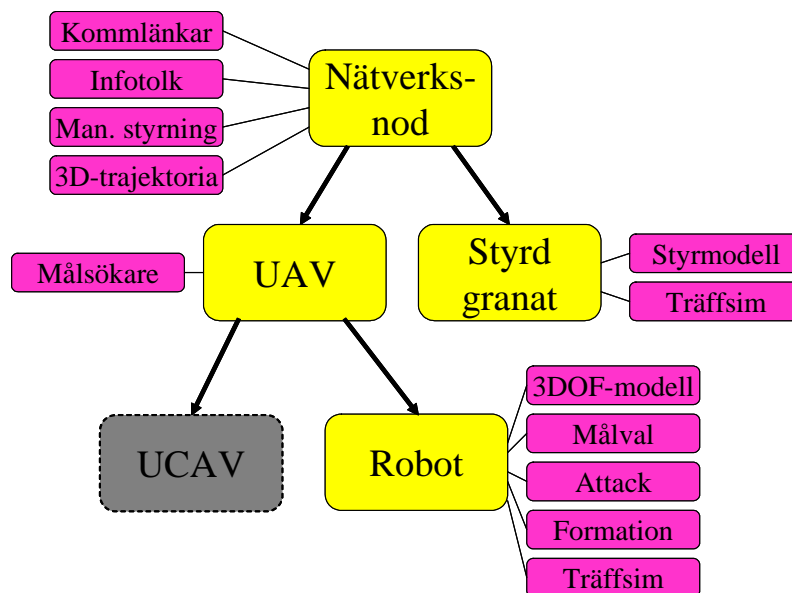
Då olika modeller eller delmodeller skall kunna modelleras på olika teknisk nivå är det ett krav på simuleringsverktyget att vara konstruerat med detta i åtanke. I denna typ av evolutionär modellutveckling är det också svårt att förutse vilken typ av interaktion en modell kommer att kräva med andra modeller och med verktyget i stort innan modelleringsarbetet påbörjas. Allt detta innebär att utvecklade delkomponenter ständigt behöver modifieras, och verktyget behöver anpassas för att hantera de nya kraven.

Tidigt i projektet har olika alternativ för simuleringsmiljöer utvärderats [17] och beslut togs att använda ROSA (ROBotSAMverkan) som utvecklats på FOA under perioden 1996-1998. ROSA utvecklades först för att simulera ett system av fiberoptiskt styrda robotar, men anpassades senare för att också simulera samverkande robotsystem med trådlös kommunikation. Se [18, 19] för dokumentation.

Programpaketet har vidareutvecklats för att hantera flera typer av system och nya modeller har implementerats. Det har också bytt namn till ISIS (Intelligent System I Samverkan). Utvecklingen följer samma filosofi som gamla ROSA, att bara utveckla de moduler och funktioner som för tillfället behövs för att studera den aktuella frågeställningen, en princip som har gjort det möjligt att lägga merparten av projektets resurser på verksamhetens fokus, forskning på styrprinciper. Simuleringsverktyget ISIS beskrivs i [20].



Figur 3.8 Aktörer som har modellerats i ISIS. Nätverksnoder är en generell klass av aktörer med modeller för kommunikationslänkar och informationsfusion. Hotsystem är under utveckling.



Figur 3.9 Nätverksnod med underklasser, samt de modeller som hör till respektive aktör. Egenskaperna hos Nätverksnod ärvs av dess underklasser.

En simulering i ISIS kan genomföras enligt två olika principer – ”batchsimulering” eller ”interaktiv simulering”. I en batchsimulering körs ett scenario igenom så fort som möjligt, och resultatet av simuleringen kan sedan studeras i efterhand. I en interaktiv simulering körs scenariot i realtid, och förloppet kan följas i ett grafiskt interface. Vid interaktiv simulering är det också möjligt att manuellt påverka simuleringen, t.ex. genom att med joystick styra fientliga

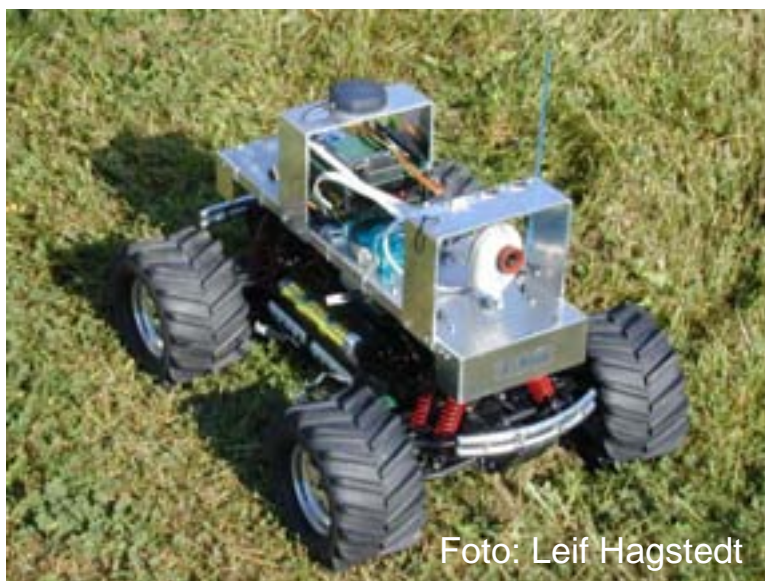
mål eller ge ”operatörskommandon” till ett vapen-, sensor- eller ledningssystem. Resultatet från en interaktiv simulering kan, precis som för en batchsimulering, studeras i efterhand.

ISIS är, precis som ROSA, utvecklat med hjälp av Borland Delphi och Object Pascal och är anpassat för Windows-plattformar. Målsättningen har dock varit att de modeller som har utvecklats beskrivs på ett generellt sätt, vilket underlättar möjligheten att lyfta in dem också i andra simuleringsmiljöer.

3.4 Försöksplattform UGV

Projektet har deltagit i framtagandet av en försöksplattform för samverkan mellan autonoma farkoster, tillsammans med andra projekt inom institutionen för Flyg och Autonoma System. Avsikten med arbetet är att erhålla en experimentell resurs som kan användas för att verifiera kvaliteten hos befintliga förslag på hur autonoma grupp beteenden skall förverkligas, samt också för att förfina och utveckla nya metoder. Andra projekt avser att använda en eller flera farkoster för att studera och verifiera olika aspekter på styrning.

Utvecklingen av försöksplattformen sker inom ramen för en verksamhet som kallas AVEC (Autonomous VEHICLE Control), och som finansieras av flera projekt. AVEC ansvarar för att ta fram hårdvara i form av farkoster (radiostyrda bilar), styrdatorer, sensorer m.m. och mjukvara i form av grundläggande styrsystem och utvecklingsmiljö. Framtagning av algoritmer för samordnad styrning av plattformarna (UGVerna) sker emellertid inom ramen för projektet Samverkande robotar i Nätverk.



Figur 3.10 Försöksplattform UGV

Inledande försök med försökssystemet har gjorts under hösten 2005. Dessa redovisas i [21].

Experimentplattformen som utvecklas ger goda möjligheter till att verifiera algoritmer och teorier för autonoma farkostsystem. De första försöken har gällt navigeringsfunktioner som är nödvändiga för att utföra mer avancerade försök. Plattformen erbjuder inte bara möjligheten att prova algoritmer för samverkande system, utan lämpar sig också för avancerade sensorfusionsalgoritmer för navigering.

Valet av försöksplattform har gjorts med sikte på att minimera kostnaderna, vilket visat sig viktigt, eftersom de praktiska problem som tenderar att uppstå vid all försöksverksamhet ofta

tar stor del av den totalt tillgängliga tiden i anspråk. Om mer komplexa lösningar hade valts skulle kostnaderna ha blivit väsentligt högre.

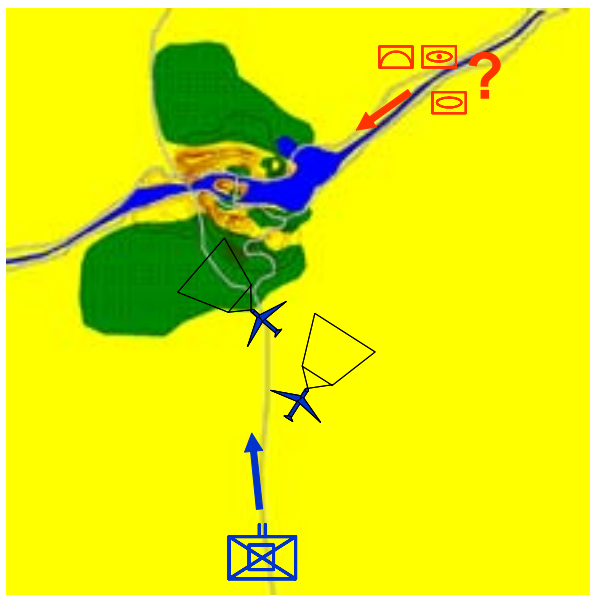
Genom att fokusera på enkla lösningar, där svåra sensorproblem som identifiering och klassificering lämnas åt sidan, kan de för algoritmerna centrala frågorna studeras i en experimentell miljö, vilket ger nödvändig återkoppling till övrig forskningsverksamhet.

4 TAKTISK ANALYS AV SAMVERKANDE AUTONOMA SYSTEM

Under hösten 2005 genomfördes en systemstudie där taktiska aspekter av samordnad styrning belystes. Som underlag till studien har framför allt det material utnyttjats som har tagits fram tidigare i projektet (se föregående kapitel), kompletterat med framför allt några nya systemspelkort. Resultatet från studien redovisas i form av en typsituation.

4.1 Typsituation – Skydd under förflyttning och framskjuten spaning

I den valda typsituationen befinner sig det egna förbandet, en del av insatsstyrkan, under en längre förflyttning mot ett insatsområde. På väg mot detta insatsområde måste man passera ett vattendrag i ett bergspass, där man under den senaste tiden har observerat en viss fientlig aktivitet.



Figur 4.1 Eget förband passerar ett bergspass under framryckning. Fientliga förband har siktats i passet.

Det är viktigt att förflyttningen sker under stor försiktighet, då endast mycket ringa förluster kan accepteras. Insatsstyrkan är därför beroende av en kontinuerlig övervakning av framryckningsvägen för att i god tid upptäcka eventuella hot. Man behöver också tillgång till indirekta insatssystem för att kunna bekämpa eller hålla nere eventuella fiender utan att behöva engagera sig i direkt strid.

4.2 Systemspelkort

Under systemstudien har ett antal vapensystem beskrivits, där ingående plattformar utnyttjar sambandslänkar för informationsöverföring sinsemellan för att i samverkan fullfölja en uppgift. Systemen är:

ScanEagle™

ScanEagle™ är en lätt spanings-UAV avsedd för militär och civil övervakning. Systemet är mycket flexibelt och kan utrustas med ett stort antal spaningssensorer. Farkosten luftsätts med hjälp av en mindre katapult och tas hem med hjälp av ett rep i en mast. Plattformen är försedd med EO- och bildalstrande IR-sensor, samt laser- och RF-länk för kommunikation.

LOCAAS™

LOCAAS™ är en ca 80 cm lång, med utfällbara vingar och styrytor försedd, turbojetmotor-driven, GPS-navigerande attackrobot/substridsdel som med hjälp av en 3D-mätande laserradar, från ca 200 m flyghöjd, under 30 minuter kan avspana en yta motsvarande ca 80 km². Den har en stridsdel med tre valbara verkansmoder, ”long rod”, ”aerostable slug” alternativt splitterdusch. Med laserkommunikationslänk kan flera plattformar kommunicera sinsemellan eller med andra aktörer, t.ex. ScanEagle™.

Killer Bee

Killer Bee är en kolvmotordriven (mini-)UCAV, av typen ”Blended wing-body”, med skjutande propeller. Den är försedd med EO-, bildalstrande IR-, laserradar- och millimeter-vågssensor, samt laser- och RF-länk för kommunikation. Verkanslast utgörs av två BONUS-stridsdelar. Plattformen katapultstartas och återtas efter avslutat uppdrag med fångstnät.

Long Gun

Long Gun uppvisar likheter med det tidigare beskrivna återanvändbara Killer Bee-systemet dock med skillnaden att dess flygande segment opererar med ca 100 km/h högre fart. Vidare tar Long Gun-systemet mer last vilket innebär att plattformen kan medföra en relativt stor stridsdel avsedd för bekämpning av ett enskilt mål, alternativt flera mindre stridsdelar (t.ex. 10 st. BONUS) avsedda för ett antal olika mål.

Utförligare systembeskrivningar i form av spelkort presenteras i Bilaga 1.

I detta kapitel kommer vi att studera i huvudsak två olika systemlösningar. Dessa har anpassats så att de kan utgöra en del av insatsstyrkan (som är av bataljons storlek), dvs. de är taktiska system. Det första alternativet bygger på en kombination av ScanEagle och LOCAAS. Det andra alternativet utgörs av flera Killer Bee-plattformar i samverkan. Alternativt kan Long Gun utnyttjas i stället för Killer Bee i typsituationen, med ungefär samma resultat.

Ett tredje systemalternativ som behandlas avslutningsvis är ScanEagle kombinerad med indirekta eldsystem med slutfasstyrd ammunition. Detta koncept studeras för närvarande i projektet Precisionsvapen i NBF [22], och har därför endast behandlats översiktligt här.

4.3 UAV-spaning och robotinsats

Insatsstyrkan förfogar över spaningssystemet ScanEagle, som utnyttjas under hela förflyttningen för att spana längs framryckningsvägen. Systemet skall i god tid förvarna om eventuella hot, så att lämpliga motåtgärder kan vidtas för att så långt som möjligt undvika direkt stridskontakt. Två plattformar är ständigt i luften för att ge en godtagbar sensortäckning och framförhållning (Figur 4.1).

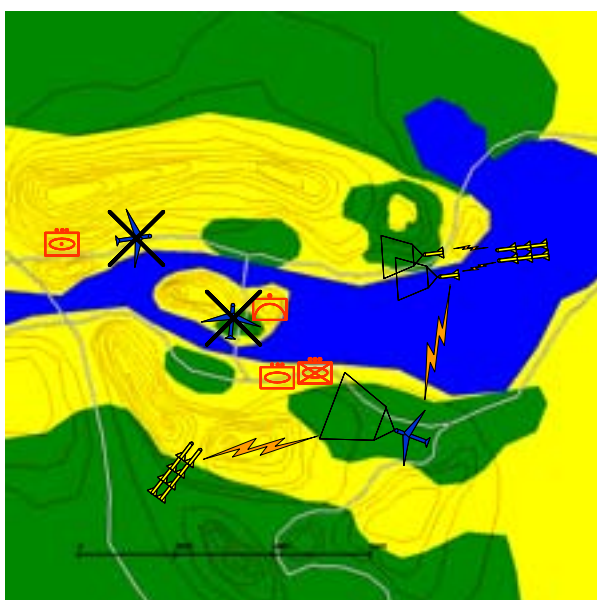
När förbandet närmar sig det bergspass, där tidigare underrättelser har rapporterat om fientlig aktivitet, sätts en tredje UAV-plattform in för att på kort tid få kontroll över underrättelsesläget. Operatören utnyttjar autonoma algoritmer för att optimera samtliga UAVers flygbanor för

att maximera informationsinhämtning och minimera bekämpningsrisken. Dessa algoritmer kan också utnyttjas för att dynamiskt anpassa flygbanorna när förutsättningarna förändras, t.ex. då lv-hot observeras under spaningen.



Figur 4.2 Spaning över insatsområdet inleds – tre UAVer samverkar.

De tre UAV-plattformarna flyger in i området från olika håll, dels för att snabbare och effektivare kunna spana hela det intressanta området och dels för att minska risken för att samtliga plattformar skall upptäckas och bekämpas av fiendens luftvärnssystem (Figur 4.2). ScanEagle-plattformens ringa storlek och ljuddämpade motor torde göra den mycket svår att upptäcka.



Figur 4.3 Sexton robotar anländer till målområdet, och erhåller uppdaterade mållägen från spanande UAV.

UAV-spaningen avslöjar snart att ett stort hot mot insatsstyrkan föreligger i passet. Stridsvagnar, artilleri, luftvärn och ett antal lätta stridsfordon identifieras, och man bedömer att en insats med robotsystemet LOCAAS är nödvändig för att åtminstone hålla tillbaka fienden medan förbandet passerar. Sexton robotar sätts in, som efter c:a fem minuter når fram till ett av underrättelseinformationen definierat målområde. Väl där kan de ligga kvar över området under lång tid och utgöra ett hot mot de enheter som rör sig i området.

Precis som för UAV-systemet kan autonoma funktioner utnyttjas vid uppdragsplaneringen för att optimera insatsen avseende träffutfall och risk. Detta gör det möjligt att på mycket kort tid ge ett samverkande system med många aktörer ett komplext uppdrag, där många faktorer behöver beaktas.

Under tiden som LOCAAS-robotarna anflyger målområdet lyckas fienden upptäcka och bekämpa två av de tre UAVerna. Robotarna anländer i två grupper om åtta robotar, och erhåller senaste mållägen från den kvarvarande UAVn via laserkommunikationslänk. De bekämpade UAVerna hann kommunicera sina mållägen innan de gick förlorade, så systemet har nu en mycket bra bild över fiendens enheter i området. Eftersom flertalet mål är i rörelse behövs emellertid en förnyad målinmätning för att precisionsbekämpning skall kunna genomföras.

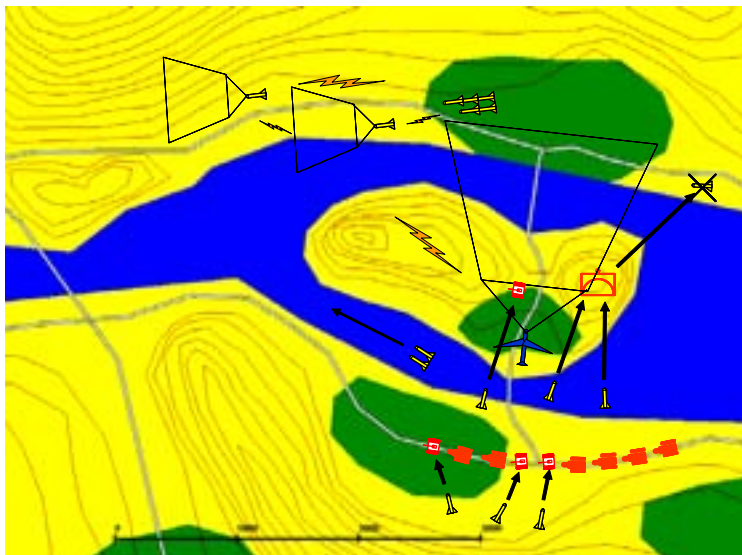
En rollfördelning mellan plattformarna sker nu så att i den norra robotgruppen går två av de åtta robotarna upp på högre höjd och aktiverar sina målsökare (laserradar). Övriga sex robotar följer efter på låg höjd för att minimera upptäckts- och bekämpningsrisk (Figur 4.3). Först när en efterföljande robot erhåller målläge och klartecken för insats aktiverar den sin målsökare och styr mot det utvalda målet.

Den södra robotgruppen samverkar med den kvarvarande UAVn och låter denna svara för målinmätningen. Därmed kan samtliga åtta robotar i denna grupp använda smygtaktik.

Samtliga flygande plattformar i situationen har hela tiden möjlighet till informationsutbyte. Den dynamiska uppdragsplaneringen ser till att inbördes avstånd mellan aktörerna väljs så att det hela tiden är möjligt att reläa information mellan dem, och därmed åstadkomma en gemensam lägesbild för hela systemet.

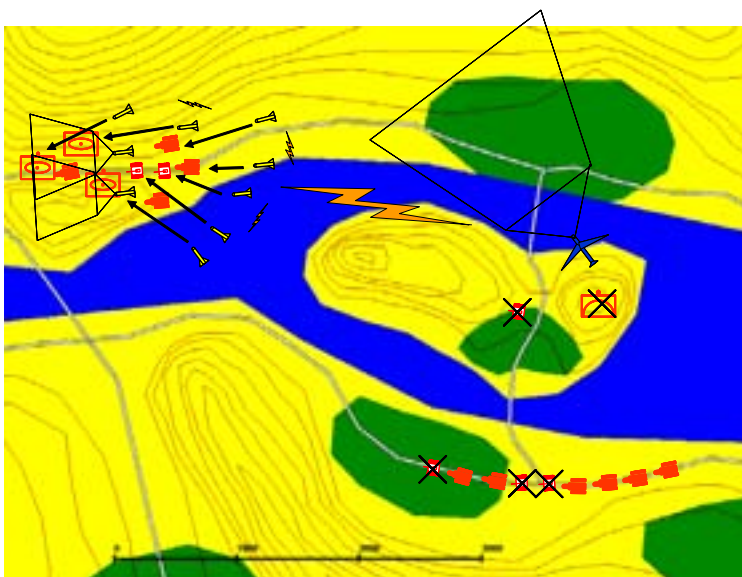
Målval och målfördelning sker autonomt för hela systemet gemensamt. En operatör kan via länk delta i målvalet och, om insatsreglerna så kräver, godkänna mål för insats. I första hand fördelas högprioriterade mål – stridsvagnar, artilleri och luftvärn. De först upptäckta målen fördelas på robotar ur den södra gruppen, eftersom robotarna i den norra gruppen förväntas ligga bäst till för ännu inte upptäckta mål. Uppdatering sker dynamisk när förutsättningarna förändras så att systemet hela tiden uppträder optimalt.

I situationen blir en av de spanande robotarna i norra gruppen bekämpad av fientligt luftvärn. Övriga aktörer i systemet mäter dock samtidigt in fiendens lv-radar och eldenhet, vilket medför att två robotar i den södra gruppen omedelbart tilldelas dessa mål. Bekämpningen av en spanande robot medför också att en av de bakomliggande robotarna övertar spaningsrollen – den ökar farten, går upp på höjd och öppnar sin målsökare (Figur 4.4).



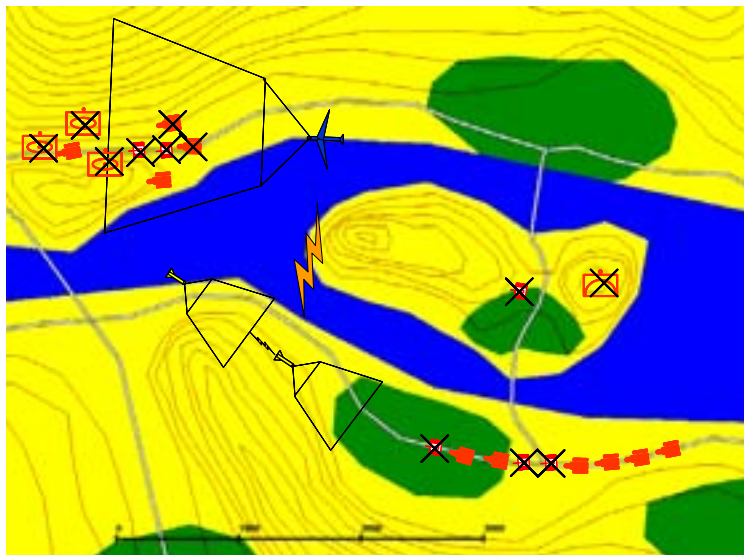
Figur 4.4 Målval och målfördelning sker samordnat för hela robotsystemet.

När högprioriterade mål har fördelats i det första läget återstår två robotar ur södra gruppen. I stället för att engagera lågprioriterade mål väljer dessa att ansluta till den norra gruppen, vars spanande robotar förväntas identifiera fler högprioriterade mål.



Figur 4.5 Robotarna attackerar i första hand högprioriterade mål. När systemet inte längre förväntar sig att finna fler sådana mål attackerar även mål med lägre prioritet.

De spanande LOCAAS-robotarna upptäcker och identifierar så småningom ytterligare fem högprioriterade mål, som omedelbart fördelas på lämpligaste robotar i gruppen. Nu återstår fyra robotar, varav två fördelas på lågprioriterade mål i deras närhet (Figur 4.5).



Figur 4.6 UAVn och de två sista robotarna genomför BDA. Därefter sätts robotarna in mot de mest bekämpningsvärda kvarvarande målen.

De två spanande robotarna vänder dock tillbaka mot den södra målgruppen för att genomföra en träffutvärdering (BDA), och slå mot ev. kvarvarande mål av hög prioritet. Den kvarvarande UAVn utnyttjas för att göra motsvarande BDA över den norra målgruppen (Figur 4.6).

Träffutvärderingen konstaterar att inga högprioriterade mål har överlevt robotattackerna, och därför väljs två av de identifierade målen med låg prioritet ut för bekämpning. Resultatet av anfallet blir att sex stridsvagnar, tre artillerienheter, en lv-enhet och fyra lätta stridsfordon blir utslagna. Resterande fiendliga styrkor drar sig tillbaka, och insatsstyrkan kan passera bergspasset utan strid.

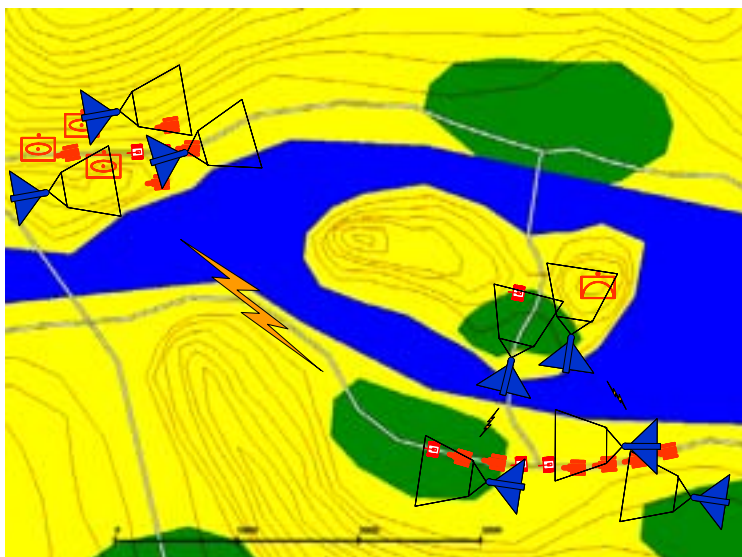
4.4 Killer Bee för spaning och vapeninsats

I denna variant av typsituationen har insatsstyrkan ersatt ScanEagle- och LOCAAS-systemen med ett system av Killer Bee-plattformar, som svarar för såväl spaning som insats. Precis som tidigare utnyttjas två plattformar under förflyttningen när hotet bedöms vara lågt.

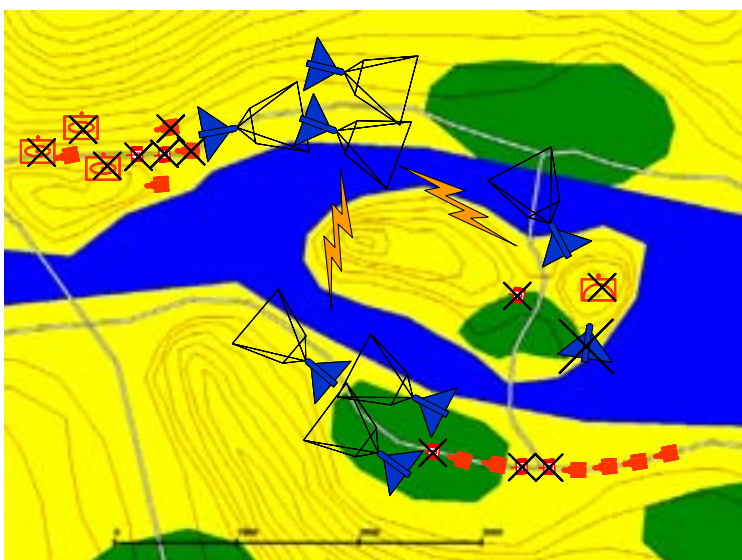
När förbandet närmar sig bergspasset och hotbilden förändras, sätts ytterligare sex plattformar in. De nu totalt åtta plattformarna formerar sig så att de effektivt kan avspana det område där fienden kan uppträda (Figur 4.7).

Insats mot målen sker mot högprioriterade mål så fort de upptäckts. När en plattform förbrukat båda BONUS-stridsdelarna fortsätter den att spana för att understödja övriga plattformar med målinformation.

Luftvärnsförbandet på ön avfyra en robot mot den närmaste Killer Bee-plattformen, varpå denna blir bekämpad. Innan den blir träffad hinner den, i samverkan med bakomliggande plattform, mäta in lv-enheten och avfyra sina två verkansdelar mot denna (Figur 4.8).



Figur 4.7 Åtta Killer Bee utnyttjas för kombinerad spaning och insats. Informationsutbyte sker fortlöpande mellan de enskilda plattformarna.



Figur 4.8 Vapeninsats sker mot högprioriterade mål. Lågprioriterade mål lämnas kvar.

När högprioriterade mål är bekämpade flyger Killer Bee-grupperna över varandras målgrupper för att göra en BDA. Lågprioriterade mål kan i detta läge bekämpas med kvarvarande verkansdelar, men ifall fiendens stridsvärde bedöms vara tillräckligt begränsat kan de sparas till kommande insatser.

4.5 Jämförelse mellan de båda typsituationerna

Det finns flera taktiska fördelar som talar för konceptet med Killer Bee. Eftersom dessa plattformar har en kombinerad spanings- och verkansförmåga kan insats ske omedelbart när ett hot upptäcks. Man slipper den tidsfördröjning som det innebär att sätta in långräckviddig bekämpning först när ett mål har konstaterats, och därmed riskera att målet hinner manövrera i skydd eller vidta andra motåtgärder.

LOCAAS™-systemet kan visserligen avfyras även utan detaljerad målinformation, men ifall målen sedan inte kan lokaliseras, är systemet förbrukat. En Killer Bee-plattform som inte för-

brukat sina verkansdelar kan tas hem, klargöras och sättas in på nytt med samma verkansdelar.

En fråga som inte har belysts är kostnadsaspekten för de två olika systemen. En attackrobot beräknas kosta ca en tredjedel av vad en Killer Bee beräknas att kosta men Killer Bee-plattformarna är, som sagt, återanvändbara. Driftkostnaderna för de olika systemen är alltså beroende på hur ofta man förlorar en plattform på grund av driftsstörning eller fientlig bekämpning.

Det sistnämnda leder oss osökt in på en annan sak som inte heller har belysts, nämligen sårbarhetsaspekten. Då en robot av LOCAASTM-typ är både mindre och snabbare än Killer Bee-plattformen kan det tänkas att den är betydligt svårare att slå ut för ett mindre kvalificerat luftvärn.

Luftvärnets kapacitet i ovanstående scenario kan leda till olika resultat varav bara ett har kunnat visas, ett där luftvärnet har svårt att bekämpa både attackrobotarna och Killer Bee-plattformarna. Båda plattformstyperna kan uppträda tämligen ostraffat i målområdet.

Om motståndaren istället skulle vara utrustad med kvalificerat luftvärn med mycket stor sannolikhet att bekämpa båda typerna av plattformar måste man antingen försöka mätta luftvärnssystemet, och då är man tillbaka till kostnadsaspekten och förmodligen då till attackrobotarnas fördel, eller så måste aktörerna på något annat sätt anpassa sitt uppträdande för att minimera luftvärnets inverkan på slutresultatet. I båda fallen krävs noggrann modellering av både luftvärn och ett intelligent, adapterbart uppträdande hos plattformarna.

För att studera ett resultat där ett luftvärnssystem har en specifik förmåga att bekämpa den ena eller den andra plattformen krävs en så pass god detaljkunskap om både plattform och det bekämpande luftvärnet att man förlorar idén med att studera principer. Allmänna principer för uppträdande drunknar då lätt i systemspecifika egenskaper. Det finns visserligen inga begränsningar som hindrar modellering på en sådan nivå i ISIS, men studier av den typen av duellsituationer ligger utanför detta projekts verksamhetsram.

Vi har i ovanstående typsituationer förutsatt att det bara krävs en stridsdel för att slå ut ett mål. Det innebär att Killer Bee plattformen har möjlighet att slå ut två mål innan den fortsätter i enbart spaningsrollen. Det är dock osäkert om detta antagande överensstämmer med verkligheten. Öppna källor antyder att båda verkansdelarna används för en bekämpning, någonting som inte diskuterats i samband med LOCAASTM-roboten. Detta är dock ingenting som ändrar resultatet i stort bara en indikering på att det kan behövas betydligt fler Killer Bee-plattformar för att uppnå ett önskat resultat än vad vi antagit ovan.

4.6 ScanEagle med slutfasstyrda artillerigranater

En tredje systemvariant kan vara att utnyttja någon form av slutfasstyrda granater för att åstadkomma precisionsbekämpning. Genom att förse granaterna med en kommunikationslänk som medger måluppdatering från spanande ScanEagle under granatens banfas, kan även rörliga mål bekämpas med hög precision.

Nackdelen med detta koncept är att utfallet är starkt beroende på UAV-systemets överlevnad. Om den spanande plattformen bekämpas när granaterna befinner sig i banfasen, kan dessa inte längre erhålla måluppdatering, och risken att de missar ett rörligt mål är stor.

Artillerigranaterna kan naturligtvis också komplettera de två andra systemalternativen. Systemet kan då välja den verkansdel som vid varje tillfälle anses vara optimal. Typiskt torde artillerigranater sättas in när de primära verkansdelarna är förbrukade.

5 TEKNISK SIMULERING AV MÅLVALSALGORITM

I detta kapitel skall vi beskriva och illustrera den målvalsalgoritm som tagits fram inom projektet. Algoritmen skall på ett systematiskt och effektivt sätt fördela attack- och spaningsuppgifter inom en grupp samverkande robotar.

Syftet med robotanfallet är att hitta och slå så många högprioriterade mål som möjligt. Mer precist antar vi att operatören inför uppdraget kan poängsätta olika måltyper. I ett scenario där egen trupp hotas av fientligt pansar skulle en stridsvagn kunna få värdet 100 poäng, medan en underhållslastbil får värdet 20 poäng. Nyttan av ett anfallet där t.ex. 2 stridsvagnar och 1 lastbil slås ut skulle då bli $100+100+20=220$ poäng. Mer allmänt kan vi låta p_j vara målpoängen för måltyp j och n_j vara antalet utslagna mål av typen j . Nyttan blir då

$$\sum_k p_k n_k .$$

Målet är nu att hitta en algoritm som resulterar i stor förväntad nytta. Om vi kan uppskatta den förväntade nyttan är en möjlig metod att försöka maximera nyttan. Att på detta sätt beskriva beslutsproblem i form av ett optimeringsproblem är en ofta använd metod.

Ett robotanfall med samverkande autonoma robotar är emellertid ett förlopp som utspelar sig över tiden där både läget i sig och mängden tillgänglig information hela tiden ändras. Beslut skall således tas på bristfällig information. I vår metod måste vi därför försöka uppskatta den förväntade nyttan av de olika handlingsalternativen och sedan agera för att i varje stund maximera den förväntade nyttan.

Alternativen för en robotindivid är i varje stund att antingen slå mot något av de upptäckta målen, eller att flyga vidare längs det givna sökmönstret för att upptäcka fler mål. Nu skall vi försöka kvantifiera nyttan av dessa två alternativ.

- Nyttan av att robotindividens slår mot ett visst mål

Detta värde påverkas av vad det är för slags mål, och hur troligt det är att målet slås ut. I detalj låter vi

$$c_{ij} = p_j \cdot f(T_o + T_{ij}),$$

där c_{ij} är nyttan av att låta robotindivid i lösa uppgift j , i detta fall slå mot mål j . p_j är som ovan poängen för mål j . T_o är tiden sedan målet senast observerades och T_{ij} är beräknad flygtid från robot i till målet j . f är sannolikheten att anfallet lyckas, d.v.s. en avtagande funktion som fångar hur snabbt målet kan förväntas röra sig bort från platsen. För ett lättroligt lättddolt mål avtar sannolikheten att anfallet lyckas snabbt med tiden från upptäckt till bekämpning. T_{ij} är det som gör att nyttan av att slå är olika för olika robotar. Nyttan är störst för den robot som har närmast till målet. Notera att tiden T_{ij} är flygtid till målet, inte geografiskt avstånd, en robot som precis passerat ett mål är förvisso nära, men har en viss flygtid för att svänga runt och kunna slå. Ett möjligt val är att låta $f(t)=exp(-kt)$, där k är en parameter beroende på hur snabbroblig måltypen är. Mer detaljerade skattningar av sannolikheten baserade på exakt kännedom om terrängen kring målet är förstås också möjliga. För att robotar inte skall tilldelas mål som ligger utanför deras räckvidd sätter vi T_{ij} till oändligheten om aktuell bränslemängd inte räcker ända fram.

- Nyttan av att robotindividen fortsätter spana

Detta värde påverkas av robotens återstående flygtid, hur stor andel av målområdet som fortfarande inte är genomsökt av gruppen, samt hur många mål som redan hittats i förhållande till de som förväntas finnas där, relaterat till möjligheten att bekämpa dem. I detalj låter vi

$$c_{ij} = p_m g(A_s, b_i),$$

där c_{ij} är nyttan av att låta robotindivid i lösa uppgift j , i detta fall spaning. p_m är den ideala målpoängen, den snittpoäng som skulle ges av att alla återstående robotar slår ut lika många av de högst prioriterade målen. A_s är den spaningsarea som återstår att täcka och b_i är den återstående bränslemängden för robot i . g är slutligen en växande funktion som fångar det faktum att ju mindre spaningsyta och bränsle man har kvar, desto mindre troligt är det att man uppnår den ideala målpoängen. Ett möjligt alternativ är att låta

$$g(x) = \arctan(\min(A_s, a(b_i - c))) / 2\pi,$$

där a och c är konstanter som avgör hur fort nyttan avtar med bränslemängden respektive vid vilken nivå alla mål är bättre än att leta vidare.

Då vi vill optimera beteendet för robotarna som grupp, räcker det inte att låta varje robotindivid fatta beslut baserade på vad den själv kan åstadkomma; Vi vill maximera den sammanvägda nyttan av de olika individernas agerande. Mer precist har vi följande optimeringsproblem

$$\begin{aligned} \min \sum_{ij} c_{ij} x_{ij} \\ \text{då } \sum_{ij} x_{ij} \leq 1 \\ \text{och } \sum_j x_{ij} = 1 \\ x_{ij} \in \{0,1\} \end{aligned}$$

där x_{ij} är 1 om uppgift j utförs av robot i och 0 annars. Rad två och tre visar att en uppgift max kan tilldelas en utförare och att en robot bara kan ha en uppgift. Detta problem är ett så kallat assignmentproblem. Det är välkänt att denna problemklass lämpar sig väl att lösas med linjärprogrammering (LP), som också medger att optimeringen kan uppdateras fortlöpande även för större grupper av robotar.

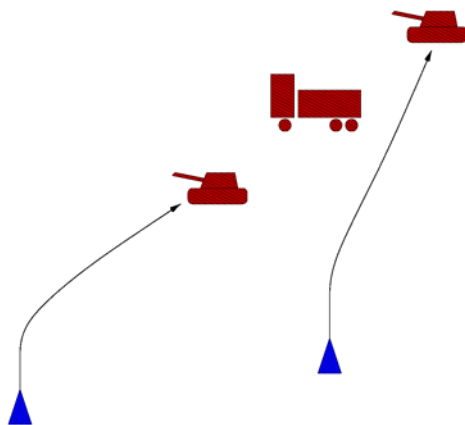
När vi nu formulerat ett optimeringsproblem kan det noteras att beslutsfattande, dvs. lösandet av problemet, för en grupp av individer kan göras på en rad olika sätt:

- Centralt, en av individerna fattar beslut och vidarebefordrar detta till resten av gruppen. Modellmässigt är detta mycket enkelt att implementera, men kräver att det finns ett robust sätt för gruppen att avgöra vilken av individerna som ska fatta beslutet. Dessutom behövs mekanismer för att utse en ny beslutsfattare, då ledarroboten kan förbrukas.

- Distribuerat, gruppen fattar beslut genom att kommunicera med varandra, exempelvis genom röstning eller med transaktioner. Dessa metoder kan dock lätt bli väl komplexa och kommunikationsintensiva.
- Individuellt, varje individ fattar beslut baserade på den information som finns tillgänglig.

Eftersom robotindividerna är identiska kopior av varandra kan vi implementera den sista varianten, och i fallet med ideal kommunikation få samma prestanda som en centraliserad algoritm. Vi låter varje robot planera för hela gruppen och sedan utföra sin del. I idealfallet har alla samma information och kommer till samma resultat. I fallet där olika delgrupper är avskurna från varandra kommer lokalt optimala beslut tas och prestandan bli något lägre.

För att illustrera algoritmen skall vi nu i detalj granska fyra mikrosценарier där två robotar ställs inför ett antal handlingsalternativ. I figuren nedan syns det första scenariot där två robotar har målinformation om tre mål, två stridsvagnar och en lastbil.



Figur 5.1 Två robotar, två stridsvagnar och en lastbil.

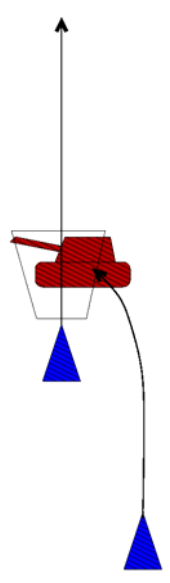
Om vi skriver in de beräknade nyttorna c_{ij} i en tabell får vi följande resultat.

	Stridsvagn 1	Lastbil	Stridsvagn 2	Leta vidare
Robot 1	32*	12	18	0
Robot 2	40	20	30*	0

Optimeringsproblemet ovan blir nu att tilldela varje robot en uppgift. Det gör vi genom att i varje rad sätta en asterisk (*) i den kolumn som motsvarar uppgiften. Varje uppgift får emellertid endast utföras av max en robot, och varje robot skall tilldelas exakt en uppgift. Dessa villkor representeras av rad 2 och 3 i ekvationerna ovan och i tabellen motsvarar det att varje rad skall ha en asterisk och varje kolumn max en, utom kolumnen "Leta vidare", som får ha godtyckligt många. Att leta är en uppgift som kan tilldelas fritt antal robotar.

Vi skall alltså sätta in asterisker så att summan av talen i asteriskrutorna blir så stor som möjligt. Som synes är den optimala fördelningen att robot 1 står mot den första stridsvagnen och robot 2 mot den andra. Trots att det högsta individuella nyttovärdet fås om robot 2 slår stridsvagn 1. Detta alternativ svarar emellertid mot att robot 1 skulle få mycket lång väg till sitt mål.

I det andra scenariot har robotarna inte tillgång till någon yttre information utan tvingas lita till sina egna sensorer. De lägger sig då i en formation där en främre robot målsparar på lite högre höjd och en bakre ligger redo att slå på lägre höjd.



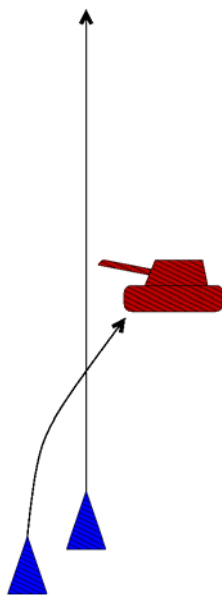
Figur 5.2 Två robotar och ett mål. Fyrhörningen symboliserar sensorräckvidden.

Matrisen i målvalsalgoritmen blir:

	Stridsvagn 1	Leta vidare
Robot 1	35	0*
Robot 2	40*	0

Den lägre nyttan för robot 1 beror på att den måste svänga runt ett helt varv för att kunna slå mot stridsvagnen. Därför kan Robot 2 slå tidigare, och detta alternativ ger mer nytta. En effekt av att robotarna helt saknar förhandsinformation är att gruppens beteende blir mycket aggressivt, och slår mot de mål som hittas. Målvalsalgoritmen prioriterar högt rankade mål med väl kända positioner.

Betrakta nu scenariet i figuren nedan. Robot 1 ligger längre ifrån målet än Robot 2.



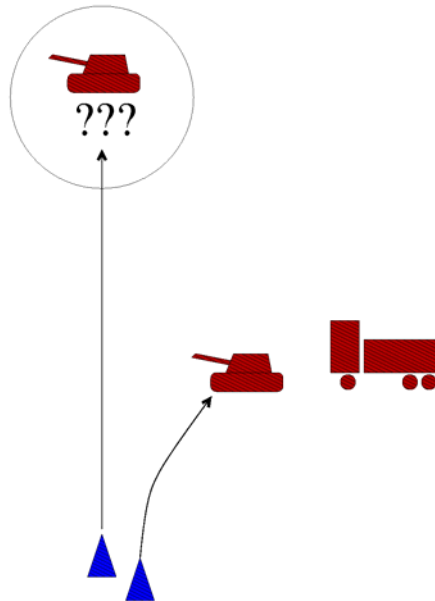
Figur 5.3 Två robotar och en stridsvagn

Emellertid avfyra Robot 1 tidigare än Robot 2 och har därför långt mindre bränsle kvar. Att leta vidare med Robot 1 är därför av begränsad nytta, medan Robot 2 kan söka av ett stort område. Målvärdsmatrisen visas nedan.

	Stridsvagn 1	Leta vidare
Robot 1	35*	5
Robot 2	40	20*

Som synes blir den förväntade nyttan optimal om Robot 1 slår mot målet.

Betrakta nu scenariet i figuren nedan. Två robotar har två mål att välja mellan. I detta fall finns emellertid säkra indikationer på att fler stridsvagnar finns i området längre fram. Nyttan att leta vidare enligt ovan blir därför betydande och överstiger nyttan av att slå ut lastbilen.



Figur 5.4 Två robotar, en stridsvagn och en lastbil. Den inringade stridsvagnen symboliserar möjliga framtida mål.

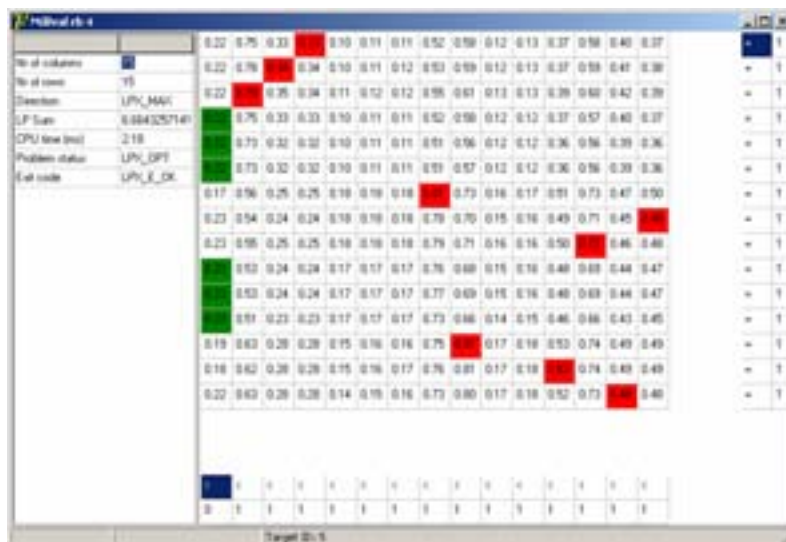
	Stridsvagn	Lastbil	Leta vidare
Robot 1	38	18	25*
Robot 2	40*	20	25

Robot 1 väljer därför bort båda målen och fortsätter att söka av området medan Robot 2 slår mot det prioriterade stridsvagnsmålet.

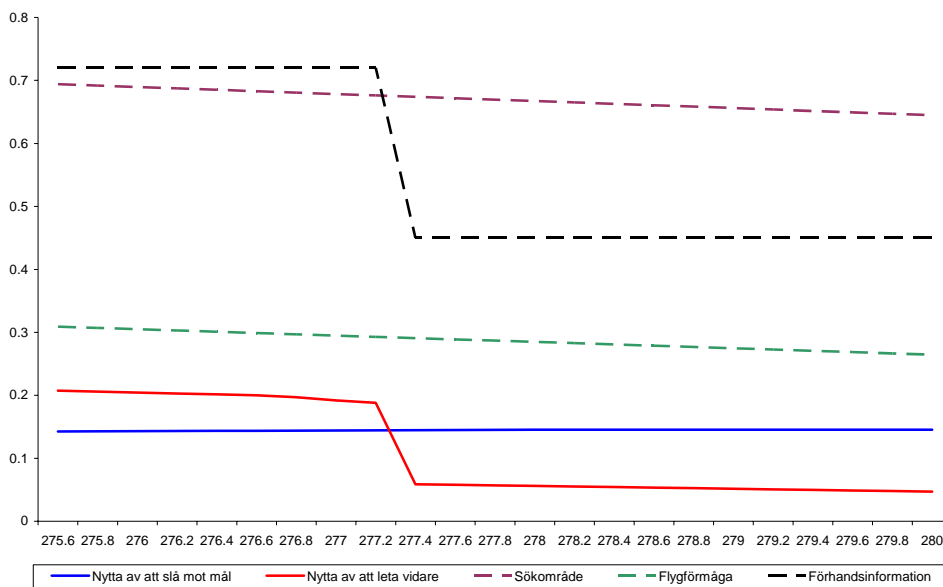
Situationer som dessa uppkommer ofta i de taktiska scenarier som studerats, och behandlas i kapitel 4. Simulering har här inte enbart varit ett stöd för att värdera koncept utifrån taktiska situationer, utan också ett hjälpmedel för att testa robustheten för målvalsalgoritmen i olika situationer. Efter att i detalj studerat dessa mikrosценarier skall vi se hur målvalstabellen ser ut i vårt simuleringsverktyg, då ett större scenario exekveras. I Figur 5.5 syns ett fönster där resultatet av målvalsalgoritmen för robot 4 presenteras.

Utifrån de simuleringsförsök som gjorts kan vi också konstatera att denna metodik för att fördela uppgifter mellan individerna i robotgruppen har några utmärkande egenskaper:

- Metoden är beräkningseffektiv. Den tid som behövs för att lösa ett optimeringsproblem med 15 robotar är i storleksordningen ett par millisekunder.
- Metoden är kontrollerbar. Med ett litet antal variabler går det att justera parametrar för systemet mot att uppnå ett önsvärt utfall. I praktiken går det dock inte att i större scenarier styra gruppen till ett visst utfall.
- Förhandsinformation om viktiga mål kan behandlas pragmatiskt, och då på bekostnad av möjligheten att slå mot andra typer av mål som hittas.
- Metoden är spårbar. Det går att med efterbearbetning av data finna orsaker till robotarnas agerande. I Figur 5.6 visas ett exempel på hur de olika nyttofunktionerna utvecklas över tiden, för ett enskilt målspar.



Figur 5.5 Presentationsgränssnitt för målvalet. Raderna i matrisen representerar robotar (resurser). Den första kolumnen representerar spaningsuppdrag, och de övriga representerar sensorobservationer. Den med färg markerade rutan i varje rad indikerar den uppgift roboten blivit tilldelad, grönt i första kolumnen för att fortsätta spana, och med rött i de övriga för att slå mot det mål som indikeras av sensorobservationen. Den fristående raden och kolumnen med ettor anger bivillkoren för LP-lösningen, att varje robot ska tilldelas precis ett uppdrag, samt att till varje attackuppdrag skall som mest en robot allokeras. Spaningsuppdraget kan tilldelas flera robotar.



Figur 5.6 Efteranalys av ett enskilt målspar. I det här fallet är det nyttan av fortsatt sökning som minskar, och föranleder en attack mot ett mål med låg prioritet. Steget i nyttofunktionen, markerad med röd linje, uppkommer då en annan robot går till attack mot ett av målen som angavs i förhandsinformationen. De streckade linjerna representerar de komponenter som ingår i beräkningen av nyttofunktionen för sökning.

6 SAMMANFATTNING AV PRELIMINÄR ALGORITMLITTERATURSTUDIE

Under hösten 2005 har algoritmforskningen i projektet tillförts mer personal och för att få en ensad, aktuell och bred överblick över forskningsfältet har en litteraturstudie påbörjats.

Vi har valt följande begränsning. Ett antal luftfarkoster bevakar, söker efter och slår mot ett antal markmål. Luftfarkosterna kan vara engångsrobotar eller UAVer med vapenlast. Markmålen kan vara rörliga eller fasta, kända eller till en början okända. Området kan innehålla fientligt luftförsvar och/eller "no-fly zones". Detta område har vi sedan delat upp i delområdena spaning och nedtryckning, måltilldelning och sekvensering samt flygbanan till målet.

6.1 Spaning och nedtryckning

Under rubriken spaning och nedtryckning tittar vi på problemet att avspana en yta för att hitta nya mål och förbättra informationen om redan kända mål. Nedtryckning är en effekt av spaningsnärvaro i ett område där mål gömmer sig. Genom hot om upptäckt och följande bekämpning tvingas målen att avstå från förflyttning och vapenverkan. Bekämpningen av målen kan ske antingen direkt genom UAVns egen vapenlast, eller indirekt genom invisning av styrda bomber eller artillerigranater.

För en ensam UAV är sökproblemet i stor utsträckning ett ruttplaneringsproblem. När två eller flera UAVer skall samverka ökar komplexiteten. Frågeställningar att ta ställning till är bl.a. om beräkningar och beslut skall ske centraliserat eller decentraliserat, om det finns begränsningar i kommunikationen och om UAVerna är likadana eller om de har olika förmågor. När det är flera UAVer som skall spana eller bevaka ett stort område kan det ses som ett sensordistribueringsproblem, där ruttplaneringen är ett delproblem i detta.

6.1.1 Grafsökning

En populär metod för ruttplanering i allmänhet är grafsökning. Denna metod kan användas både för avsökningsproblem och för fall där man skall hitta den bästa vägen från A till B. För att tillämpa grafsökning diskretiserar man omgivningen så att den kan representeras av ett antal noder som förbinds med bågar (eller kanter). Vanligtvis motsvarar en nod en geografisk plats. Till varje båge tilldelas en kostnad. En rutt består av en serie kopplade bågar som då får en total kostnad motsvarande summan av bågarernas kostnader. Planeringsalgoritmen söker efter den rutt som har den lägsta kostnaden och som uppfyller de krav som ställts, som maximal längd. Problemet kan även innehålla krav att vissa noder skall passeras, och det gör problemet svårare att lösa [23]. En grafsökningsalgoritm används för att hitta möjliga vägar i grafen, t.ex. Dijkstras algoritm eller A*- (utläses A-stjärna) algoritmen. Att söka den bästa vägen i en graf kan vara mycket enkelt eller oerhört beräkningstungt, framförallt beroende på de villkor som ställts på lösningen. Förutom beräkningskraven ligger ofta mycket av svårigheten i att bygga grafen och att tilldela kostnader till bågarerna på ett sätt som motsvarar de önskemål som ställs på planeringsalgoritmen. Ett exempel på problem som använder grafsökningsalgoritmer finns beskrivet i Ganguli m.fl. i [24]. Tillämpningen är något udda, men artikeln är välskrivet och läsvärd. I ett arbete av Beard [25] som har anknytning till problemet i denna rapport används Voronoi-grafer, ett ofta använt verktyg för att diskretisera omvärlden. Ytterligare ett sätt att konstruera en graf beskrivs av Sujit m.fl. i [26]. Där diskretiseras omvärlden genom att delas in i regioner i form av 6-hörningar, vars centrum förbinds med de närmaste grannarna, vilket skapar en graf. Grafsökningsalgoritmer används här inte för att söka en bästa väg utan en möjlig väg. Optimaliteten löses med en spelteoretisk ansats, som tillåter både flera UAVer

i samverkan men även att en bra lösning beräknas lokalt när kommunikationen bryts. Ett ytterligare exempel på metoder där grafsökning används presenteras av Ablavsky m.fl. i [27]. Med en kombination av grafsökning, ”simulated annealing” och bestämda sökmönster konstrueras en bana som löser spaning över ett stort område med hänsyn taget till terräng och målens förmåga till förflyttning.

6.1.2 Andra metoder

Sensordistribution. Cortes m.fl. presenterar i [28] en metod att distribuera sensorer i ett område så att varje punkt i området befinner sig så nära en sensor som möjligt. Ingen centraliserad beräkning förutsätts, och asynkron kommunikation mellan sensorerna är möjlig. Flera algoritmer formuleras, som vilar på en god teoretisk grund.

Ett annat sätt att diskretisera uppdraget är att låta UAVn endast ha ett begränsat antal styrsignaler (beslut) i varje tidssteg, och låta en rutt skapas efter hand. Polycarpou m.fl. presenterar en sådan metod i [29]. Där låter man en grupp UAVer flyga runt och samla information. Genom att flyga rakt fram (kan generaliseras) mellan varje beslutstillfälle, och planera en bana som består av segment och mellan varje segment väsentligen en kursförändring, kan en bana planeras några steg framåt i tiden. Det är ganska enkelt att ta hänsyn till olika begränsningar och nyttofunktioner men inga resultat kan ges för optimalitet eller konvergens.

6.2 Måltilldelning och sekvensering

När en grupp UAVer har givits uppdraget att t.ex. bekämpa eller undersöka ett antal mål belägna inom ett givet område, återstår att

- fördela målen på var och en av UAVerna, och
- bestämma i vilken ordning dessa mål ska expedieras.

Vid uppgiftsfördelning enligt den första punkten bör beaktas att de olika målen har olika angelägenhetsgrad, så att vissa måste besökas av flera UAVer, kanske dessutom vid en och samma tidpunkt, medan andra helt kan ignoreras. Vidare kan målens fördelning inom det givna området göra att UAVerna har olika möjligheter att passera samtliga mål från en viss delmängd under en och samma överflygning, beroende på begränsad svängförmåga samt de olika inflygningsriktningarna. I [30] ges exempel på hur de möjliga målen för överflygning av en enskild UAV kan väljas ut.

Beträffande den andra punkten, dvs. avverkningsordningen för en given UAV som tilldelats ett antal mål, kan hänsyn tas dels till den totala längden hos överflygningen (”Traveling Salesman Problem”, TSP), dels risken (t.ex. för nerskjutning), samt också angelägenhetsgraderna hos de olika målen (”Linear Ordering Problem”, LOP). I [23] ges exempel på en metod att kombinera TSP och LOP. En generalisering av TSP kallad ”Multi Depot Vehicle Routing Problem” beskrivs i [31]. Där är det ett antal UAVer som tillsammans skall besöka alla målen. UAVerna utgår från olika baser och kan dessutom ha individuella begränsningar på antalet mål de besöka.

6.3 Flygbanan till målet

Givet en startpunkt och ett specifikt mål skall vi nu betrakta problemet att planera och genomföra flygning från start till mål. Under flygningen vill vi så långt som möjligt undvika hinder och hot, samt i vissa fall anlända till målpunkten vid en viss tidpunkt och från ett visst håll.

Vi börjar med att dela upp problemet i två olika skalor. Dels problem där hinder- och hotområden är väsentligt större än farkostens vändradie, t.ex. kan räckvidden för en luftvärnsrobot

vara mer än 60 km, och dels problem där hindren är av samma storleksordning som vändradien, t.ex. lågflygning över en 100 m bred slingrande flod, eller dyka över trädkropparna ned mot ett mål på andra sidan en åker. Vi diskuterar först problemen var för sig.

När man betraktar de storskaliga problemen är det rationellt att bortse från farkostens dynamik. Exakt svängradie och acceleration spelar ingen roll, utan målet är att hitta en eller flera möjliga flygbanor i form av t.ex. brytpunktsbanor. Det vanligaste angreppssättet för storskaliga problem är att skriva dem som kortastevägenproblem i grafer, se ovan. Ett välskrivet sådant exempel finns i [25] där hotet i form av radarbelysning minimeras. En utvidgning till att även innefatta begränsade flygsträckor, samt en exaktare riskmodellering finns i [9].

Alternativ till grafmetoder har presenterats i form av potentialfältsnavigering, [32], och greedysökning i [33]. Problemet att åstadkomma samtidig ankomst behandlas också i [25]. För de småskaliga problemen måste farkostens dynamik tas i beaktande. Allmänt hamnar man då i optimala styrproblem som är både ickekonvexa och ickelinjära. Detta kan hanteras genom att förenkla dynamiken till linjära system som i [34] och [35], använda en heuristik och hoppas på det bästa, som i [36] eller totalsöka över kort tidshorisont i ett representativt urval, som i [37] och [38].

Det klassiska sättet att koppla ihop de två nivåerna är nu att först beräkna en brytpunktsbana, flyga den med en enkel styrlag och när målet är tillräckligt nära byta över till en detaljerad trajektoria och följa denna med en mer komplex regulator. Detta förfarande förutsätter dock att förändringar i omvärlden kan ignoreras, eller på sin höjd tas om hand i en sensoråterkopplad slutfasstyrning.

Om hinder och hot emellertid ändras är metoden Model Predictive Control (MPC) eller Receding Horizon Control (RHC) mer lämpad. I korthet handlar det om att skapa en plan som är detaljerad i närtid och grövre på lång sikt. I både [38] och [35] handlar det om att kombinera en storskalig grafsökning med en optimering över kort tidshorisont som beaktar farkostdynamiken. Den senare optimeringen räknas vidare om kontinuerligt. Förändringar nära UAVn kan då omedelbart beaktas över den korta tidshorisonten, medan ändringar långt borta kan införas i underlaget och om så krävs initiera en ny storskalig grafsökning. Ett effektivt sätt att beräkna sådana uppdateringar redovisas i [39].

7 SLUTSATSER

Enligt uppdraget från Försvarsmakten har projektet haft som uppgift att 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?

Ett problem vid insats med långräckviddig vapeninsats mot rörliga mål är att de aktuella målen hinner förflytta sig över ett stort område under tiden från insatsbeslut till leverans av verkansdel. Det är därför nödvändigt att insatssystemet har möjlighet att erhålla måluppdatering under hela uppdraget, antingen genom egen målsökning eller genom kommunikation med ledningssystemet.

Ett system av samverkande flygande robotar med en kombinerad spanings- och attackfunktion, vilka försetts med ett målsökarsystem, som med hög automatiseringsgrad kan särskilja olika måltyper och dessutom kan utbyta information med varandra, öppnar nya möjligheter för att underlätta målidentifiering och målval. Systemets förmåga ökar ytterligare genom att det kan kommunicera med ett yttre ledningsnätverk, till exempel ett dubbelriktat samband till en operatör eller måluppdatering från utpekare på marken. Vapenverkan kan ske helt autonomt, då insatsreglerna (Rules of engagement) medger detta. Normalt torde dock vapeninsatsen ske semiautonomt via en nätverksuppkopplad operatör med vetorätt. Den totala informationen från robotarnas målsökare kan också fortlöpande förmedlas till ledningssystemet, som kan utnyttja informationen för träffutvärdering eller som underlag till förnyad vapeninsats.

I de systemexempel som beskrivits i rapporten uppträder både verkanssystem och understödjande UAV-system med en mycket hög grad av autonomitet, även när systemet opererar semiautonomt. Operatörerna behöver i princip enbart ange spanings-/verkansområde samt några ”förhållningsregler”, därefter klarar sig systemen själva.

De autonoma styralgoritmerna måste klara av många olika typer av uppdrag för att systemet skall vara flexibelt. Styrslagarna 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 system behöver inte innebära en ständig nyan-skaffning av plattformar. Det räcker med en uppdatering av systemets mjukvara för att införa nya styrfunktioner. Modulära system, där sensorer, verkansdelar, kommunikationslänkar m.m. enkelt kan bytas ut ökar också flexibiliteten hos systemet, och gör framtida uppgraderingar billigare.

8 FORTSATT ARBETE

Projektet Samverkande Robotar i Nätverk avslutas 2005, men det finns många intressanta systemaspekter kvar att studera. Ett flertal lovande metoder för att implementera autonoma funktioner i samverkande system har presenterats, som är tänkbara för en fördjupad forskningsinsats. Simuleringsverktyget ISIS som har utvecklats under projektets senare del bör även fortsättningsvis kunna utgöra ett viktigt stöd vid såväl taktiska studier som algoritm-forskning.

8.1 Projektet Samverkande Autonoma System med Banplanering

Forskningen på autonoma styrprinciper kommer att få en naturlig fortsättning inom ramen för projektet Samverkande Autonoma System med Banplanering som startar 2006 och beräknas pågå t.o.m. 2007. Projektet kommer att studera koncept där grupper av robotar/farkoster utnyttjas för att gemensamt och (semi-)autonomt genomföra vapeninsatser, vilket förväntas kunna ge förbättringar i såväl robusthet som prestanda och flexibilitet. T.ex. är en grupp svårare att bekämpa samt täcker lättare en stor yta, både med verkansdelar och med sensorer. Dy-rare sensorer kan också placeras på återvändande farkoster som leder in engångsrobotar mot upptäckta mål. Med flera verkansdelar kan man också mätta motmedel genom att slå samtidigt. Effektiv samverkan kräver en styrning/koordinering av både rörelser och sensorutnyttjande i rum och tid. Metoder från såväl formationsflygning som banplanering, styrning, navigering och resursallokering/målfördelning måste integreras till en fungerande helhet.

Samverkande/kommunicerande vapensystem kan också integreras med ledningsnätverket, vilket gör det möjligt att även i ett sent skede påverka systemets uppträdande, t.ex. avbryta vapeninsatsen alternativt målväxla. Sådana system är därför väl lämpade för fredsfrämjande internationella operationer, där det ställs mycket höga krav på målidentifiering, vapenprecision och träffpunktsval för att undvika oönskade skador på civila/ickekombattanter och infrastruktur.

Frågeställningar som projektet skall försöka besvara är:

- Vilka nya systemeffekter uppnås med samverkande autonoma system?
- Hur sker samspelet mellan operatörer och autonoma funktioner i ett system?

Målsättningen är att utveckla teknik och metoder för samordnad (autonom) styrning. Därutöver kommer nya koncept för samverkande autonoma system att presenteras, och simuleringsmodeller för sådana system utvecklas, vilka kan utnyttjas också för andra verksamheter, t.ex. i FLSC.

Projektet är också viktigt för att fortsätta kompetensuppbyggnad inom framför allt området autonom styrning, som kommer till nytta i flertal olika tillämpningar, t.ex. obemannade farkoster.

8.2 Taktisk simulering av typsituationen

En ambition i projektets arbete har varit att utnyttja simuleringsverktyget ISIS för taktiska och stridstekniska simuleringar av typsituationer för att stötta systemstudiens resonemanganalys. Detta har också skett i ett fall rörande beteende vid målval och målfördelning, vilket redovisas i kapitel 5. Resonemanget ovan har emellertid gett upphov till en rad frågor, som med fördel skulle kunna belysas i simuleringar. Några fall kan komma att behandlas i projektet Samverkande Autonoma System med Banplanering, men andra frågeställningar är av mer omfattande

karaktär, varför de bör hanteras i ett större systemstudiesammanhang, eller som egna studieprojekt.

Hotbildsanalys

Det är mycket svårt att analytiskt bedöma hotbilden mot de studerade samverkande systemen. Det går att resonera sig fram till hur sårbar en specifik plattform kan vara i en situation där den har observerats av en fiende, om man känner till vilka motmedel han har till förfogande. Det blir emellertid mycket mer komplext när ett stort antal plattformar är inblandade, som också manövrerar på ett sätt som skall försvåra upptäckt och bekämpning. Hela systemets överlevnad och möjlighet att fullfölja en insats degraderas också successivt med antalet bekämpade plattformar. Resultatet av en samordnad bekämpningsinsats är också ytterst situationsberoende, varför ett mycket stort antal situationer behöver analyseras för att en rättvisande bedömning av systemets förmåga att möta olika hotbilder skall kunna göras.

Analysen behöver alltså stöttas med Monte Carlo-simuleringar, där man har möjlighet att variera förutsättningarna för såväl det samverkande insatssystemet som fiendens uppträdande och sammansättning. Dessa simuleringar kräver dock att nuvarande ISIS-verktyg kompletteras med modeller för hotsystem, samt att fiendens beteende modelleras så att de agerar på ett trovärdigt sätt baserat på deras möjligheter att observera inkommande UAVer eller robotar.

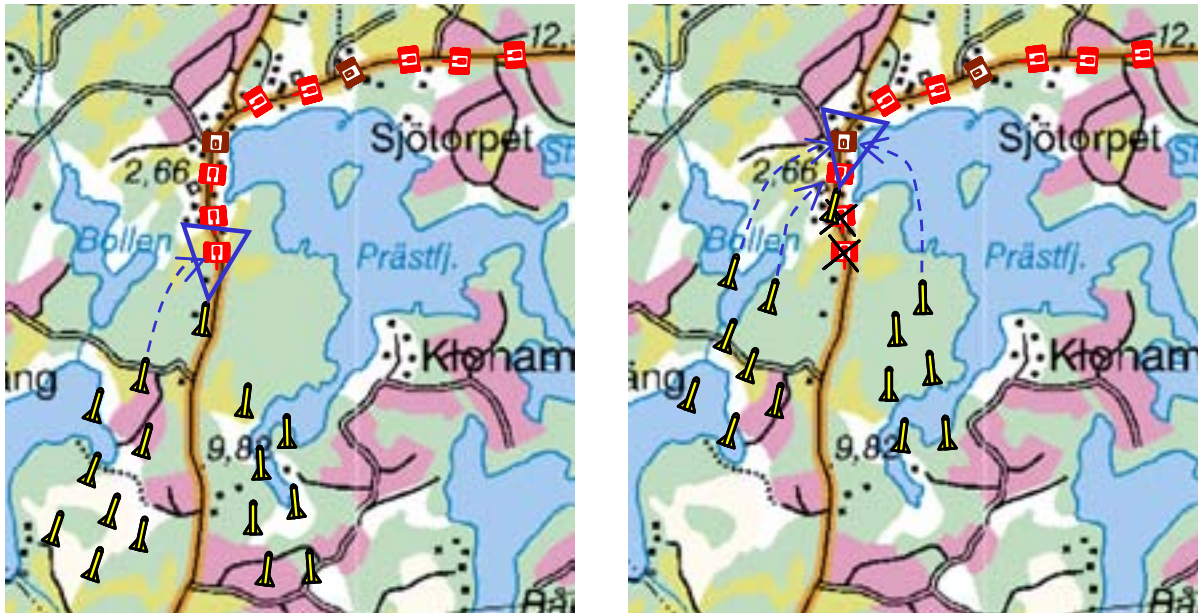
Analys av taktikval

Ett system med många samverkande aktörer kan utnyttjas på flera olika sätt i en typsituation. I många fall är det i princip omöjligt att uttala sig om hur väl olika taktikval kan fungera, eftersom utfallet beror på väldigt många faktorer. Då kan Monte Carlo-simuleringar vara ett viktigt stöd vid analysen.

Ett exempel från typsituationen ovan är när en robotgrupp söker efter mål längs en väg. Taktikvalet är att låta en eller två robotar gå på spaningshöjd, medan övriga robotar går på låg höjd och om möjligt utnyttjar terrängen som skydd. Målläge kommuniceras till bakomvarande robotar, och lämpligaste robot kan, fortfarande dolt, styra mot utvalt mål och behöver först i slutfasen utnyttja egen målsökare (Figur 8.1).

Taktikvalet skall begränsa hotet mot robotsystemet, men samtidigt begränsas robotarnas söksområde. I vilka situationer är detta bäst, och när bör man hellre målspana med fler eller samtliga robotar? Är hotet mot systemet så pass stort att smygtaktik är relevant?

Olika taktikanalyser ställer olika krav på simuleringsmodellerna. I detta exempel är hotmodellerna viktiga, men även sensormodeller och informationsfusionsmodeller är viktiga för att en relevant avvägning mellan risk och sökförmåga skall kunna göras. Det är också viktigt att noggrant utvärdera resultaten från simuleringarna för att identifiera ifall ett visst utfall beror på brister i modellerna.



Figur 8.1 Taktikval vid robotinsats mot fordon längs väg.

Operatörsmedverkan, vad hinner man med?

Ett fullständigt autonomt robotsystem torde, även om det skulle vara tekniskt möjligt, inte vara en realitet ens på 20-30 års sikt. Framtidens konfliktkaraktär kräver en mycket hög tillförlitlighet hos systemen och ingen eller liten tolerans för oönskade sidoeffekter. Det är därför mer relevant att tänka sig semiautonoma system, där en eller flera mänskliga operatörer har det slutliga avgörandet om vilka mål som skall bekämpas. Simuleringar av taktiska situationer kan ge svar på hur operatör och autonomitet kan samverka för att optimera insatsen, och testa gränserna för hur mycket information som människan kan hantera.

ISIS är utvecklat för att också kunna hantera ”man-in-the-loop”-simuleringar. För detta ändamål behöver modeller för operatörsgränssnitt utvecklas, där för simuleringsfallet relevant information presenteras på ett sätt så att operatörens beslutsförmåga sätts på prov.

Alternativt kan modeller för operatörsbeteende utvecklas i form av regelbaser. Detta ställer stora krav på modellering och verktyg, men stöd för regelbaserade modeller finns i ISIS. Fördelen med detta angreppssätt är att Monte Carlo-simuleringar med många parametervariationer kan genomföras.

Scenarier och typsituationer

För att göra simuleringar på taktisk nivå behöver typsituationer med hög relevans tas fram för att kunna behandla rätt problem. Här bör man så långt som möjligt utnyttja det scenarioarbete som bedrivs inom andra försvarsmaktsstudier, dels för att inte göra ett dubbelarbete och dels för att arbeta med typsituationer som matchar Försvarsmaktens målbild. Dock krävs det fortfarande en hel del arbete med att anpassa de enskilda typsituationerna till det problem som man vill simulera, och definiera de parametervariationer som behöver göras.

Enklare typsituationsbeskrivningar utöver de som är direkt förankrade hos Försvarsmakten kan fortfarande användas för att utveckla själva simuleringsmetodiken, och för preliminära slutsatser av systemprestanda.

9 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 Alvå P., Andersson F., Steinvall O., *Ledning och styrning av samverkande robotar - Slutrapport*, FOI-R--0734--SE, december 2002
 - 7 Fokas A., *Optimering av robotinsats med samverkande robotar - En litteraturstudie*, FOA-R--001800-314--SE, december 2000.
 - 8 Winstrand M., Ögren P. *Mission Planning and Control of Multiple UAVs*, FOI-R—1382—SE
 - 9 Ögren P., Winstrand M. *Combining Path Planning and Target Assignment to Minimize Risk in SEAD Missions* AIAA conference on Guidance, Navigation and Control, San Francisco, August, 2005, FOI-S--1943--SE.
 - 10 P. Ögren and E. Berglund, *A SEAD Simulation Model*, In Jon Platts, editor, *Autonomy in UAVs*, GARTEUR, To Appear 2006
 - 11 Ögren P. *Split and join of vehicle formations doing obstacle avoidance*. IEEE International conf. on robotics and automation, New Orleans, April 26 - May 1, 2004 , FOI-S--1405—SE.
 - 12 Lindhé Magnus, Ögren Petter, Johansson Karl Henrik, *Flocking with obstacle avoidance: A new distributed coordination algorithm based on Voronoi partitions*. IEEE International conf. on robotics and automation, ICRA, Barcelona, 2005, FOI-S--1942—SE.
 - 13 D.A. Anisi, *Adaptive Node Distribution for On-line Trajectory Planning*, In Proceedings of the 25th International Congress of the Aeronautical Sciences ICAS, Hamburg, Germany, September 2006.
 - 14 Alvå P. (red.), *Samverkande Robotar i Nätverk - Spekort och typsituationer*, FOI-R--1108--SE, december 2003.
 - 15 Alvå P., Wallström D., Ögren P., *Samverkande Robotar i Nätverk, Årsrapport, Simuleringsmodeller och algoritmer för autonom samverkan*, FOI-R--1452--SE, december 2004
 - 16 <http://www.insitugroup.net>.

-
- 17 Alvå P., Jerberyd M., Wallström D., *Simuleringsverktyg för Samverkande Robotsystem - Värdering av verktygsalternativen FLAMES, TACSI och ROSA*, FOI Memo 837
 - 18 Alvå P., Kallstenius S., Åström U-S., *ROSA – En simuleringsmiljö för samverkande robotar – Användarhandledning och programbeskrivning*, FOA-R--98-00889-314--SE, oktober 1998
 - 19 Alvå P., Åström U-S., *ROSA 2.0 – Vidareutveckling av simuleringsmiljö för samverkande robotar – Användarhandledning och programbeskrivning*, FOA-R--00-01798-314--SE, december 2000
 - 20 Alvå P., Boberg B., Forssell L., Johansson J. O., Pelo J., Wallström D., *Samverkande Robotar i Nätverk, Presentation av simuleringsverktyget ISIS*, FOI-R--1674--SE, juni 2005
 - 21 Alvå P., Hagström M., Lennartsson A., Salling E., Ögren P., *Experimentplattform för autonoma farkoster - Inledande försök*, FOI-R--1825--SE, December 2005
 - 22 Alvå P., Wallström D., *Simulering av nätverksstrid med ISIS*, FOI-R--1827--SE, December 2005
 - 23 Don A. Grundel and David E. Jeffcoat. *Formulation and solution of the target visitation problem*. In AIAA 1st Intelligent Systems Technical Conference 20 - 22 September 2004, Chicago, Illinois.
 - 24 Anurag Ganguli, Jorge Cortes, and Francesco Bullo. *Distributed deployment of asynchronous guards in art galleries*. In IEEE American Control Conference, ACC, 2005.
 - 25 Randal W. Beard, Timothy W. McLain, Michael A. Goodrich, and Erik P. Anderson., *Coordinated target assignment and intercept for unmanned air vehicles*, IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION, VOL. 18, NO. 6, December 2002.
 - 26 P.B. Sujit and Debasish Ghose., *Search by uavs with flight time constraints using game theoretical models*, In AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit 15 - 18 August 2005, San Francisco, California.
 - 27 Vitaly Ablavsky and Daniel Stouch and Magnús Snorrason, *Search Path Optimization for UAVs using Stochastic Sampling with Abstract Pattern Descriptors*, AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, August 2003, Austin, Texas
 - 28 Cortes, J.; Martinez, S.; Karatas, T.; Bullo, F., *Coverage control for mobile sensing networks*, IEEE Transactions on Robotics and Automation, April 2004
 - 29 Marios M. Polycarpou, Yanli Yang, and Kevin M. Passino. *A Cooperative Search Framework for Distributed Agents*. In Proc. of the 2001 IEEE International Symposium on Intelligent Control, pages 1–6. IEEE, 2001.
 - 30 Derek S. Caveney and J. Karl Hedrick. *Path planning for targets in close proximity with a bounded turn-rate aircraft*. In AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, San Francisco, California, 2005.
 - 31 Andrew Lim and Fan Wang. *Multi-depot vehicle routing problem: a onestage approach*. IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATION SCIENCE AND ENGINEERING, VOL. 2, NO. 4, 2005.

-
- 32 Yeonju Eun and Hyochoong Bang. *Cooperative control of multiple ucavs for suppression of enemy air defense*. In AIAA 3rd Unmanned Unlimited Technical Conference, Workshop and Exhibit 20 - 23 September 2004, Chicago, Illinois.
 - 33 Atilla Dogan. *Probabilistic path planning for uavs*. In AIAA Unmanned Unlimited Systems, Technologies, and Operations, San Diego, California, 2003.
 - 34 Yoshiaki Kuwata and Jonathan How. *Three dimensional receding horizon control for uavs*. In AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit 16 - 19 August 2004, Providence, Rhode Island.
 - 35 Bernard Mettler. *Combining on- and offline optimization techniques for efficient autonomous vehicle's trajectory planning*. In AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit 15 - 18 August 2005, San Francisco, California.
 - 36 Ryan L. Pettit and Mark L. Homer. *An autonomous threat evasion response algorithm for unmanned air vehicles during low altitude flight*. In AIAA 1st Intelligent Systems Technical Conference 20 - 22 September 2004, Chicago, Illinois.
 - 37 Eric W. Frew. *Receding horizon control using random search for uav navigation with passive, non-cooperative sensing*. In AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit 15 - 18 August 2005, San Francisco, California.
 - 38 Petter Ögren and Naomi Ehrich Leonard. *A convergent dynamic window approach to obstacle avoidance*. IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS, APRIL 2005.
 - 39 Dave Ferguson and Anthony Stentz. *The delayed d* algorithm for efficient path replanning*. In Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation Barcelona, Spain, April 2005.

1 BILAGA 1 – SYSTEMSPELKORT

För att få inspiration till system lämpliga för samverkan har vi inom projektet gjort en mindre litteraturstudie över ett antal verkliga eller tänkta luftfarkoster. Vi har även modifierat dessa för att passa som aktörer i ett flygande nätverk. I denna bilaga presenteras några koncept som använts under det senaste året.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1	BILAGA 1 – SYSTEMSPELKORT	49
1.1	SPANINGS-UAV OCH ATTACKROBOTAR	50
1.1.1	<i>ScanEagle™</i>	51
1.1.2	<i>LOCAAS™</i>	52
1.2	URCAV – UNMANNED RECONNAISSANCE COMBAT AERIAL VEHICLE.....	54
1.2.1	<i>Killer Bee</i>	54
1.2.2	<i>Long Gun</i>	56

1.1 Spanings-UAV och Attackrobotar

Allmänt

I det ursprungliga scenariot med samverkande robotar har vi tänkt oss ett kombinerat system med spanings-UAVer tillsammans med intelligenta attackrobotar.

- Systemets huvudsyfte är att vara ett framryckande förbands egna spaningssystem.
- Systemet är tänkt att vara så litet och att det kan integreras på ett mindre antal redan existerande fordon i det svenska försvaret.
- Systemet skall uppvisa en mycket hög grad av autonomitet för att minimera antalet operatörer och funktionärer som krävs för att underhålla och driftsätta systemet.
- Systemet skall vara fullkomligt mobilt för att kunna framrycka i omedelbar närhet av ett tåtförband.

Systembeskrivning

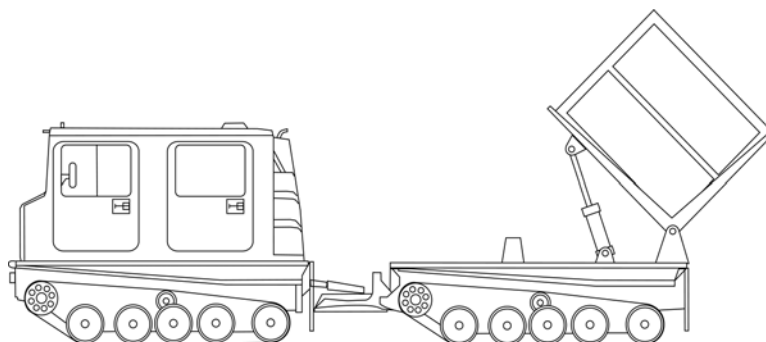
Systemet består av två olika flygfarkoster, en spaningsdel och en verkansdel. Som förlaga till spaningsdelen har vi valt ScanEagle™ och som förlaga till verkansdelen har vi valt LOCAAS™. Dessa båda system beskrivs i detalj nedan.

En stridande enhet består av fyra stycken bandvagn 206, en bandvagn är till för UAVn och de övriga tre till robotarna. Bandvagnarnas främre vagn är identiska och innehåller två multifunktions operatörsplatser. Operatörens funktion avgör vilken och hur information skall presenteras samt vilka funktioner som kan kunna påverkas.

Alla operatörsplatserna är länkade till det globala nätverket och samma funktioner som kan utföras på plats kan även utföras från valfri plats i nätverket.

UAVn luftsätts med en katapult som är monterad på bandvagnens bakre vagn och återfångas med hjälp av en mast som även den är monterad på den bakre vagnen.

UAVerna ligger förpackade i transportlådor och en UAV-bandvagn medför totalt fem stycken.



Figur 1.1 Skiss av en tänkt bandvagn 206 med LOCAAS™ i avfyrningsläge.

En attackrobot ligger transportförpackad tillsammans med en utskjutningsmotor, booster. Boostern består av en fastbränsleraketmotor som fälls efter startförloppet. Roboten avfyras direkt ur transportförpackningen.

Åtta attackrobotar ligger förpackade i en startkasett, två rader med fyra i varje. Denna startkasett monteras med hjälp av snabbfästen på ett eleverbart flak som utgör den bakre vagnen på en bandvagn 206. Vid avfyrning av robotarna eleveras flaket till 45° och robotarna avfyras i fordonets färdriktning. Se Figur 1.1. Minsta separationstid mellan två avfyrningar är 10 s.

1.1.1 ScanEagle™

Allmänt

ScanEagle™¹ är en lätt spanings-UAV avsedd för militär och civil övervakning. Systemet är mycket flexibelt och kan utrustas med ett stort antal spaningssensorer. Farkosten luftsätts med hjälp av en mindre katapult och tas hem med hjälp av ett smått genialiskt system, mer om det senare.

Systembeskrivning

Farkosten består av en cirkulär kropp med bakåtsvepta rektangulära vingar och skjutande propeller. Farkosten har ingen stjärt i egentlig mening utan är utrustad med ”winglets” som även innehåller girstyrorgan. Vingarna är avtagbara och hela farkosten får, demonterad, plats i en låda med måtten 2,1 x 0,6 x 0,4 m och som tillsammans med farkosten väger 37 kg.

Motorn är placerad längst bak i flygkroppen med bränsletank och hjälpsystem monterade direkt framför. Det ger en kompakt och koncentrerad framdrivningsenhet. Framför framdrivningsenheten har man samlat all avionik vilket lämnar nospartiet fritt för implementering av spaningsutrustning.

Nertagning/Landning

UAVn landar inte i vanlig mening, utan använder något som kallas ”SkyHook Retrieval System”. Det innebär att ett rep hängs upp i en mast så att den hänger vertikalt. UAVn flyger mot repet så att den träffar vingens framkant. Repet glider därefter längs framkanten till vingspetsen där en krok griper tag i repet, och UAVn blir hängande.

Data

Längd	1,2 m
Spännvidd:	3,2 m
Kroppsdiameter:	0,2 m
Startvikt:	18 kg
Nyttolast:	6 kg

Framdrivning

Tvåtaktsmotor:	1,1 kW
----------------	--------

Prestanda

Marschfart:	90 km/h (25 m/s)
Maxfart:	130 km/h (36 m/s)

¹ ScanEagle är registrerat varumärke hos Boeing och The Insitu Group.

Flygtid: 15 timmar
Max flyghöjd: 5000 m

Sensor

UAVn är i grundutförande utrustad med följande sensorsystem:

- **EO:** färg CCD med 640x480 pixlars upplösning.
- **IIR:** Okyld bildalstrande med 640x480 pixlars upplösning och uppdateringsfrekvens 60 bilder/s.

Samband

- Långräckviddig kommunikation
 - UAVn utgör en nod i försvarsmaktens globala kommunikationsnät.
- Korträckviddig kommunikation
 - Laserlänk: 5-8 km kommunikationsavstånd med mycket hög bandbredd (> 1 Gb/s).
 - Högfrekvent frekvenshoppande RF av "Bluetooth"-typ.

1.1.2 LOCAAS™

Allmänt

Fysiskt flygande subrobot avsedd för (semi-)autonom bekämpning av i terrängen rörliga eller flyttbara (punkt-)mål om vilka det taktiska ledningssystemets á priori-kunskaper kännetecknas av genomförd målklassificering/-identifiering men osäkerhet föreligger om de av mållägesförändringar som kan inträffa innan en eller flera subrobotar hunnit anlända till målområdet

LOCAAS™ planeras att ingå som en transportförpackad substridsdel i ett flertal olika bärrobotar och/eller andra stridsdelsbärare.

Systembeskrivning

LOCAAS™ (P-LOCAAS=Powered LOCAAS) är en ca 80 cm lång, med utfällbara vingar och styrytor försedd, turbojetmotordriven, GPS-navigerande attackrobot/substridsdel som med hjälp av en 3D-mätande laserradar, från ca 200 m flyghöjd, under 30 minuter kan avspana en yta motsvarande ca 80 km².

När målsökaren upptäckt en måltyp vars spektralsignatur, storlek och form överensstämmer med någon av de måltyper som återfinns i robotens medförda målbibliotek, dyker roboten mot målet och vid målpassage sker bekämpning med hjälp av en 7,7 kg nedåtriktad och avståndsvirkande multifunktionsstridsdel. Utgående från observerad måltyp väljer målsökaralgoritmen anfallsprofil och initieringsstillfälle för den projektilbildande stridsdelen som har tre valbara verkansmoder, "long rod", "aerostable slug" alternativt splitterdusch med ca 30° spridningsvinkel.

Data

Längd: 0,76 m
Spännvidd: 1,01 m (med utfällda vingar)

Startvikt: 43 kg
 Stridsdel: 7,7 kg (Multifunktionsstridsdel)

Framdrivning

Turbojet: 130 N Technical Directions TDI-J45G

Prestanda

Fartområde: 430 km/h (120 m/s)
 Flygtid: 30 min
 Flygsträcka: 180 km
 Flyghöjd (sökfas): 225 m

Navigering/målsökning

Programstyrning med hjälp av ett GPS-stöttat TN-system fram till målupptäckt/-analys med LADAR-målsökaren i kombination med 3D-målbibliotek.

LADAR-målsökare

Stråkbredd: ca 600 m
 3D-upplösning: <1,5 steradianer²
 Avsökning: 4,3 km²/min

Utvecklingsoptioner

LOCAASTM beräknas bli operativt i tidsintervallet 2007-2010.

Planerade utvecklingsoptioner för LOCAASTM bedöms innefatta möjligheter att via en länkförbindelse åstadkomma, dels en autonom samverkan mellan enskilda LOCAASTM-robotar för inbördes målfördelning, dels en möjlighet att från t ex fällande flygplan kunna påverka robotarnas sökmönster alternativt avbryta en autonom robots påbörjade anfall mot ett icke auktoriserat mål.

Vidare pågår en utveckling av målsökaren mot en "dual-mode"-lösning innebärande en kombination av LADAR och MMW. Denna robotversion har givits beteckningen P- LOCAAS-DM.

Anmärkning. Robotsystem med mjukvarualgoritmer för automatiserad målidentifiering ges allt bättre möjligheter att sortera bort falska mål men med avseende på kvarvarande osäkerheter, t ex en motståndares eventuella skenåtgärder eller ROE (Rules of engagement) mm, syns det vara väsentligt att ha en mänsklig operatör som faller det slutliga avgörandet - anfall eller avbryt - i beslutsloopen. Detta medför ett behov av dubbelriktad kommunikation mellan operatör och robotsystemen senast innan anfallsfasen påbörjas och då även ett tillfälligt behov av relativt stor bandbredd för snabb och säker bildöverföring från robot till operatör.

² International Defence Review , june 2001, p 21

1.2 URcAV – Unmanned Reconnaissance combat Aerial Vehicle

Allmänt

Nedan beskrivs två marktaktiska UAV-systemkoncept som i relativ närtid sannolikt skulle kunna ersätta eller komplettera delar av den taktiska understödsenhet som avses svara för ISTAR³-förmåga samt ledning av flygunderstöd i det nordiska bidraget till de europeiska snabbinsatsstyrkorna. Genom att relativt långt ner i organisationshierarkin tillföra en luftburen spaningsförmåga bestående av ett antal samverkande, Mini-UCAV, med lång uthållighet (>12 h), samt kombinera detta med möjligheten att från varje plattform, med kort tidsfördröjning, genomföra vapeninsatser mot tidskritiska mål⁴, frigörs de konventionella flygsystemen från uppgifter för vilka de ursprungligen ej dimensionerats⁵.

Det första systemet, som är baserat på ett koncept från Northrop Grumman kallat Killer Bee, har förmåga att bekämpa ett, eventuellt två mål. Därför har vi även skissat på ett större system som har flermålskapacitet.

1.2.1 Killer Bee

Systembeskrivning

Det flygande segmentet i nedan beskrivna systemkoncept utgår från en kolvmotordriven (mini-)UCAV, av typen "Blended wing-body", med skjutande propeller, vars skalbara förlaga **Killer Bee KB-2** för närvarande utvecklas av USA-teamet Northrop Grumman/Swift Engineering Inc⁶.

För att göra systemet rättvisa borde det egentligen ges benämningen URcAV (Unmanned Reconnaissance and combat Aerial Vehicle), med ett gement "c" i ordet "combat", utgående från att dess huvuduppgift är förlagd till **underrättelsefunktionen**. Uppgiften inom **verkansfunktionen** begränsas av de enskilda farkosternas möjligheter att medföra verkanslast vilken här utgörs av två BONUS-stridsdelar à 6,5 kg avsedda för insats och verkan mot upptäckta mål, t ex pansarskyttefordon alternativt stridsvagn utan tilläggskydd.

Systemets marksegment, som även är dess lokalt markrörliga bas- och ledningsresurs, utgörs av ett band- eller hjulgående fordon vilket försetts med en kassett med plats för fem st. Killer Bee, en startkatapult, samt en speciell anordning för automatiserad återfångst av UAVer. Efter fullgjort uppdrag funktionskontrolleras varje UAV med hjälp av ett BIT (Built-In-Test)-system. Markservice, omfattar normalt endast bränslepåfyllning samt vid behov ersättning av eventuellt förbrukade BONUS-stridsdelar. Därefter återförs UAVn, till en ledig kassettplats.

³ Information, surveillance, Target Acquisition and Reconnaissance.

⁴ "In terms of precision weapons, we are at the limit now of where technology can take us. The past 10 years have been about improving our precision strike capabilities. The next 10 years will be about developing our network-enabled capability. We need to focus on a very complex part of the equation : time.", citatet hämtat från Commander-in-Chief of the Royal Air Force (RAF) Strike Command, Air Marshal Sir Brian Burridge tal inför Royal Netherlands Air Force's Air Power Symposium i Haag den 27 april 2005.

⁵ För att uppnå uthållighet vid insats med korta tidförhållanden kräver flygsystemet normalt lufttankning. Dessutom måste flygplanet ligga i beredskapsläge i luften för att hinna med en insats inom huvuddelen av målens exponeringstid. Detta är dock ett kostsamt sätt att uppnå uthållighet och möjlighet att kunna bekämpa målen inom dess exponeringstid.

⁶ Se "Killer Bees", Aviation week & Space Technology, March 7, 2005, pp 50-51.

Data

Längd:	1,2 m
Spännvidd:	2,0 m
Tomvikt:	20 kg (inkl sensorsystem)
Bränsle:	36 kg
Vapenlast:	14 kg (2 x BONUS á 6,7 kg)
Startvikt:	70 kg
Landningsvikt:	34 kg (inkl 2 % bränsle + 2 stycken BONUS) alt. 21 kg (tomvikt + 2 % bränsle)

Prestanda

Tidsekonomisk fart:	110 km/h
Maxfart:	150 km/h
Landningsfart:	70 km/h (med 2 % bränsle + 2 stycken BONUS)
Flyghöjd:	450 m över underliggande terräng (optimal spaningshöjd)
Patrulleringstid:	> 12 h

Sensorer

UAVn är utrustad med följande sensorer:

- **EO:** färg CCD med 640x480 pixlars upplösning.
- **MMW-radiometer:** Elektroniskt skannande gruppantenn med integrerade antennelement på vingens undersida.
- **IIR:** Okyld bildalstrande IR-målsökare som utnyttjar samma apertur som LADAR.
- **LADAR:** Lasermålsökare av flash-typ med fokalplanearray samt ATR (Automatic Target Recognition).

Sensorpaketet väger ca 4,5 kg och upptar ca 4 dm².

Samband

- Externt samband
 - UAVn utgör en nod i försvarsmaktens globala kommunikationsnät. För mer information om datalänkar med RF⁷.
- Internt samband
 - Laserlänk: 5-8 km kommunikationsavstånd med mycket hög bandbredd (> 1 Gb/s).
 - Högfrekvent frekvenshoppande RF av "Bluetooth"-typ.

Kommunikationsinnehåll: ID och position, klassificerade och/eller identifierade måltyper och målposition, underlag för verkansverifiering, samt lagrade terrängdata i batchsändning.

⁷ K. L. Edwards, "Air-to-ground targeting – UAVs, data links and interoperability (project Extendor), The Aeronautical Journal, Volume 108, Number 1088, October 2004, pp 493-504.

Beväpningsalternativ

Plattformens beväpning består av två stycken BONUS-stridsdelar, som transporteras i invändigt lastutrymme och där fälls med hjälp av en anordning för en nedåtriktad individuell utstötning av dessa.

BONUS-stridsdel

Beskrivning av BONUS-stridsdelens data och prestanda⁸:

Vikt: 6,5 Kg.

Diameter: 138 mm.

Längd: 140 mm (OBS! Bildanalysvärde).

Sensor: En flerfärg, passiv IR-sensor med laserhöjdmätare.

Höjd då målsökning startar: 175 m

Sjunkhastighet: 45 m/s

Rotationshastighet: 15 varv/s

Stridsdel: Avståndsverkande RSV

Genomslag: > 100 mm pansar från långt avstånd

Avsökningsområde: 32 000 m²

Stridsdelen är försedd med autodestruktion.

1.2.2 Long Gun

Allmänt

Nedan beskrivna koncept är ett URcAV-system med beteckningen Long Gun, vars förlaga för närvarande utvecklas av det amerikanska företaget Titan Corporation. Företaget erhöll 2005-06-07 ett \$32.4 miljoners LRIP (Limited Rate Initial Production) -kontrakt från U.S. Navy's Naval Sea Systems Command för framtagning av ca 85 stycken Long Gun-demonstratorer. Programmet har tidigare finansierats via DARPA-projektet "Affordable Weapon System" (AWS).

Long Gun uppvisar likheter med det tidigare beskrivna återanvändbara Killer Bee-systemet dock med skillnaden att dess flygande segment opererar med ca 100 km/t högre fart. Vidare tar Long Gun-systemet mer last vilket innebär att missilen kan medföra en relativt stor stridsdel avsedd för bekämpning av ett enskilt mål, alternativt flera mindre stridsdelar (exempelvis 10 stycken BONUS) avsedda för ett antal olika mål.

Systembeskrivning

Det flygande segmentets framdrivning sker med hjälp av en bakkroppsplacerad infällbar propeller vars drivkälla är en 38 kW luftkyld rotationsmotor⁹, vilken modifierats för att kunna utnyttja bränslen av typ JP-3, JP-8 eller diesel.

⁸ http://www.iggy.co.kr/product_army6.html

⁹ <http://www.howlett-research.com/Research%20Reports/REGI%20Howlett%20Research%20Report%201-8-03.pdf>

Marksegmentet utgörs av en kombinerad transport- och utskjutningsanordning som består av en 20-fots ISO-container¹⁰ vilken modifierats för att innehålla, dels ett antal utskjutningsrör med plats för 20 stycken startklara Long Gun-robotar, dels en hydraulmanövrerad anordning som medger att containern, före avfyring, kan eleveras till 45°. Avfyring från den eleverade missilcontainern kan ske oavsett om den placerats exempelvis i terrängen, på ett fordon, eller ett fartygsdäck.

När Long Gun-robotar, med hjälp av en startraket, lämnar utskjutningsröret vrids, den tidigare parallellt med kroppen förpackade, huvudvingen till flygläge samtidigt som de bakkroppsplacerade styrtorna faller ut.

Data

Längd:	3,7 m
Kroppsdiameter:	0,3 m
Spännvidd:	4,0 m
Startvikt:	325 kg
Nyttolast:	ca 75 kg (inre vapenlast alternativt 90 liter extrabränsle)
Bränsle:	135 kg (motsv. 170 liter)
Framdrivning:	38 kW (28 hp.) luftkyld rotationsmotor för dieselbränsle

Prestanda

Aktionstid:	20 tim. med vapenlast alt. 30 tim. där vapenlast har ersatts med bränsle
Max flyghöjd:	4 500 m
Max-/patrulleringsfart:	220 km/t (60 m/s)

Övrigt

Efter landning, som sker med hjälp av en GPS-styrd glidskärm, inom ett landningsområde på 30 x 30 m i omedelbar närhet av marksegmentets grupperingsplats klargörs Long Gun-roboten och placeras därefter i ett ledigt utskjutningsrör.

¹⁰ ISO-beteckning "Container type 1C"