

KARINA FORS, MARTIN HAGSTRÖM, JOHAN HAMBERG, MORGAN ULVKLO,  
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 1250 anställda varav ungefär 900 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.

Karina Fors, Martin Hagström, Johan Hamberg, Morgan Ulvklo,  
Sven-Lennart Wirkander, Petter Ögren

# Autonoma förmågor för robot- och UAV-system

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                        |                                                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| <b>Utgivare</b><br>FOI – Totalförsvarets forskningsinstitut<br>Systemteknik<br>164 90 STOCKHOLM                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | <b>Rapportnummer, ISRN</b><br>FOI-R--2140--SE                          | <b>Klassificering</b><br>Användarrapport              |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | <b>Forskningsområde</b><br>Bekämpning och skydd                        |                                                       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | <b>Månad år</b><br>December 2006                                       | <b>Projektnummer</b><br>E60713 <i>Revision</i> : 2863 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | <b>Delområde</b><br>VVS med styrda vapen                               |                                                       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | <b>Delområde 2</b>                                                     |                                                       |
| <b>Författare/redaktör</b><br>Karina Fors, Martin Hagström, Johan Hamberg,<br>Morgan Ulvklo, Sven-Lennart Wirkander,<br>Petter Ögren                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | <b>Projektledare</b><br>Petter Ögren                                   |                                                       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | <b>Godkänd av</b><br>Helena Bergman                                    |                                                       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | <b>Uppdragsgivare/kundbeteckning</b><br>FM                             |                                                       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | <b>Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig</b><br>Anders Lennartsson |                                                       |
| <b>Rapportens titel</b><br>Autonoma förmågor för robot- och UAV-system                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                        |                                                       |
| <b>Sammanfattning</b><br>Flera autonomt styrda vapensystem för verkan och spaning mot markmål kommer att vara operativa inom en nära framtid. För den svenska försvarsmakten representerar dessa system både nya hot och nya möjliga förmågor. I denna rapport beskrivs ett antal sådana system, typsituationer/scenarier där de kan användas och algoritmer som realiserar de önskade förmågorna. Avsikten är att inte bara ge en bild av möjligheter, utan också begränsningar hos de algoritmer och funktioner som utgör basen för dessa systems förmågor. |                                                                        |                                                       |
| <b>Nyckelord</b><br>autonomi, samverkan, övervakning, attack, banplanering, uppgiftstilldelning, spaning, hinderundvikande, UAV, robotar                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                        |                                                       |
| <b>Övriga bibliografiska uppgifter</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | <b>Språk</b> Svenska                                                   |                                                       |
| <b>ISSN</b> ISSN-1650-1942                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | <b>Antal sidor:</b> 82 s.                                              |                                                       |
| <b>Distribution enligt missiv</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | <b>Pris:</b> Enligt prislista                                          |                                                       |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                         |                                                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| <b>Issuing organisation</b><br>FOI – Swedish Defence Research Agency<br>Systems Technology<br>SE-164 90 STOCKHOLM                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | <b>Report number, ISRN</b><br>FOI-R--2140--SE                           | <b>Report type</b><br>User report                   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | <b>Research area code</b><br>Strike and Protection                      |                                                     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | <b>Month year</b><br>December 2006                                      | <b>Project no.</b><br>E60713 <i>Revision</i> : 2863 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | <b>Sub area code</b><br>Weapons and Protection                          |                                                     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | <b>Sub area code 2</b>                                                  |                                                     |
| <b>Author/s (editor/s)</b><br>Karina Fors, Martin Hagström, Johan Hamberg,<br>Morgan Ulvklo, Sven-Lennart Wirkander,<br>Petter Ögren                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | <b>Project manager</b><br>Petter Ögren                                  |                                                     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | <b>Approved by</b><br>Helena Bergman                                    |                                                     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | <b>Sponsoring agency</b><br>Armed Forces                                |                                                     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | <b>Scientifically and technically responsible</b><br>Anders Lennartsson |                                                     |
| <b>Report title</b><br>Autonomous Capabilities for Missiles and UAV Systems                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                         |                                                     |
| <b>Abstract</b><br><p>In the near future, a number of airborne autonomous weapon systems will be available. The gap between missiles and UAVs is being bridged by loitering attack missiles with search capabilities and tactical UAVs equipped with Hellfires or guided bombs. These systems present new possibilities as well as new possible threats to the Swedish armed forces.</p> <p>The purpose of this report is to give the reader an overview of what capabilities, from an autonomy point of view, such systems might have. In order to give such an overview, a number of systems and possible scenarios are presented, along with the corresponding autonomous algorithms and resulting capabilities.</p> |                                                                         |                                                     |
| <b>Keywords</b><br>Autonomy, Cooperative, Surveillance, Strike, Path Planning, Task Assignment, Search, Coverage, Obstacle Avoidance, UAV, Missile                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                         |                                                     |
| <b>Further bibliographic information</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | <b>Language</b> Swedish                                                 |                                                     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                         |                                                     |
| <b>ISSN</b> ISSN-1650-1942                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | <b>Pages</b> 82 p.                                                      |                                                     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | <b>Price</b> According to price list                                    |                                                     |

# Innehåll

|                                                                                                                                   |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 Inledning</b>                                                                                                                | <b>1</b>  |
| 1.1 Projektet samverkande autonoma system med banplanering . .                                                                    | 1         |
| 1.2 Denna rapport . . . . .                                                                                                       | 1         |
| <b>2 Uppgifts- och målfördelning för spaning och flygunderstöd med obemannade system</b>                                          | <b>3</b>  |
| 2.1 Förmåga: målfördelning med många mål och flera resurser . . .                                                                 | 3         |
| 2.2 Förmåga: målfördelning för en överflygning av en UAV . . . . .                                                                | 7         |
| <b>3 Hantera hot, bränsle- och tidskrav under flygning till mål</b>                                                               | <b>13</b> |
| 3.1 Förmåga att genomföra planering och omplanering samt att styra reaktivt, under hot, bränsle- och tidskrav på hinderfri höjd . | 13        |
| 3.2 Förmåga: Flygning på låg höjd med terräng och byggnader . .                                                                   | 22        |
| <b>4 Spaning längs vägar, mot punktmål och över yta</b>                                                                           | <b>29</b> |
| 4.1 Förmåga: Snabb spaning längs vägar och över yta . . . . .                                                                     | 29        |
| 4.2 Förmåga: Följa och belysa flyende bil . . . . .                                                                               | 35        |
| 4.3 Förmåga: Detaljerad spaning mot punktmål och över yta . . .                                                                   | 39        |
| <b>5 Slutsatser</b>                                                                                                               | <b>43</b> |
| <b>A Sensordataanalys i autonoma system</b>                                                                                       | <b>45</b> |
| A.1 Detektion . . . . .                                                                                                           | 46        |
| A.2 Igenkänning . . . . .                                                                                                         | 56        |
| <b>B Kommunikationssystem för robot- och UAV-system</b>                                                                           | <b>59</b> |
| B.1 Radiokommunikationslösningar . . . . .                                                                                        | 59        |
| B.2 Laserlänkslösningar . . . . .                                                                                                 | 61        |
| <b>C Spelkort: Autonoma Sensor- och Vapensystem</b>                                                                               | <b>63</b> |
| C.1 Spanings-UAV:er med verkansmöjlighet . . . . .                                                                                | 63        |
| C.2 Attackrobot med spaningskapacitet . . . . .                                                                                   | 67        |
| C.3 Styrda standardvapen som kan målinvisas av UAV . . . . .                                                                      | 68        |
| C.4 Spanings-UAV:er . . . . .                                                                                                     | 71        |
| C.5 Långräckviddiga vapen: UCAV och kryssningrobotar . . . . .                                                                    | 73        |
| <b>Litteraturförteckning</b>                                                                                                      | <b>77</b> |



# 1 Inledning

Denna rapport är slutrapport för det ettåriga projektet *Samverkande autonoma system med banplanering*. Nedan beskriver vi kort projektet som helhet, samt ger en överblick över innehållet i rapporten.

## 1.1 Projektet samverkande autonoma system med banplanering

Flera autonoma styrda vapensystem för verkan och spaning mot markmål är under utveckling idag. Förutom klassiska markmålsrobotar och spanings-UAV:er finns även exempel på robotar med spaningsförmåga och UAV:er med verkanskapacitet, antingen direkt genom medhavd vapenlast, eller indirekt, genom att visa in styrda vapen från andra plattformar. Dessa system representerar både nya hot och nya möjligheter för den svenska försvarsmakten. Syftet med projektet är att ge Försvarsmakten och industrin en bild av vad som, ur autonomisynpunkt, är möjligt att åstadkomma med dessa system.

Under våren 2006 fokuserades arbetet i projektet på att skapa en aktuell överblick över autonomiforskningen inom dessa områden. Denna överblick presenterades i en rapport, se [24]. Samtidigt valdes intressanta typsituationer och system ut i dialog med representanter från FM. Under sommaren och hösten har vi kombinerat ihop typsituationer med algoritmer, samt även vida-reutvecklat och kompletterat algoritmer där så behövs. Resultaten återfinns i denna rapport.

Eftersom innehållet valts för att ge en bred sammanhängande bild av vad som är möjligt presenteras alltså flera resultat som *inte* tagits fram inom ramen för detta projekt. Algoritmerna i avsnitt 2.2, 4.1.2 och 4.1.3 kommer från amerikanska universitet, medan materialet i avsnitt 3.1.2, 3.2.4 och 4.3.2, samt appendix A och B kommer från andra FOI-projekt.

De resultat som *har* tagits fram helt eller delvis inom ramen för projektet återfinns i avsnitt 2.1, 3.1.4, 3.2.5, 4.1.1 och 4.2 samt har publicerats i följande konferensartiklar: *Autonomous UCAV Strike Missions using Behavior Control Lyapunov Functions*<sup>1</sup> [58], *Safe Receding Horizon Control of an Aerial Vehicle*<sup>2</sup> [8], *Adaptive node distribution for on-line trajectory planning*<sup>3</sup> [7], och *Formulation and Solution of the UAV Paparazzi Problem* [61].

## 1.2 Denna rapport

I de följande kapitlen beskrivs ett antal förmågor som skulle kunna realiseras med olika former av autonoma robotar eller UAV-system. Vi har delat upp de autonoma förmågorna i tre huvudgrupper:

---

<sup>1</sup>Denna artikel producerades i samverkan med Luftstridsskolans UCAV-studie.

<sup>2</sup>Denna artikel producerades i samverkan med projektet Robotstyrning.

<sup>3</sup>Denna artikel producerades i samverkan med projektet Robotstyrning.



Figur 1.1: Scan Eagle, ett av de system som beskrivs i appendix C. Med tillstånd av Insitu, Inc. och The Boeing Company

1. Att automatiskt föreslå en uppgiftsfördelning mellan ett stort antal obemannade och bemannade system.
2. Givet en uppgift, ta sig till positionen där uppgiften skall utföras (målet) under det att hotnivån är låg, bränslet inte tar slut och ankomsttiden hålls.
3. Utföra olika former av spanings- eller sökuppgifter.

Dessa tre huvudgrupper återfinns i kapitel 2, 3 och 4, som utgör rapportens huvuddel, vilken avslutas med ett antal slutsatser i kapitel 5. Kapitel 2 till 5 kompletteras sedan med tre appendix. I appendix A beskrivs metoder för automatisk sensordataanalys i autonoma system. Efter det beskrivs möjliga kommunikationslösningar för UAV:er och robotar i appendix B. Slutligen, i appendix C, finns en närmare beskrivning av ett antal autonoma system, blandat i figur 1.1, som är, eller skulle kunna vara, operativa inom en nära framtid.



## 2 Uppgifts- och målfördelning för spaning och flygunderstöd med obemannade system

I detta kapitel beskrivs hur ett beslutsstödsystem för uppgifts- och målfördelning för obemannade och bemannade system skulle kunna se ut. De resurser som fördelas kan tex vara Locaas, avsnitt C.2.1, Netfires, avsnitt C.2.2, Taifun, avsnitt C.2.3, Predator, avsnitt C.1.5, Hunter avsnitt C.1.2, eller KillerBee, avsnitt C.1.1, men även bemannat flyg och artilleri.

Två olika algoritmer beskrivs. Den första algoritmen används för uppgifts- och målfördelning med många uppgifter och resurser över en stor yta. Den andra algoritmen används när *en* UAV skall välja mål för *en* överflygning på låg höjd över ett målrikt område.

### 2.1 Förmåga: målfördelning med många mål och flera resurser

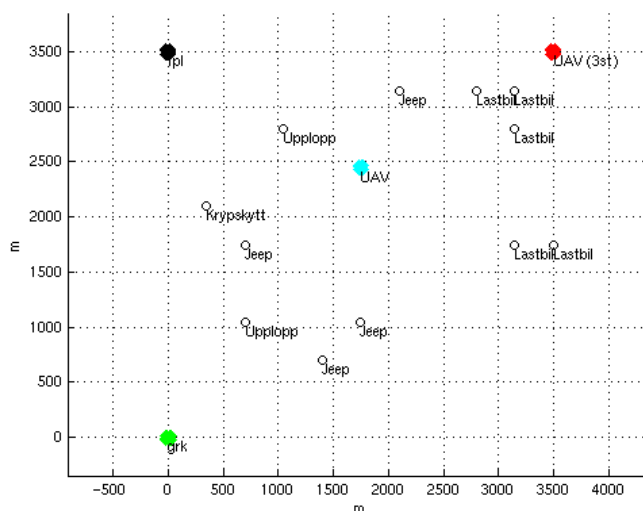
#### 2.1.1 Framtida scenario

*Strider utkämpas på flera håll i en afrikansk stad. Den nordiska styrkan är hårt ansatt av en överraskande välövd och välbeväpnad fiende. Flygunderstöd (Close air support) fås från ett par flygplan baserade på ett internationellt flygfält drygt tusen kilometer bort. Det kompletteras dock av ett antal UAV:er med spanings- och verkansfunktion, samt ett stridsfordon 90 med granatkastare (Grkpbv 90120). Ett antal av de svenska soldaterna har utrustning för Forward Air Control (FAC) eller artillerispaningsgrupper. Med dessa har de möjlighet att begära eldunderstöd av UAV:erna och Grkpbv90120. Soldaten anger då position, starttidpunkt och tidslängd för det önskade stödet tillsammans med prioritet, samt hur tidskritisk uppgiften är, dvs om uppgiften kan vänta, eller om möjligheten snart är förbi. Ett autonomt beslutsstödsystem för uppdragstilldelning förväntas nu ge förslag om vilka enheter som skall utföra de olika uppgifterna och i vilken ordning detta skall ske, samt om fler flygburna enheter skall starta ur de containrar som finns utplacerade. Uppgiftstilldelningen uppdateras sedan allt eftersom nya begäran om stöd inkommer. Tilldelningen strävar hela tiden efter att maximera effekten av den totala insatsen, utgående från resursläget och informationen i de olika begäran.*

#### 2.1.2 Algoritm

I scenarioexemplet ovan förutsätts att de av de egna soldaterna som tjänstgör som Forward Air Controllers har ögonblicklig kommunikation med en ledningscentral som kan beräkna och momentant beordra en fördelning av uppdragen på de olika enheterna, dvs UAV:erna, granatkastaren samt flygplanen. Den algoritm som används tar hänsyn till några individuella egenskaper som varje mål är behäftat med, nämligen följande:

- Målets "värde", vilket i allmänhet är knutet till dess typ. Exempelvis anses en terrängjeep med granatkastare ha ett högre värde än en lastbil.



Figur 2.1: Startkonfiguration. Beslutsstödet skall nu fördela resurser till respektive uppdrag.

- Åldern hos informationen om målets position. Ju längre tid som förflutit sedan målet iaktogs, desto osäkrare är denna informations tillförlitlighet och därmed det förväntade utbytet vid ett eventuellt uppdrag mot denna position.
- Målets lätttrörlighet. Denna påverkar informationstillförlitligheten och får därmed liknande konsekvenser som ovan för förväntade utbytet av ett uppdrag.
- Målets position.

Ett exempel på en utgångssituation visas i figur 2.1. Miljön antas vara en stadsdel med utsträckning ca 3,5 km åt vardera hållet. I nedre vänstra hörnet befinner sig ett stridsfordon 90 med granatkastare, i diagonalt motsatta hörnet är ett förband med Killer Bee UAV:er grupperat (se avsnitt C.1.1). I det övre vänstra hörnet finns i det givna ögonblicket ett flygplan (fpl). Någonstans i mitten finns även ytterligare en UAV av samma typ som de ovannämnda.

De mål som skall bekämpas eller övervakas är av fyra *måltyper*: 4 jeepar, 5 lastbilar, 1 krypskytt på tak (Krypsk) samt 2 s k "upplopp", dvs folksamlingar, vilka givetvis inte får beskjas, men skall övervakas av UAV:er under viss tid. De olika måltyperna är associerade med olika mått av värdefullhet samt rörlighet (se nedan). Till exempel bör ett mål med hög rörlighet, dvs stor benägenhet att byta position eller gömma sig, bekämpas snabbt, i synnerhet om det dessutom har ett högt värde. Omvänt gäller för ett mål med låg rörlighet, att tidsaspekten inte är lika betydelsefull, dvs det kan gärna vänta till förmån för mera lättflyktiga mål.

En lösning på detta uppdragsförelningsproblem skulle kunna se ut som i figur 2.3 eller 2.2. I den senare figuren ser vi att det enda flygplanet har tilldelats samtliga 4 jeepar. Detta har en intuitiv förklaring i att dessa mål är högst prioriterade (har högst "värde"), samtidigt som flygplanet har den högsta hastigheten bland de olika resurserna.

| Måltyp                 | Antal | Målnr | Värde( $P_j$ ) | Tidsfaktor( $k_j$ ) |
|------------------------|-------|-------|----------------|---------------------|
| Jeep med granatkastare | 4     | 1-4   | 9              | 1,33                |
| Upplopp                | 2     | 5-6   | 6              | 0,33                |
| Krypskytt på tak       | 1     | 7     | 3              | 20,67               |
| Lastbil                | 5     | 8-12  | 1              | 1,00                |

Tabell 2.1: Måldata

| Resurstyp       | Antal | Horisontalhastighet( $v_i$ (m/s)) |
|-----------------|-------|-----------------------------------|
| UAV             | 4     | 30                                |
| granat från grk | 4     | 100                               |
| fpl             | 1     | 200                               |

Tabell 2.2: Resursdata. Observera att granatens horisontella hastighetskomponent (till skillnad från den absoluta) är lägre än flygplanets.

### Matematisk problemformulering

För att fånga de olika aspekterna av ovanstående resonemang formulerar vi nu matematiskt, i termer av symboler för bla målvärde och -rörlighet, den funktion som skall maximeras av uppdragsfördelningsalgoritmen.

Varje resurs (dvs UAV, fpl etc) identifieras med ett index  $i$ , och varje mål (dvs jeep, folkmassa etc) med index  $j$ . Då definieras det *förväntade värdet* av att resurs  $i$  bekämpar mål  $j$  som

$$c_{ij}(\pi) \triangleq P_j e^{-k_j \frac{d_{ij}(\pi)}{v_i}}. \quad (2.1)$$

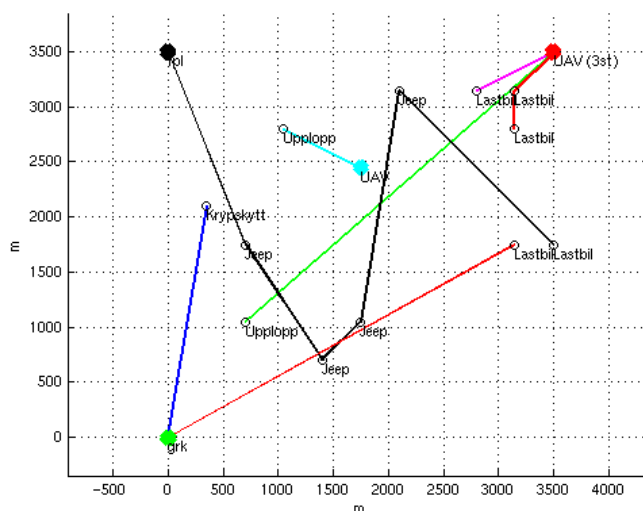
Här betecknar  $P_j$  *värdet* för mål  $j$ .  $d_{ij}(\pi)$  är det *avstånd* som resurs  $i$  har tillryggagått för att komma fram till mål  $j$  under förutsättning att den har följt den väg som anges av *variabeln*  $\pi$ , vilket är den storhet som skall väljas optimalt.  $v_i$  är *hastigheten* hos resurs  $i$ , varför kvoten  $d_{ij}(\pi)/v_i$  är den tid det tar för denna resurs att komma fram till målet  $j$  om vägen (dvs målordningsföljden) ges av  $\pi$ . *Tidsfaktorn*  $k_j$  är till för att modellera målet  $j$ 's rörlighet, dvs tendens att vara försvunnet när farkosten kommer fram; ju större  $k_j$ , desto mer reduceras  $c_{ij}(\pi)$ , givet en viss gångtid  $d_{ij}(\pi)/v_i$ .

Nedan används de värden på de ovan definierade variablerna som anges i tabellerna 2.1 och 2.2.

### Algoritmbeskrivning

Uppdragsfördelningsalgoritmens uppgift är alltså att associera varje mål till en av resurserna på ett sådant sätt att summan av alla  $c_{ij}$ -termerna enligt ekvation (2.1) blir så stor som möjligt. Det är välkänt att denna typ av problem är mycket svåra att lösa exakt, särskilt i realtid och med begränsad datorkapacitet. Därför måste approximativa eller "suboptimala" metoder tillgripas. Nedan skall vi beskriva en sådan approximativ algoritm för att hitta målfördelningar. Metoden består av två steg, där det första stegets resultat används som startlösning för det andra. I det följande beskrivs de två stegen var för sig.

**Steg 1: Marginal Sequence Build** I denna metod går alla mål igenom i den ordning de rapporterats in. Varje mål ( $i$ ) associeras med en resurs ( $j$ ) och placeras in i dennas anfallssekvens så att den förväntade värdeökningen blir



Figur 2.2: Resultatet av steg 1. Summa förväntat värde: 8.4. Beräkningstid: 0,07 s.

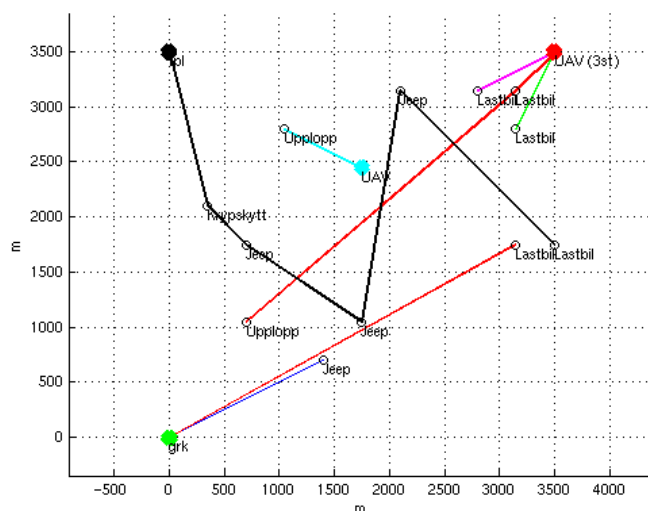
så stor som möjligt. Detta algoritmsteg kallas *Marginal Sequence Build* och i figur 2.2 visas resultatet av ett sådant steg. Notera det resulterande förväntade värdet som anges under bilden, tillsammans med ett mått på tiden som krävdes för denna beräkning.

**Steg 2: Tabu Search** Denna metod utgår från det resultat som erhöles ur det förgående steget. Förenklat uttryckt innebär metoden att man utgående från en given tilldelning (dvs associering mål-resurs) gör alla möjliga parvisa omkastningar mellan både mål och resurser, för att se om någon sådan omkastning ger ett bättre totalvärde. Om så är fallet, väljs denna nya lösning som den hittills bästa och tas till utgångspunkt för ytterligare en omgång parvisa omkastningar. Om icke, tas den bästa omkastningen till utgångspunkt för nästa omgång parvisa omkastningar. Detta utförs ett förutbestämt antal gånger. Metoden kallas *Tabu Search*. I figur 2.3 ses också att resultatet av Tabusteget är något annorlunda och bättre än från det första steget. Vi ser också att detta andra steg är betydligt mer beräkningskrävande än det första.

### 2.1.3 Begränsningar och alternativa algoritmer

Man kan läsa mer om den beskrivna algoritmen i [61]. Anledningen till att en suboptimal optimeringsalgoritm tagits fram är dels, som ovan antytts, att det matematiskt formulerade optimeringsproblemet enligt ekvation 2.1 är mycket beräkningskrävande, och således oralistiskt för en exakt implementation i realtid, dels att vi i praktiska fall mycket väl kan nöja oss med en resursfördelning som inte är helt optimal, bla beroende på att de i optimeringskriteriet i ekvation 2.1 ingående parametrarna inte är resultatet av exakt vetenskap, utan snarare baserade på intuition.

En implementering av den här presenterade algoritmen låter sig göra tämligen omgående.



Figur 2.3: Resultatet av Steg 1 och 2. Summa förväntat värde: 9.8. Beräkningstid: 1,5 s.

## 2.2 Förmåga: målfördelning för en överflygning av en UAV

I det scenario som beskrevs i 2.1.1 lades inga restriktioner på hur de olika resursernas banor fick se ut. De optimala trajektorierna för flygplanet och UAV:erna blev styckevis räta linjer med tvåra vinklar vid de olika målen. Sådana banor är egentligen inte realiserbara, eftersom farkosterna har nedåt begränsade svängradier. Om det område över vilket målen är utspridda är tillräckligt stort, blir emellertid dessa styckevis rätlinjiga banor tillräckligt goda approximationer till ett mer realistiskt fall.

Om däremot målområdet är så litet, och svängförmågan hos var och en av de använda farkosterna så begränsad, att stora delar av dess bana måste vara krökta för att den ska kunna passera flera mål, är det nödvändigt med en beslutsstödsfunktion som tar hänsyn till detta. Ett antal mål, eventuellt av samma typer som i föregående scenario, antas därför utspridda över ett område som är betydligt mindre än i avsnitt 2.1.2. Vidare är vi p.g.a. hotsituationen begränsade till att göra endast en överflygning. Problemet för en UAV eller ett flygplan består därför i att i en enda överflygning avverka så många mål som möjligt med hänsyn till den begränsade svängförmågan.

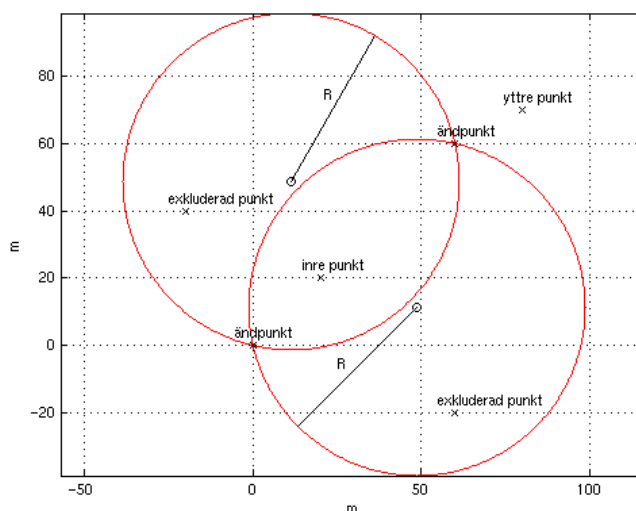
### 2.2.1 Algoritm

Innan algoritmen kan beskrivas, bör några förutsättningar och definitioner fastställas.

#### Definitioner.

Vi behandlar fallet med en UAV (eller ett flygplan), vars svängradie är minst  $R$ . I det intressanta stridsområdet förutsätts ett antal mål vara utplacerade i givna punkter, vilkas positioner är kända vid beräkningstillfället.

Med hjälp av figur 2.4 gör vi nu några definitioner. Först utväljs ett par av punkter, vilka kallas *ändpunkter*. Dessa definierar två cirklar med radie  $R$ , som alltså är UAV:ns minimala svängradie. Följande 3 typer av punkter defi-



Figur 2.4: Illustration till definitioner av punkter.

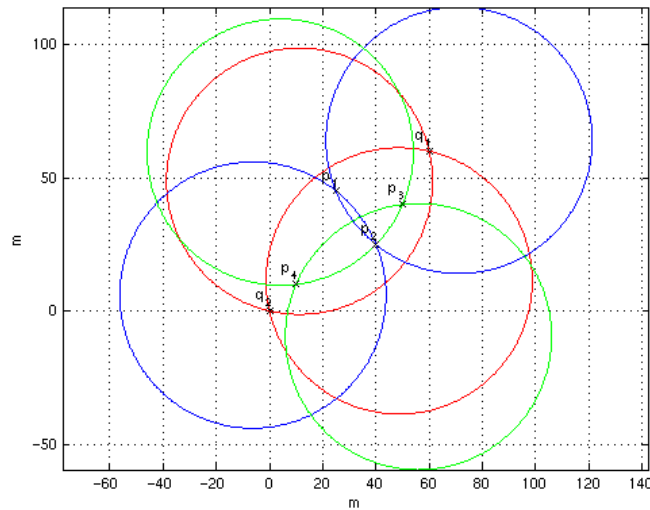
nieras nu med avseende på de två ändpunkterna, beroende på sina placeringar i förhållande till de två cirkelarna:

- *inre punkt*: punkt innanför båda cirkelarna.
- *exkluderad punkt*: punkt innanför den ena, men inte den andra, cirkeln.
- *yttre punkt*: punkt utanför båda cirkelarna.

#### Algoritmbeskrivning.

Genom de två ändpunkterna i figur 2.4 finns det naturligtvis många banor som inte överskrider manövreringsförmågan (s.k. "godkända" banor), t.ex. den rätta linjen genom de två punkterna. Det är också uppenbart, att det finns en godkänd bana som går genom de två ändpunkterna och som också går genom vilken som helst inre punkt med avseende på dessa ändpunkter (t.ex. banan som följer den cirkelbåge som bestäms av de 3 punkterna). Likaledes inses att det går att färdas genom de båda ändpunkterna och en yttre punkt utan att överskrida begränsningen i svängprestanda. Däremot kan man uppenbarligen inte konstruera en godkänd bana genom ändpunkterna och en exkluderad punkt.

Tillämpning av ovanstående iakttagelser på två utvalda inre punkter (med avseende på de ursprungligen givna ändpunkterna) visar att ett *nödvändigt* villkor för existensen av en godkänd bana genom alla 4 punkterna (dvs ändpunkterna och de två inre punkterna) är att båda ändpunkterna är yttre punkter med avseende på de valda inre punkterna. I figur 2.5 visas exempel på två givna ändpunkter  $q_1$  och  $q_2$  med tillhörande cirklar (röda). Om vi nu betraktar de med avseende på dessa inre punkterna  $p_1$  och  $p_2$ , så ser vi t.ex. att  $q_1$  är en exkluderad punkt med avseende på  $p_1$  och  $p_2$ . Därför finns, enligt föregående resonemang, ingen godkänd bana genom  $q_1$ ,  $p_1$  och  $p_2$ . Motsvarande gäller för  $q_2$  med avseende på  $p_1$  och  $p_2$ . Slutsatsen blir att ingen godkänd bana kan gå genom  $q_1$ ,  $p_1$ ,  $p_2$  och  $q_2$ . För de inre punkterna  $p_3$  och  $p_4$  gäller däremot att både  $q_1$  och  $q_2$  är yttre punkter. Det finns därför inget uppenbart hinder för en godkänd bana att kunna gå genom alla dessa 4 punkter. Kom emellertid ihåg



Figur 2.5: Illustration till algoritmbeskrivning.

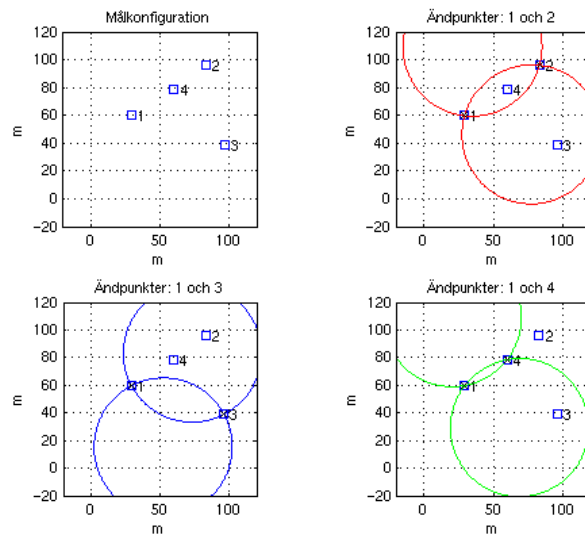
att villkoret ovan bara är nödvändigt. Punkterna  $p_3$  och  $p_4$  kallas ett *godkänt par* med avseende på punkterna  $q_1$  och  $q_2$ . Förenklat uttryckt, går algoritmen igenom alla punktpar, och för varje sådant par noteras de mot detta svarande godkända punktparen. Det punktpar som på detta sätt får högst antal godkända punktpar undersöks närmare, och man avgör vilken av de godkända banorna genom punkterna innanför båda cirkelarna som är längst, dvs innehåller flest punkter. Denna bana väljs ut, de ingående punkterna elimineras från den totala punktmängden, och proceduren startar om igen med de kvarvarande punkterna.

För att klargöra principen, kan vi betrakta det exempel med 4 målpunkter, som visas i figurerna 2.6 och 2.7. Målen, markerade från 1 till 4 visas med underrubriken "Målkonfiguration" i det övre vänstra hörnet i figur 2.6. I de övriga diagrammen i de två figurerna visas de 6 cirkelpar som är möjliga genom olika val av ändpunktspar. Med ändpunkterna 1 och 2 är  $p_4$  en inre punkt, vilket betyder att det finns en godkänd bana  $1 \rightarrow 4 \rightarrow 2$ . Däremot är det omöjligt att punkt 3 kan förekomma på samma bana som 1 och 2, eftersom den är en exkluderad punkt med avseende på dessa ändpunkter.

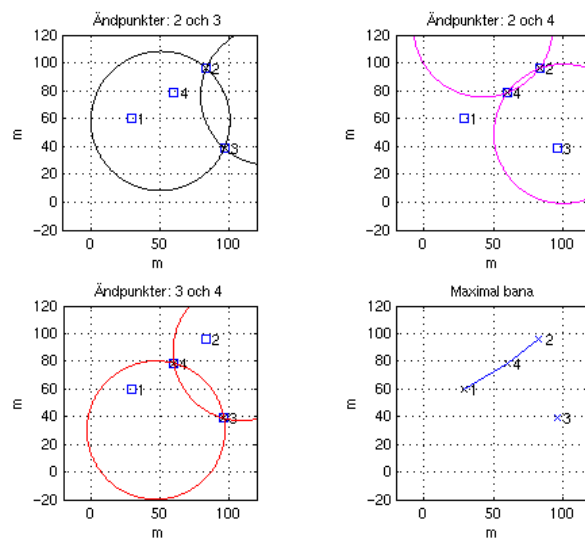
För ändpunkterna 1 och 3, liksom för 2 och 3, är situationen ännu värre; eftersom i dessa fall båda de övriga punkterna är exkluderade punkter, kan ingen av dem förekomma på samma bana som ändpunkterna. Med ändpunkterna 1 och 4 är punkt 3 exkluderad, av samma orsak som då ändpunkterna var 1 och 2 (se ovan). Den återstående, punkt 2, är här en yttre punkt, och kan därför dela bana med 1 och 4.

Med ändpunkter 2 och 3, liksom med 3 och 4, är situationerna likartade den för 1 och 3: ingen annan punkt kan dela bana med ändpunkterna i dessa fall.

Slutsatsen blir, att ingen bana existerar, som passerar alla 4 målen, eftersom varje ändpunktspar har minst en exkluderad punkt. Det finns en "maximal" bana (dvs en bana som passerar maximalt antal mål), nämligen  $1 \rightarrow 4 \rightarrow 2$  (eller  $2 \rightarrow 4 \rightarrow 1$ ). Den finns utritad nere till höger i figur 2.7.



Figur 2.6: Exempel målfördelning för en överflygning.



Figur 2.7: Exempel målfördelning för en överflygning (forts.).



### 2.2.2 Begränsningar och alternativa algoritmer

Värdet hos den här beskrivna metoden för banberäkning ligger främst i att den kan *utesluta* en mängd banor på grund av deras alltför stora krav på farkostens svängförmåga. De återstående möjliga flygbanorna måste undersökas vidare på andra sätt, tex det som finns beskrivet i [16], som också behandlar den ovan beskrivna cirkelmetoden. Ytterligare en målvalsalgoritm som rör farkoster med begränsad svängförmåga presenteras i [41]. Här är uppgiften att passera *samtliga* mål inom ett givet område.



## 3 Hantera hot, bränsle- och tidskrav under flygning till mål

I det här kapitlet skall vi studera olika metoder för att planera och genomföra flygning till mål, under tidskrav och begränsningar på både bränsle och den risk som UAV:n utsätts för. Först skall vi beskriva algoritmer för att åstadkomma detta under flygning på hinderfri höjd. Sedan skall vi se hur man kan åstadkomma extrem låghöjdsflygning och hur det hänger samman med algoritmerna i den första delen.

### 3.1 Förmåga att genomföra planering och omplanering samt att styra reaktivt, under hot, bränsle- och tidskrav på hinderfri höjd

Dessa algoritmer är av stor vikt för tex UCAV-system, se avsnitt C.5.1, och markmålsrobotar, se avsnitt C.5.3 och C.5.2, men även andra system såsom Killer Bee, avsnitt C.1.1, Predator, avsnitt C.1.5 och Hunter, avsnitt C.1.2.

#### 3.1.1 Framtida scenario

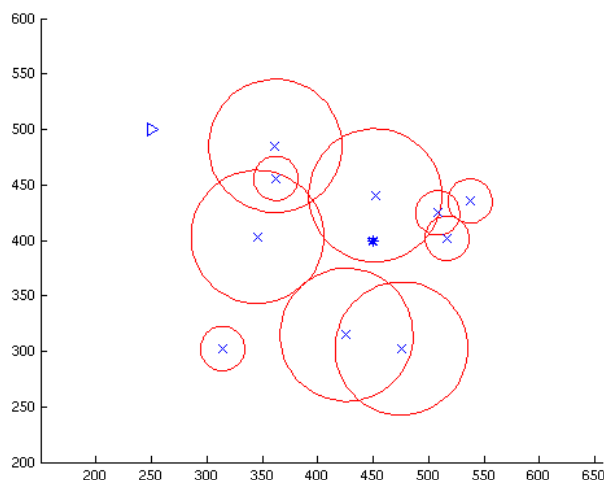
*Två UCAV:er har lyft för att genomföra ett attackuppdrag långt in över ett område försvarat av fientligt luftvärn. När de närmar sig fientligt område får de en uppdatering av kända hot från en AWACS i närheten. Det mesta underlaget är korrekt, men några LV-positioner har ändrats och några har tillkommit. UCAV:ernas omplaneringssystem gör automatiskt en uppdatering av planen. Den nya planen har en lägre riskexponering, och kräver inte mer bränsle än vad som finns tillgängligt.*

*En stund senare registrerar de ombordvarande radarvarnarna nya hot. De inmätta radarstationernas positioner är osäkra, denna osäkerhet tas med i underlaget till en ny omplanering. När 6 minuter återstår till tänkt ankomst dyker ännu ett hot upp. Eftersom laserbomberna skall visas in av en infiltratör, är det emellertid av yttersta vikt att de inte fälls senare än överenskomna 15 sekunder efter angiven tid. Under de sista minuternas flygning tar UCAV:erna ut precis så stor omväg runt hotområdet som de 15 sekunderna medger, och fäller lasten inom utsatt tidsfönster.*

Vi beskriver först en planeringsalgoritm, och sedan en reaktiv styralgoritm som genomför de resulterande planerna samt tar hänsyn till uppdykande hot (pop-up threats).

#### 3.1.2 Algoritm för banplanering och omplanering

I det följande avsnittet skall vi beskriva hur en algoritm som publicerades förra året, [60], för planering och omplanering av flygbanor fungerar. Betrakta planeringsproblemet i figur 3.1.



Figur 3.1: Ett planeringsproblem. UCAV:ens startposition (250,500) är utmärkt med en triangel, målet (450,400) är utmärkt med en stjärna, kända LV-positioner är utmärkta med X och deras hotområden indikeras av cirklar.

Säg nu att vi vill hitta den bästa banan från start till mål. Eftersom målet ligger inuti ett hotområde kan vi inte hoppas på att helt undvika dessa. Den första frågan är då hur farliga LV-hoten egentligen är, på olika avstånd.

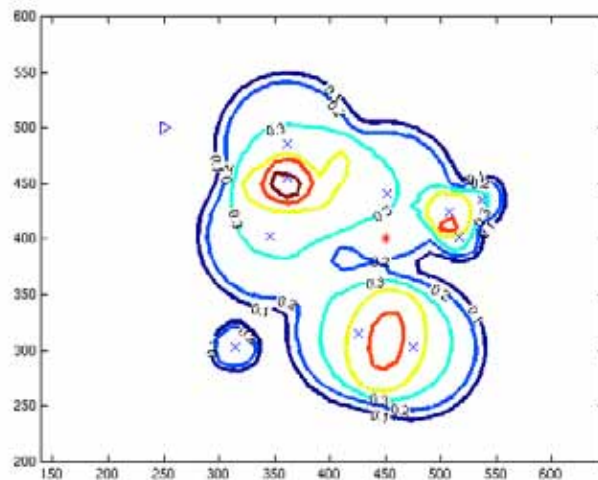
### Modellering av hot

Hur farligt är det att flyga, säg 15 km, inom ett hotområde? Det är förstas farligast att flyga nära hotområdets mitt, där LV-radarn har större möjligheter att detektera flygplanen och man befinner sig långt innanför LV-robotarnas räckviddsgränser. För att kunna göra planeringen måste vi först uppskatta hur farligt det är att flyga på olika platser i kartan. En sådan hotnivå-karta skulle kunna se ut som figur 3.2. Kartan beror förstas på vår plattform, i det här fallet en UAV med låg radarsignatur, samt på hur osäker informationen är. Det är farligare att flyga där vi vet att det finns ett hot, än där det med en lägre sannolikhet finns ett.

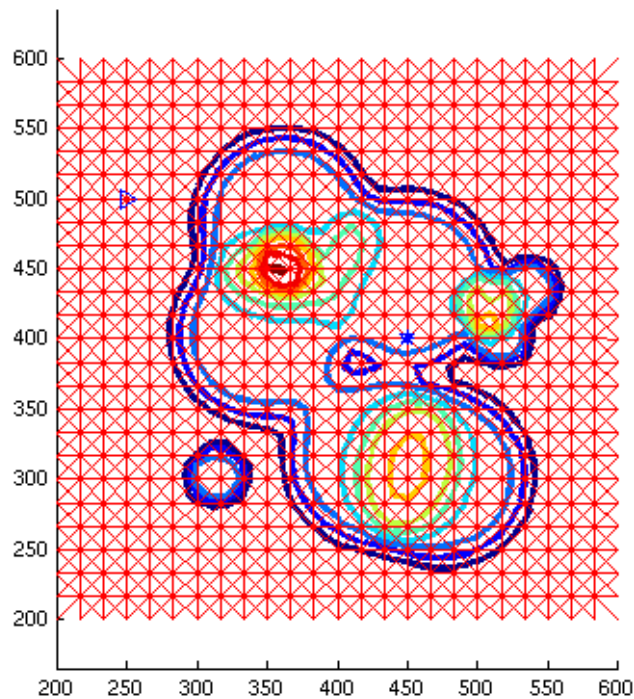
### Möjliga flygvägar

För att vi skall kunna välja den bästa flygbanan till målet måste vi först skapa ett "vägnät" att välja ur. Ett exempel på ett sådant nät återfinns i figur 3.3. Nätet kan se ut på många sätt, vara tätt eller glest, vara med eller utan diagonala sträckor, eller vara extra-tätt just där det behövs, tex i smala passager. Oavsett hur nätets ser ut, eller är skapat, är det samma algoritmer som används för att räkna ut den bästa vägen. I det följande använder vi det nät som finns illustrerat i figuren.

Innan vi kan avgöra vilken väg från start till mål som är bäst måste vi nu sätta en kostnad på varje delsträcka. Eftersom vi vill ha en väg som är både rimligt kort och rimligt säker låter vi kostnaden vara en summa av sträckans längd och risken, tagen från figur 3.2. Nu kan vi tillämpa en algoritm som heter A\* på problemet. Nedan beskrivs hur A\* fungerar. En fördel med A\* är att vi får bästa vägen till målet, inte bara från startpunkten, utan även för en hel



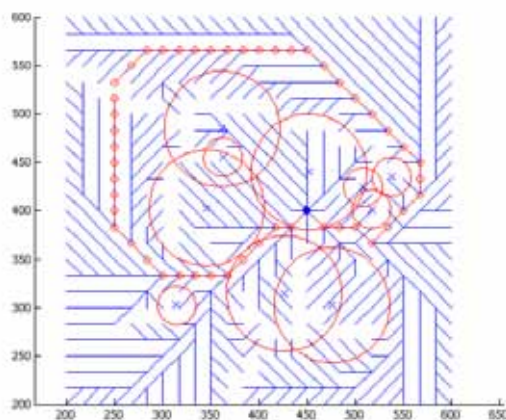
Figur 3.2: Risknivån för att flyga 15 km i olika delar av kartan. Inom t ex 0.3-kurvan är det 30% risk att förlora UAV:n under flygning av en 15 km lång delsträcka. Notera att vi uppskattar att det är större risk att flyga i områden som täcks in av flera hotområden.



Figur 3.3: Ett nät att välja flygbana i, och risknivån för respektive delsträcker.

uppsättning möjliga punkter. Vi får alltså ett helt träd med kortaste vägar,

som visas i figur 3.4.



Figur 3.4: Beräknade bästa vägar till mål från varje punkt. Notera hur närliggande punkter, som tex (250,520) och (250,530) kan ha helt olika vägar till mål.

### A\*-algoritmen

Hur fungerar då A\*? Idén är att man börjar från målet och räknar bakåt. Betrakta figur 3.4 igen. Till målet kan man komma från de åtta närliggande punkterna. Vi fyller nu i den av dessa som har lägst kostnad på sin sträcka till mål. Detta måste ju vara den bästa vägen, eftersom alla andra vägar från denna punkt till mål måste innehålla någon av de andra dyrare sträckorna, och därför inte kan vara bättre. Vi har nu två säkra punkter, målet och punkten med den nyss ifyllda sträckan till mål.

Nu betraktar vi alla punkter som gränsar till de två säkra. Av de nya punkterna fyller vi återigen i den som har lägst kostnad till mål. För att beräkna detta utnyttjar vi att vi för vägar som går via de säkra punkterna redan vet kostnaden för hela vägen utom den första delsträckan.

Nu har vi tre säkra punkter, dvs punkter där vi vet optimal väg och kostnad. A\*-algoritmen fortsätter nu på samma sätt att undersöka grannar och succesivt fylla i säkra punkter, ända tills vi når den eftersökta startpunkten, eller gått igenom hela vägnätet. Det finns ytterligare några tekniska finesser i olika varianter på A\*, mer om detta kan man läsa i tex [21].

### Olika bränslekrav

Om vi tittar på figur 3.4 igen kan man tycka att det finns utrymme för förbättringar av vår algoritm. Skillnaden i vägval är som noterats stor mellan punkterna (250,520) och närliggande (250,530). Från den första punkten skall vi flyga söderut och från den andra nordöst. Den norra vägen är avsevärt mycket längre, men säkrare, medan den södra är kortare och farligare. Eftersom vi i problemet vägt ihop risk och sträcka har de båda vägarna ungefär samma kombinerade kostnad.

Detta är emellertid inte särskilt lyckat, vi vill ju välja den minst riskfyllda vägen, som inte är längre än att tillgängligt bränsle räcker för att flyga den. Har vi ont om bränsle och befinner oss i (250,530) är den föreslagna norra vägen inte ett alternativ, utan vi borde ta den södra. Omvänt, om vi har gott om bränsle och startar från (250,520) borde vi ta den norra, säkrare vägen, trots

att den södra är kortare. Innan vi ser hur vi tillgodoser även bränslekrav skall vi emellertid göra ytterligare en förbättring.

### Hur adderas risker?

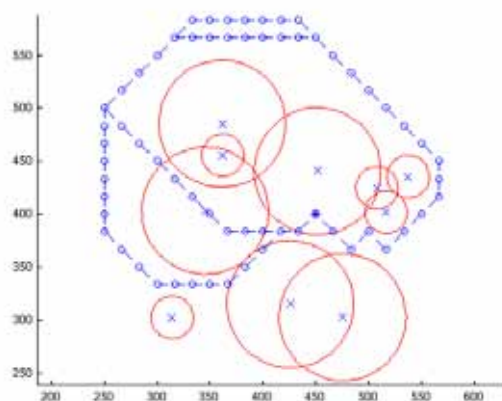
Vi skall nu argumentera för att man skall vara lite försiktig när man adderar risker i algoritmen. Betrakta följande exempel.

Om en UAV under passerandet av ett hot har 50% risk att bli utslagen, och under passerandet av nästa hot har 60% risk, så blir den totala risken inte 110%, utan istället 80%. Detta för att överlevnadssannolikheterna är 50%, respektive 40%, vilket ger total överlevnadssannolikhet  $0.5 \cdot 0.4 = 0.2$ , vilket i sin tur medför utslagningsrisken  $1 - 0.2 = 0.8 = 80\%$ .

Hur skall vi få med detta i vår banplaneringsalgoritm? A\* beräknar ju bästa vägen som summan av ett antal kostnader. Tricket ligger i användandet av logaritmer. Eftersom  $\log(xy) = \log(x) + \log(y)$ , kan vi istället för att bara sätta kostnaden till risken  $r$  låta kostnaden vara  $-\log(1 - r)$ . Detta gör t.ex. att kostnaden för risken  $r = 1$  (säker förlust av UAV:n) blir  $-\log(0) = \infty$ , oändligheten, vilket stämmer med vår avsikt. Om en planerad flygbana passerar ett ställe där UAV:n med säkerhet förloras, så spelar det inte någon roll hur säker resten av vägen är.

### WCSP-algoritmen

Nu använder vi dessa nya risk-kostnader, samt en mer avancerad variant av A\*, kallad WCSP (Weight Constrained Shortest Path Problem), som klarar av att hantera skillnaden mellan det som skall minimeras (risken) och det som är en fast begränsning (bränslet). Resultatet visas i figur 3.5. Som vi ser kan vi alltså



Figur 3.5: Bränslebegränsningen 300 km ger den mittersta flygbanan och en överlevnadssannolikhet på 6%. Begränsningen 400 km ger den södra banan och sannolikheten 22%. Slutligen ger begränsningarna 600 km och 700 km sannolikheterna 58% respektive 60%.

ange hur lång flygbanan får vara, t.ex. max 300 km, eller max 700 km etc och som svar få en bana med minimal risk, givet att bränslekravet uppfylls. Med den nya risk-beräkningen kan vi dessutom se vilken risknivå hela uppdraget ligger på, dvs den totala överlevnadssannolikheten. Trots att detta är en mycket grov uppskattning ger det ett stöd för operatören vid nyupptäckta hot då beslut skall tas om uppdraget skall fullföljas eller avbrytas.

### 3.1.3 Begränsningar och alternativa algoritmer

Man kan läsa mer om WCSPP-algoritmen i [60], där också ett alternativt sätt att skapa "vägnätet" används, en så kallad Voronoi-graf. Det finns även probabilistiska konstruktioner av näten, dessa kallas Probabilistic Road Maps (PRM) och Rapidly Exploring Random Trees (RRT). Fördelen med dessa är att de ökar upplösningen på nätet allt eftersom, ända tills en lösning hittas. Alternativa uppdragsplaneringsalgoritmer finns i tex [11], [19] och [20].

Vilka begränsningar finns då med den ovan beskrivna algoritmen? Man kan notera den föreslagna banans sick-sackande vid (500,375). Detta beror på nätets bristande finmaskighet, det finns helt enkelt ingen öst-västlig kant att välja mitt mellan hotområdena. Notera också att banornas kurser hela tiden är  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $180^\circ$  osv, vilket förstås också beror på nätets utseende. Läger man till fler maskor och kanter i andra vinklar mildrar man dessa problem, till priset av ökade beräkningstider. Detta är en fundamental avvägning, och man får välja den vägnätstyp och finmaskighet som motsvarar problemtyp och beräkningskapacitet.

Man kan förstås även mjuka till de föreslagna banorna efter att de returnerats av planeringsalgoritmen. Detta går utmärkt, men det blir bara justeringar av de resultat man redan har. Om planeringen på en grovmaskighet helt missat en bra väg som går mitt emellan två hot, kommer man inte hitta den genom att efterarbeta en annan lösning.

En annan begränsning är att man måste skatta riskerna. Detta är förstås behäftat med stor osäkerhet, eftersom man sällan vet exakt var motståndarens luftvärn är grupperat. Ett sätt att hantera detta är att låta risken i sig bestå av både en säker och en slumpmässig komponent. I [43] beskrivs hur man kan göra detta och fortfarande använda A\*-algoritmen.

### 3.1.4 Algoritm: Kurskorrigeringar för att uppfylla tidskrav i slutfasstyrningen under plötsligt uppdykande hot

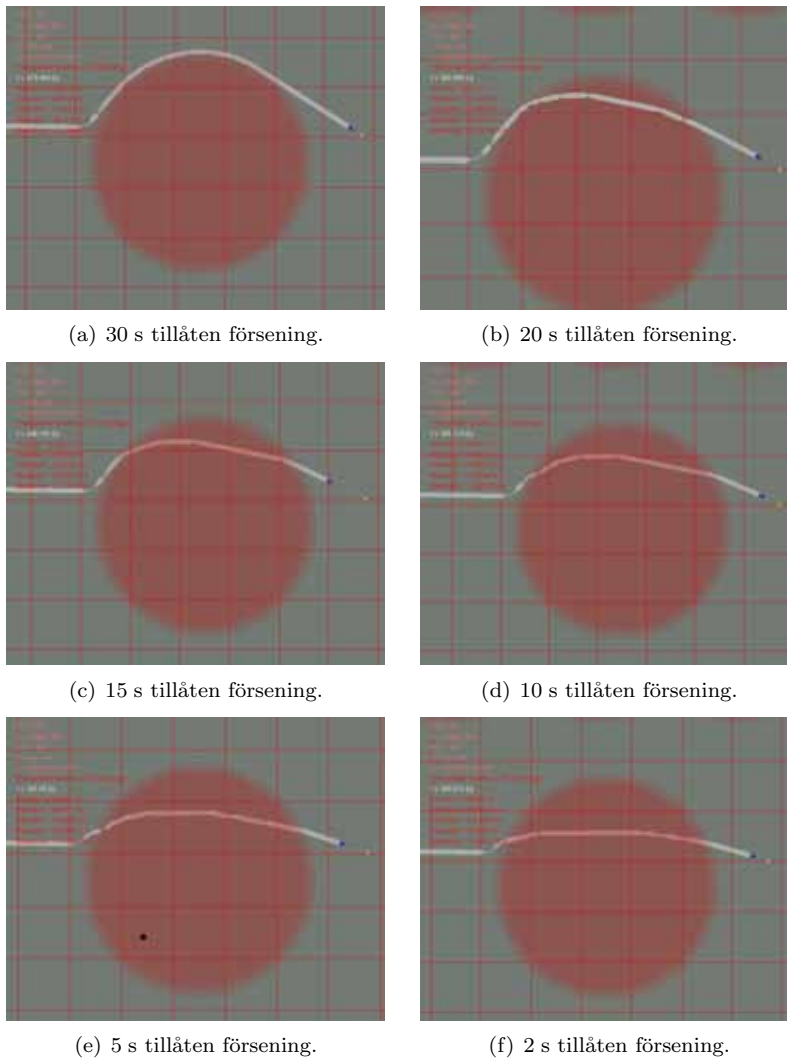
När vi nu har en autonom planerings- och omplaneringsförmåga kan det tyckas att alla förutsättningar är på plats för att genomföra ett autonomt UAV-uppdrag. Det behövs emellertid en reaktiv del, som dels genomför den uppgjorda planen genom att följa en brytpunktsbana genererad av planeraren ovan, och samtidigt omedelbart reagerar på tex plötsligt uppdykande hot. Betrakta situationen i scenariobeskrivningen. Under de sista minuterna innan ankomst till målet dyker ett nytt hot upp, och UCAV:erna använder den marginal som finns i ankomstkravet för att ta ut så stort avstånd till hotet som möjligt. Hur åstadkommer man detta?

Ett sätt, som användes i AJ-37 Viggen, är att använda en klocka som givet ankomsttid och position hela tiden visar hur sen/tidig man blir, givet att man håller aktuell hastighet. Med hjälp av en sådan kan vi tänka oss att en mänsklig pilot skulle kunna åstadkomma en lagom stor omväg. Ju större marginal som finns, desto mer kan man tillåta sig att avvika från kursen mot mål. Precis detta förfaringsätt kan man automatisera, och får då resultaten i figur 3.6.

Styrprincipen, "ju större marginal, desto större avvikelse kan vi tillåta", kan emellertid generaliseras till att hantera allmänna avvägningar mellan uppdragsmål så som hotnivåer, bränsle- och tidskrav. Bilderna i figur 3.6 är exempel på en sådan generalisering som vi nu skall beskriva.

På samma sätt som man kan beräkna predikterad försening, kan man också räkna ut predikterad bränslemarginal vid landning. Och på samma sätt som avvikelser i kurs och hastighet påverkar förseningen påverkar de också den predikterade bränslemarginalen. För en viss typ av UCAV med hög underljudsprestanda kan bränslemarginalens förändring som funktion av kurs och





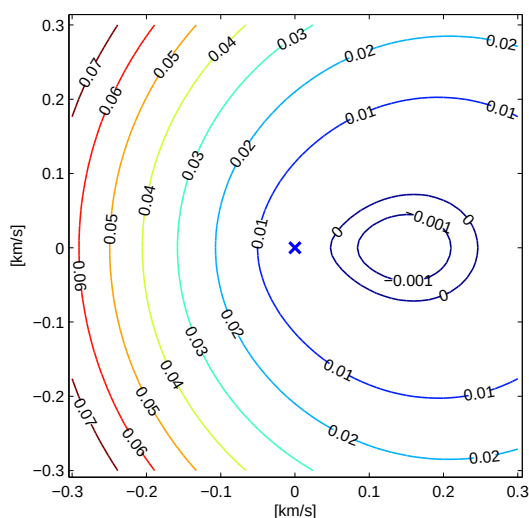
Figur 3.6: Slutfasen av bana mot mål. UCAV:en har en önskad ankomsttid,  $t = 360s$ , och en maximal tillåten försening.

hastighet se ut som i figur 3.7. Om UAV:n autonomt skall prioritera mellan  $t_{\text{ex}}$  tid vid målet och hotnivå så krävs det förstås att operatören innan uppdraget har angivit vad som är viktigast. I vissa uppdrag är man redo att offra UAV:n för att lösa uppgiften, medan andra uppdrag avbryts om risken att förlora plattformen blir för stor.

För att operatören tydligt skall kunna styra prioriteringen i varje uppdrag tänker vi oss att han fyller i en tabell liknande tabell 3.1.

Varje rad i tabellen motsvarar ett delmål för uppdraget,  $t_{\text{ex}}$  storlek på bränslemarginal, tid vid målet eller accepterad hotnivå. Den första kolumnen i tabellen beskriver vad som är allra viktigast, i det här fallet en bränslemarginal på 10%. Nästa kolumn beskriver vad som är nästa prioritet, givet att önskemålen i de tidigare kolumnerna är uppfyllda. I det här fallet är nästa prioritet att hålla minst hotavstånd 1,0 (avstånd / hotets räckvidd) till alla kända hot. Tabellen innehåller så ett antal kolumner, där den sista kolumnen, den längst till höger, innehåller alla önskemål som ställs på ett helt lyckat uppdrag.

Vi skall nu se på ett exempel hur tabellen kan användas till att välja kurs

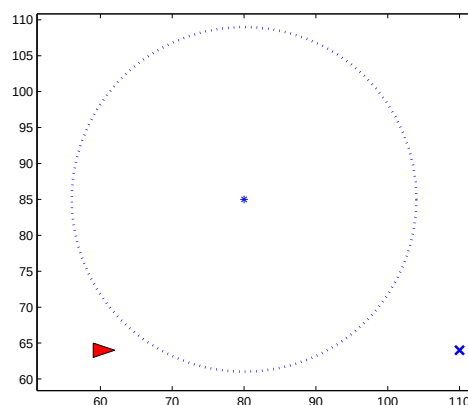


Figur 3.7: Försämringen i bränslemarginal, som funktion av kurs och hastighet. Notera att en kurs rakt mot målet (österut) med bränsleekonomisk fart (ca 150 m/s) ger en förbättring (negativ försämring) av marginalen.

|                        | 1   | 2   | 3   | 4     |
|------------------------|-----|-----|-----|-------|
| Tidsfönster $\leq$     |     |     |     | 5 min |
| Bränslemarginal $\geq$ | 10% | 10% | 15% | 15%   |
| Hotavstånd $\geq$      |     | 1   | 1   | 1     |

Tabell 3.1: En uppgiftsprioritetstabell. Notera att en bränslemarginal på 15% och minst 1.0 hotavstånd, (PL 3), är viktigare än att nå målområdet i tid, (PL 4).

och hastighet i varje tidpunkt. Betrakta situationen i figur 3.8, där en UCAV är på väg österut när ett hot dyker upp i form av en LV-radar, 30 km nordöst om UCAV:en. Nuvarande predikterade bränslemarginal är på 11%. Avståndet till LV-radarn är 30 km och det nominella hotavståndet är 24 km, vilket ger ett hotavstånd på  $30/24=1,25$ . Vidare är den predikterade förseningen 0 s.

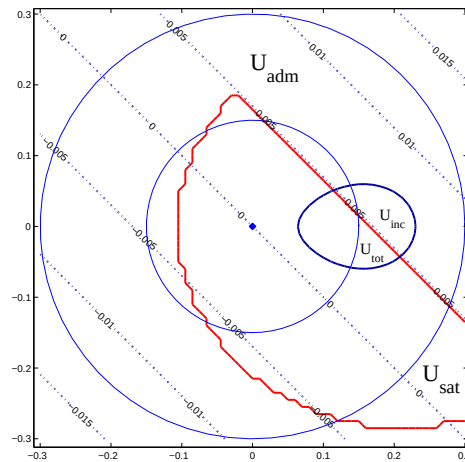


Figur 3.8: UCAV:en (triangel) vid (60, 64) är på väg österut mot basen (x) vid (110, 64) när ett LV-hot (\*) dyker upp vid (80, 85).

Först beräknas i vilken prioritetskolumn UAV:n nu befinner sig. I kolumn

1 är alla kraven uppfyllda ( $11 > 10$ ). I kolumn 2 är också alla kraven uppfyllda ( $11 > 10$  och  $1,25 > 1$ ). I kolumn 3 är emellertid bränslemarginalkravet på 15% inte uppfyllt. Alltså är aktuell kolumn den omedelbart till vänster om kolumn 3, dvs kolumn 2. Precis som i fallet med AJ-37 och förseningen skall vi nu tillåta större avvikelser ju större marginaler som finns.

Vi har 1% gap till önskemålet om bränslemarginal, vilket med hjälp av en formel i algoritmen resulterar i att vi tillåter alla kurs- och fartkombinationer inom gränsen 0,02 i figur 3.7. Vidare har vi en hotmarginal på 0,25 hotavstånd vilket hindrar oss från att åka fort åt nordöst. Algoritmen ger att vi måste välja kurs och fart under 0,005-strecket i figur 3.9. Den tjocka röda kurvan i figur 3.9 visar vilka val som uppfyller både bränsle- och hotkrav. Vi kallar detta  $U_{sat}$ , eftersom det satisfierar de aktuella kraven.



Figur 3.9: Olika kurs- och hastighetsalternativ, i exemplet från figur 3.8.  $U_{sat}$  upprätthåller aktuell prioritetskolumn i tabell 3.1.  $U_{inc}$  fokuserar på nästa kolumn.  $U_{adm}$  bestäms av UAV-prestanda och  $U_{tot}$  är skärningen av allihop. Notera att  $U_{tot}$  svarar mot kursen ost-syd-ost med bränsleekonomisk hastighet, vilket är rimligt, givet figur 3.8.

Nu är det emellertid även intressant vad som är nästa prioritet, kolumn 3. Där står att nästa önskning från operatören är att bränslemarginalen bör vara inte bara 10 utan 15 procent. Vi ser i figur 3.7 att det som förbättrar bränslemarginalen är att välja en kurs och fart nära 150 m/s österut, dvs det äggformade området  $U_{inc}$  i figur 3.9.

Algoritmen strävar nu efter att välja en kurs i skärningen av  $U_{sat}$  och  $U_{inc}$ . Eftersom vår UCAV vidare klarar av hastigheter mellan 150 m/s och 300 m/s, området  $U_{adm}$  i figuren, så måste valet bli en hastighet strax över 150 m/s i ostsydostlig riktning, markerat med  $U_{tot}$  i figuren. En sådan kurs är också rimlig, givet situationen som visas i figur 3.8.

### 3.1.5 Begränsningar och alternativa algoritmer

Man kan läsa mer om den beskrivna algoritmen i [58]. Alternativa metoder för att prioritera olika uppgifter finns i [9], men dessa saknar möjligheter att ange värden som bör hållas för olika mått, t ex försening.

En begränsning med ovan beskrivna prioriteter är att övervägandena endast är lokala. Algoritmen gör ingen plan för framtiden, utan reagerar bara på omständigheterna i just den position UAV:n befinner sig i. Därför är det viktigt att ha en planeringsförmåga, likt den som beskrivs i avsnitt 3.1.4 ovan.

I vissa fall, som tex då man skall flyga extremt lågt, räcker emellertid inte upplösningen i den övergripande uppdragsplaneringen, utan en kompletterande lokal planeringsförmåga krävs. Nedan skall vi se exempel på detta.

## 3.2 Förmåga: Flygning på låg höjd med terräng och byggnader

Den planeringsalgoritm som beskrivits ovan är användbar även för låghöjdsflygning. Den reaktiva styrningen måste dock ersättas med en mer sofistikerad algoritm när detaljerna på hinder och terräng är av samma storleksordning som vändradien på UAV:n. Nedan skall vi presentera två varianter av en sådan algoritm.

### 3.2.1 Scenario 1: Låghöjdsflygning över terräng

*För att kunna identifiera målet med den säkerhet som krävs i rådande ROE (rules of engagement) måste UCAV:en passera max 400 m över målet. Således är inte flygning på hög höjd ett alternativ, och eftersom det finns gott om MANPADS, (MAN Portable Air Defence System), i området gäller det att flyga så lågt som möjligt för att överleva. En grovplanering av uppdraget är gjord, där delar av flygningen sker längs en uttorkad flodbädd. För att kunna flyga på lägsta höjd måste emellertid UAV:n kontinuerligt mäta upp terrängen framför sig och hela tiden planera flygningen för de närmsta 10 sekunderna i detalj. Dykningen ner i en sänka får inte vara brantare än att man kommer upp i tid för att klara höjden på andra sidan.*

### 3.2.2 Scenario 2: Låghöjdsflygning mellan byggnader

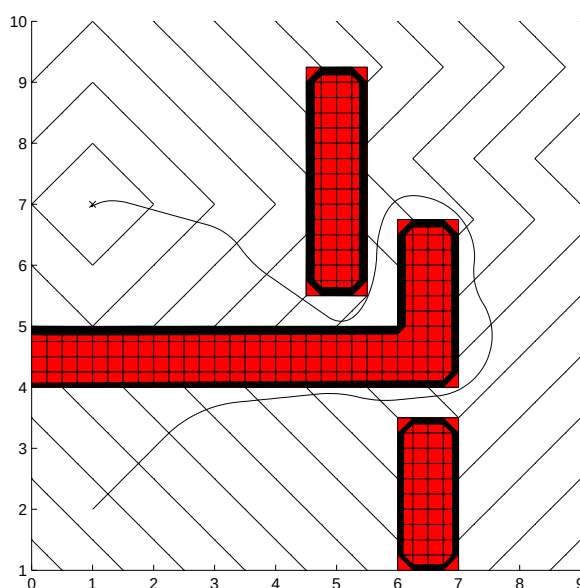
*I en stadsdel inom den svenska insatsstyrkans ansvarsområde har flera spaningshelikopter-UAV:er av typ Skeldar, se avsnitt C.4.3, nyligen förlorats i samband med att krypskyttar beskjutit marknadsplatsen. Det verkar som om ett par individer specialiserat sig på att först slå ut eventuella spanings-UAV:er och sedan sätta skräck i lokalbefolkningen. För att möta detta hot har Skeldar-UAV:erna utrustats med förmåga att vid angrepp gå ned i skydd och tidvis flyga mellan husen och på så sätt hålla förövarna sysselsatta och delvis observerade, tills en skyttegrupp ur den svenska snabbinsatsstyrkan kommer till platsen.*

Nedan skall vi beskriva två algoritmer som skulle kunna användas i båda scenarierna. Vi börjar med helikopterfallet, men diskuterar först en idé kallad mikroplanering som används i båda algoritmerna.

### 3.2.3 Mikroplanering eller Receding Horizon Control

Som vi har sett ovan är förmågan till planering och omplanering mycket viktig. Vi har vidare sett, att när det krävs hög tidsupplösning räcker det inte riktigt med att planera nya brytpunktsbanor, utan man måste välja kurs i varje tidpunkt. I fall som kräver hög upplösning i både tid och rum, och där terrängens detaljer är av samma storleksordning som UAV:ns vändradie, krävs emellertid ytterligare verktyg.

När man skall flyga nära terräng räcker det inte med en bra plan för hela uppdraget, och ett reaktivt sätt att välja styrsignal vid varje tidpunkt. Man måste dessutom i detalj ha planerat hur de, säg, närmsta 10 sekundernas agerande ser ut. Detta för att kunna flyga nära begränsningar i form av både prestanda och terränghinder. I facktermer kallas metoden, att med hjälp av en systemmodell hela tiden planera en liten bit in i framtiden, Receding Horizon Control, eller Model Predictive Control. Här kallar vi det *iterativ mikroplanering*.



Figur 3.10: En helikopterbana mellan byggnader. Notera att nivåkurvorna för det hinderfria avståndet till mål är "diagonala", vilket beror på att nätet att välja flygsträckor i, jämför figur 3.3, *inte* innehöll några diagonala kanter.

Betrakta figur 3.10, som visar flygbanan för en helikopter-UAV vilken använder iterativ mikroplanering. Som synes gör UAV:n inga skarpa svängar. Faktum är att den har ganska måttliga svängprestanda i relation till hastigheten och avstånden mellan hindren, och flera av svängarna i figuren ligger på prestandagränsen. Inför de två allra snävaste har helikoptern saktat in för att möjliggöra en brantare sväng. Notera också att det inte är helt okomplicerat att flyga så pass nära hinder, med så pass begränsad styrförmåga. Det är fullt möjligt att flyga in i en smal korridor, som tex den vid (5.75, 6) med så hög hastighet att man varken hinner bromsa eller svänga undan, innan korridoren tar slut.

### 3.2.4 Algoritm för att flyga mellan hus

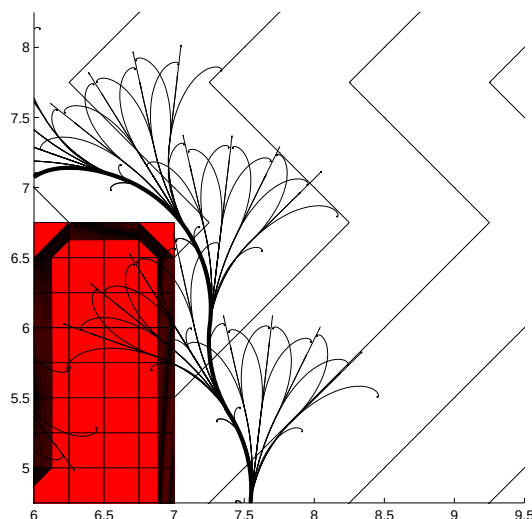
Hur åstadkommer man då en mikroplanerande algoritm för att flyga mellan hus? Det finns fyra punkter man bör beakta när man använder en mikroplaneringsalgoritm:

1. Hur kopplas mikroplaneringen ihop med den övergripande uppdragsplaneringen?
2. Hur skapas mikroplanen? Med optimering eller något annat?
3. Kan man vara säker på att inte mikroplaneringen leder in i omöjliga lägen?
4. Kan man vara säker på att mikroplaneringen inte hamnar i ett deadlock, dvs en låsning som hindrar att målet nås?

Vi skall nu gå igenom dessa fyra punkter för våra lågflygningsalgoritmer. Vi börjar med helikopterfallet.

Först måste man bestämma sig för hur mikroplaneringen skall kopplas ihop med den stora uppdragsplaneringen. I det här fallet har vi använt en A\*-algoritm för att beräkna kortaste hinderfria vägen till mål, ungefär som i figur

3.4, fast med hotområdena ersatta av ogenomträngliga hinder. I figur 3.10 har vi dessutom ritat ut nivåkurvor för avståndet till mål. Som synes strävar algoritmen efter att röra sig vinkelrätt mot nivåkurvorna, den snabbaste vägen mot målet. Här kopplar vi ihop mikroplanen med den övergripande genom att välja en mikroplan vars slutpunkt ligger så nära mål som möjligt, mätt med hjälp av nivåkurvorna från den stora uppdragsplanen.

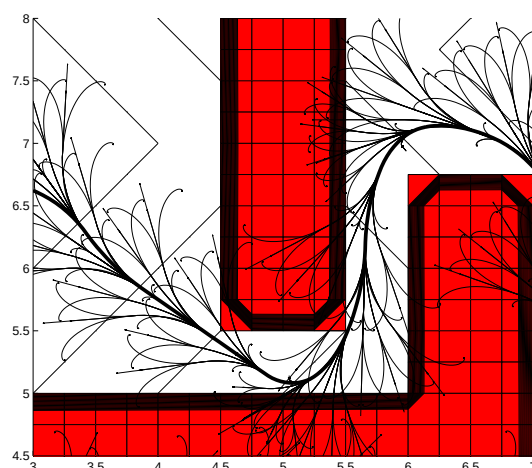


Figur 3.11: Illustration av mikroplaneringen. Vid varje planeringstidpunkt är alla 15 utvärderade mikroplaner inritade. Den tjockare kurvan representerar den flygna banan, och visar därmed vilken av mikroplanerna som valdes i varje steg

Nästa steg är att bestämma hur optimeringen av mikroplaneringen skall gå till. I denna algoritm har vi 15 kandidater till mikroplaner, illustrerade i figur 3.11, som hela tiden utvärderas. Som synes finns det i varje planeringspunkt en liten "bukett" av planer att välja bland. Av dessa väljs den bästa som inte innebär en kollision med byggnader. Med "bästa" menar vi här den plan vars slutpunkt ligger närmast målet, räknat med hjälp av de nivåkurvor som finns utritade i figuren. Dessa nivåkurvor är ju resultatet av hela uppdragsplanen.

Det tredje steget är säkerhet. För det första måste vi se till att vår mikroplan inte innehåller några kollisioner. Detta kan vara beräkningskrävande, men ändå ganska rättframt. Vad som är svårare är att se till att vår mikroplan inte gör att vi hamnar i omöjliga situationer. Betrakta till exempel den krökta gången i figur 3.10. Vad är det som gör att vi inte flyger in i den så fort att det helt enkelt inte går att ta kurvan, utan vi flyger in i väggen? I denna algoritm har vi använt helikopterns förmåga till hovring för att garantera säkerhet. Andra halvan av varje mikroplanskandidat är nämligen en inbromsning, så att farkosten står stilla i slutet av planen. Om vi då vet att planen är kollisionsfri och dessutom slutar i stillastående är vi säkra. Vi exekverar så första delen av planen och utvärderar sedan 15 nya mikroplanskandidater. Om ingen av dessa är kollisionsfri fortsätter vi helt enkelt att genomföra den gamla planen, som ju innehåller en säker inbromsning till stillastående. Detta är förstås inte en lösning som fungerar för flygplan, så i algoritmen i avsnitt 3.2.5 nedan använder vi en annan metod.

Nu kommer frågan om vi kan vara säkra på att farkosten verkligen når målet. Denna är lite mer tekniskt komplicerad. Intuitivt kan man tycka att eftersom varje mikroplan strävar efter att uppnå så bra slutpunkt som möjligt så borde vi tämligen snabbt nå målet. Men för att övertyga den skeptiske behövs ett mer tekniskt resonemang, som man kan läsa om i [59].



Figur 3.12: Passerandet av den smala korridoren. Betrakta "buketten" som startar vid (5.4, 5.4). Här leder alla 15 mikroplanskandidater till en kollision. Därför exekveras avslutningen av den redan påbörjade mikroplanen, den som startade vid (5.6, 6), nämligen en brant bromsande högersväng.

#### Exemplet i figur 3.11

När UAV:n befinner sig i (7.5,4.75) i bildens nederkant utvärderas 15 olika mikroplaner. Den bästa av de kollisionsfria visar sig vara en plan med initial vänstersväng, följt av en rak inbromsning nära (7.0,6.0). Första delen av denna exekveras fram till foten av nästa bukett, vid (7.3,5.5). Här väljs en högersväng, följt av en bromsande vänstersväng, som stannar vid hindrets hörn, (7.0,5.5). Denna plan exekveras fram till foten av nästa bukett (7.3,6.2). Här väljs en vänstersväng, följt av en bromsande vänstersväng som passerar hindrets hörn. På så sätt fortsätter algoritmen. Som synes skapas hela tiden nya mikroplaner, den bästa väljs ut och börjar exekveras, och ersätts halvvägs av den bästa i nästa grupp. Figur 3.12 visar fortsättningen av flygbanan genom den smala passagen.

### 3.2.5 Algoritm för flygning på låg höjd över terräng

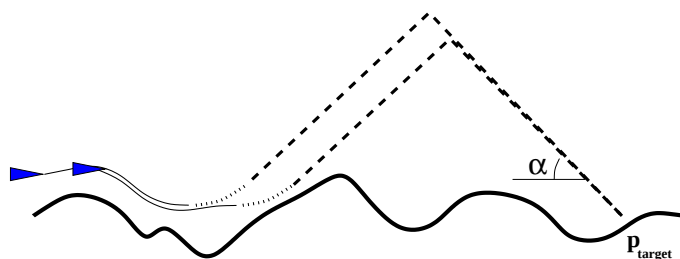
Vi skall nu betrakta ytterligare ett exempel på en mikroplanerande algoritm, denna gång för lågtflygande flygplan eller robotar, dvs system som t ex UCAV, avsnitt C.5.1, kryssningsrobotar, avsnitt C.5.2 och C.5.3, eller andra UAV:er. Även här går vi igenom de fyra punkterna ovan.

Vi kopplar ihop mikroplaneringen på samma sätt som i fallet ovan, fast vi sätter kostnader på "vägnätet" till A\*-algoritmen som beror på terrängens höjd över havet. På så sätt kommer uppdragsplaneringen att favorisera banor som rör sig i dalar.

För att skapa mikroplanerna använder vi här en kommersiell optimeringslösare vid namn NPSOL. Som indata till den ger vi både terräng och flygplanets begränsningar på tvärsacceleration etc.

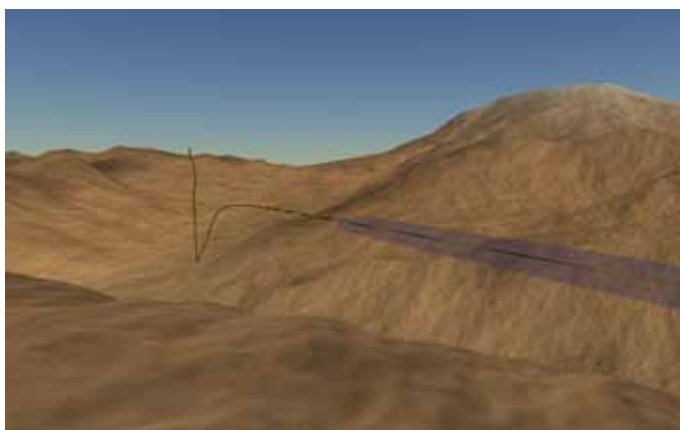
För att se till att mikroplaneringen inte flyger in i omöjliga lägen kan vi inte, som ovan, se till att varje plan slutar i stillastående (hovring). Istället låter vi varje mikroplan sluta i en stigning som är brantare än det brantaste terrängavsnittet i det aktuella området. Då kan vi vara säkra på att denna flygbana går att fortsätta på, utan att flyga in i något berg.

För att slutligen garantera att vi kommer fram till målet lägger vi till ytterligare ett villkor på avslutningen av våra banor. Vi låter stigningen ske i



Figur 3.13: Två konsekutiva mikroplaneringar. Notera att mikroplaneringen är detaljerad i början, men avslutas med en kollisionsfri, men taktiskt tveksam, stigning och dykning ända fram till målet. I normalfallet ersätts dock alltid mikroplanen av en ny plan innan exekveringen nått stigningen.

riktning mot målpunkten, och lägger till en brant dykning ned mot målet på slutet, så som illustreras i figur 3.13. Om då alla försök att ta fram nya kollisionsfria mikroplaner misslyckas, fortsätter vi bara att flyga den gamla planen, som slutar med en brant stigning och dykning mot målet. Det är förvisso inte så taktiskt elegant, men tanken är att det skall fungera som sista utväg, om alternativet är att störta i terrängen. Om allt går som det skall kommer ständigt nya mikroplaner med lågflygande första delar att ersätta varandra, så som figur 3.13 visar. En simulering av algoritmen kan se ut som i figur 3.14.



Figur 3.14: En bild ur en animering av en simulering av en mikroplaneringsalgoritm för lågtflygande flygplan

### 3.2.6 Alternativa algoritmer och begränsningar

Man kan läsa mer om de två algoritmerna i [59] och [8]. Ett alternativ för flygplansfallet finns beskrivet i [32]. Eftersom uppdragsplanering ingår i dessa algoritmer så lider förstas denna del av samma svagheter som de som beskrivits ovan. Olika varianter av optimering av mikroplaneringen har sina särskilda svagheter. I helikopteralgoritmen blir resultatet lite svängigt, eftersom det bara finns 15 mikroplaner att välja bland. För att mildra detta kan man förstas använda fler än 15 mikroplaner, beroende på hur mycket tid och beräkningskapacitet som finns tillgänglig. I flygplansfallet, där vi använder en mer avancerad optimeringsalgoritm, är det å andra sidan ibland fallet att den



inte hittar någon godkänd lösning alls. Då får man fortsätta med den gamla planen tills optimeringsalgoritmen hittar en ny. Tar det för lång tid hinner man påbörja stignings- eller dykningsdelen, vilket förstås inte är taktiskt lyckat. Fördelen med dessa algoritmer, nämligen att man kan flyga nära marginalerna, både vad gäller hinder och flygprestanda, kan förstås också bli en nackdel om man mätt eller uppskattat dessa fel. Men detta är ju risken med att flyga extremt lågt.



## 4 Spaning längs vägar, mot punktmål och över yta

Spaning är en förmåga som i vissa situationer är väldigt enkel att automatisera och i vissa väldigt komplicerad. I dess enklaste form handlar det om att flyga till en punkt, ta en bild, och sedan flyga tillbaka. I dess svåraste form gäller det att med kloka val av flygbana och sensorriktning på kort tid få bilder av en stor mängd intressanta punkter och ytor. Bilderna skall dessutom gärna vara tagna på nära håll och ur flera olika vinklar. Ytterligare komplikationer kan komma ur att de intressanta objekten rör sig och försöker undkomma spaningsplattformen, eller att objektens position är okänd, så att själva letandet blir utmaningen. De autonoma algoritmer för styrning av plattform och sensor som presenteras här kan vidare med fördel kopplas ihop med de algoritmer för sensordataanalys som presenteras i appendix A.

Detta kapitel är indelat i tre olika avsnitt:

- Spaning över yta.
- Spaning mot rörligt mål.
- Detaljerad spaning mot punktmål och vägar.

Som i tidigare kapitel presenteras i varje avsnitt först ett antal scenarion, eller typsituationer, som representerar en förmåga och därefter beskrivs en algoritm som realiserar förmågan. Slutligen diskuteras kort begränsningar och alternativa algoritmer.

### 4.1 Förmåga: Snabb spaning längs vägar och över yta

I detta kapitel skall vi beskriva autonoma spaningssystemers förmåga att snabbt söka av en av operatören given yta. System som kan tillföra en sådan förmåga är tex UAV:erna ScanEagle, Predator och Killer Bee, i avsnitt C.4.2, C.1.5 och C.1.1, samt de autonoma attackrobotarna LOCAAS, avsnitt C.2.1, och Netfires, avsnitt C.2.2.

Att på kort tid fotografera av ett terrängavsnitt är ur autonomisynpunkt ganska lätt. Det är med dagens kunskaper möjligt att skapa ett lättanvänt gränssnitt i vilket man pekar ut det område som skall fotograferas över vilket en UAV sedan flyger i ett mönster som täcker hela ytan. Realiseringsproblemen återfinns snarare inom området navigering, när god precision skall uppnås med en liten och billig plattform. Om man vill att systemet skall ha en större förmåga att på ett intelligent sätt planera fotograferingen, utifrån ett antal prioriteringar som satts av operatören, tex att vissa områden är viktiga att fotografera omgående, några med extra stor noggrannhet, och att planera deluppdragen så att de utförs på bästa sätt i tiden krävs fortfarande forskningsinsatser. Problemet går att formulera och kan ställas ganska väl men en färdig lösning går inte att finna i litteraturen.

## Framtida scenarion

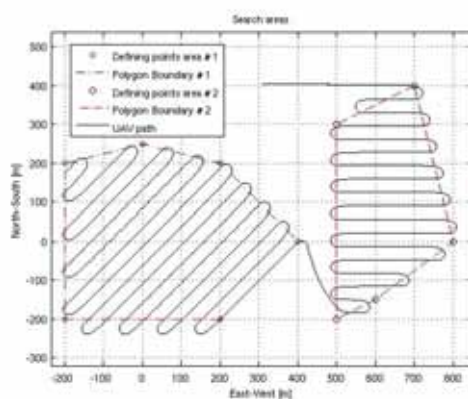
I detta kapitel skall vi presentera ett antal möjliga framtida scenarion, för att sedan beskriva vad som ur autonomisynpunkt är realiserbart givet forskningsfronten, och vad som är realiserbart först på mycket lång sikt. Problemet att söka efter mål som befinner sig inom ett område är ofta ganska rättfram. Det enklaste sättet att söka av ett område är att enkelt svepa över det med "oxdragarmetoden" [17]. Att flyga fram och tillbaka över ett område så som en oxe plöjer ett fält och "dammsuga" med en sensor. Men ofta finns det önskemål att prioritera vissa områden före andra, eller att först söka av en viss plats för att verifiera information om ett siktat spaningsmål, för att sedan på ett klokt sätt utöka sökområdet så att chansen att hitta ett mål blir så stor som möjligt. Beroende på uppgiften kan sökuppgiften se ut på olika sätt.

### 4.1.1 Skapa färsk Google-Earth-Mosiak över närområdet

*En skyttegrupp skall snabbt välja plats för ett eldöverfall mot en grupp fordon som inom en timme kommer att passera längs en landsväg. Gruppen har med sig en SkyLark, avsnitt C.4.1, som startas med uppgiften att snabbt fotografera av de närmsta kilometrarna av vägen. Efter 5 minuter har ett antal bilder tagits och automatiskt klistrats ihop till en sammanhängande bild. Gruppchefen kan nu använda ett gränssnitt av typ Google-Earth, för att snabbt hitta en lämplig eldställning.*

#### Algorithm för mosaik

Detta är en ganska enkel uppgift för ett autonomt system. Att över ett område svepa med en kamera eller annan sensor så att markytan täcks av sensorns "fotavtryck" kan göras när man känner farkostens och sensorns begränsningar, sökmönstren kan automatiskt anpassas till olika former på ytor, se figur 4.1 för en illustration.



Figur 4.1: Sökmönster som täcker två polygoner.

De svåra utmaningarna är inte inom området algoritmer för autonomi utan snarare inom navigering. Att med tillräcklig stor noggrannhet positionsbestämma UAV:n och riktningsbestämma kameran är svårt och dyrt för relativt små system som SkyLark. För att bilderna skall kunna klistras ihop till mosaik krävs att de är transformerade till ett och samma referenssystem. Det finns idag programvara som automatiskt skapar en mosaik (se figur A.7 för ett exempel) men kraven på precision finns fortfarande om det skall gå med en

acceptabel hastighet. För en högt flygande (mer än en kilometer) spaningssensor är det lättare, se avsnitt A.1.2, men för en liten spaningsfarkost som flyger relativt nära marken är det mer komplicerat.

#### 4.1.2 Återlokalisering av observerat mål

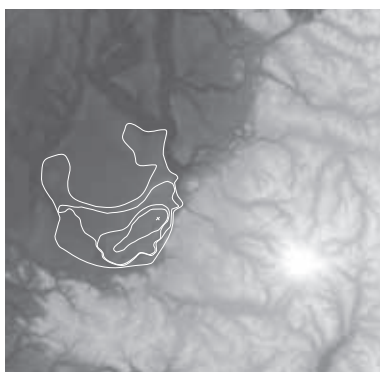
*En spaningsgrupp rapporterar in en observation av ett av de SCUD-fordon som under en tid spridit förödelse och skräck i regionens storstäder. Tre Killer Bees C.1.1 startar och sätter kurs mot positionen. Under vägen räknas ett sökområde automatiskt ut, baserat på fordonets maxhastighet på väg och i terräng, samt medhåll GIS-databas (GIS, Geographical Information System). Det beräknade sökområdet delas automatiskt upp mellan UAV:erna som börjar sökningen längs vägarna, de mest troliga ställena. Efter detta sveps terrängen systematiskt av i breda stråk med de tre UAV:erna i bredd. SCUD:en upptäcks inkörd en bit i skogen i utkanten av sökområdet, och bekämpas efter visuell identifiering och klartecken från operatör.*

#### Algoritm för spaningsprioritering och sökmönster

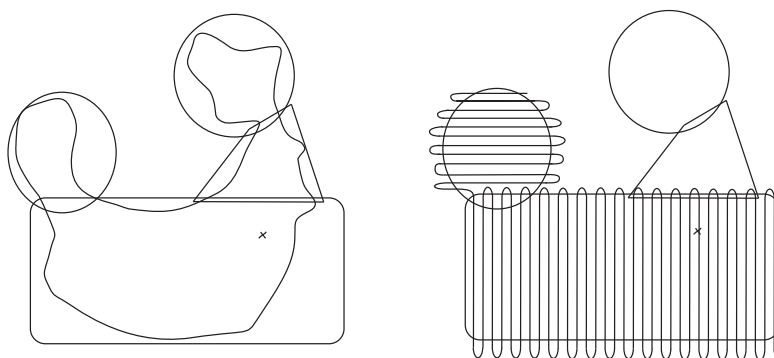
Ett sätt att hitta det område där fordonet kan vara är att räkna ut en "ekvidistanskarta" av sk isokroner som representerar fordonets möjliga positioner i olika tidpunkter. Genom att göra en uppskattning av fordonets hastighet i olika riktningar kan man hitta kurvor som beskriver fordonets möjliga positioner vid en viss tidpunkt om det kört i någon riktning så fort som möjligt, där hastigheten beror av terrängen.

Sedan kan områdena som bildas av de isokrona kurvorna delas in i enkla delområden, som ellipser, cirklar eller rektanglar. Till varje sådant delområde kopplas därefter ett fördefinierat sökmönster ungefär som visas i figur 4.1. Sökningen utförs i tur och ordning i de olika delområdena. Algoritmen som presenteras i en serie artiklar, se [1],[2],[3], räknar även ut en lämplig sökordning och hur de olika delområdena skall kopplas ihop.

Algoritmen i som presenteras i [1],[2],[3] har använts i simuleringar och kopplats som en modul till en kommersiell produkt, ArcGis. Författarna har haft ambitionen att utveckla en komplett sammanhängande svit av algoritmer som skall lösa hela det ovan formulerade problemet. Det återstår dock vissa brister ur ett matematiskt perspektiv, men metoden är enkel och rättfram, och en utgångspunkt för mer sofistikerade angreppssätt som de som redovisas längre fram i rapporten.



Figur 4.2: Kring den utmärkta positionen är isokroner inritade, kurvor som beskriver områden målet kan befinna sig inom varefter tiden går från första observationen.



Figur 4.3: till vänster ett av områdena i figur 4.2 uppdelat i mindre delar i form av bas-geometrier till vilka effektiva sökmönster kan kopplas och till höger en illustration av sådana sökmönster, som i exemplet i figur 4.1.

#### 4.1.3 Leta hot framför egen trupp

*En bataljon ur Nordic Battle Group skall förflytta sig norrut, från hamnen där de landsats, till operationsområdet. För att minska risken för överraskande angrepp används två ScanEagle, avsnitt C.4.2, som turas om att söka av terrängen framför truppen. Vägar, korsningar, höjder och särskilt utsatta terrängavsnitt passeras extra ofta. De senaste flygbilderna, sammansatta till ett stort kartunderlag, finns ständigt tillgängliga ända ned på gruppnivå i förbandet.*

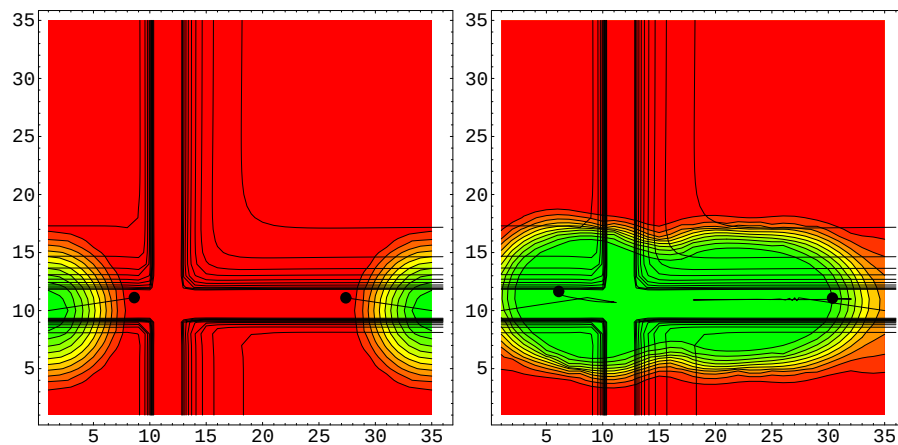
##### Algoritm för ytspaning

I detta avsnitt beskrivs en sökalgoritm som är en modifikation av den algoritm som beskrivs i artikeln [25]. Algoritmen löser uppgiften att med en eller flera UAV:er söka av ett område där man kan ange hur mycket uppmärksamhet som skall ägnas åt olika delar av området. Man kan även ange om ett delområde skall spanas av ofta, om man kan förvänta sig att informationen snabbt blir inaktuell, t ex för en väg. Algoritmen planerar inte i förväg någon bana eller sökmönster utan UAV:erna styrs individuellt så att de så snabbt som möjligt spanar över prioriterade områden. Det är alltså inte en algoritm som hittar en globalt bästa lösning, utan som i varje ögonblick gör det som för tillfället ger mest utdelning i form av mer information.

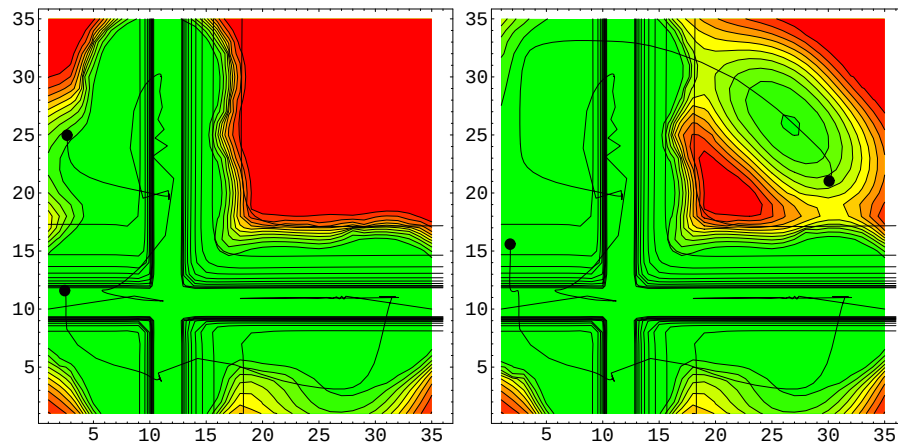
Algoritmen antar att varje UAV "ser" med sin sensor och den samlade "spaningsinformationen" för varje punkt på marken i området byggs upp efterhand genom att UAV:erna "iakttar" punkten tillräckligt länge. Varje UAV bidrar på så sätt med sin del till den totala informationstillväxten. En UAV ser bäst rakt ner medan informationstillväxten avtar med det horisontella avståndet från UAV:n för att helt försvinna för avstånd större än *spaningsradien*  $R$ , dvs UAV:n ser ingenting av marken utanför en cirkel med radien  $R$  och med centrum rakt under UAV:n, se figur 4.6 och 4.7.

I följande exempel, som illustreras i figurerna 4.4 och 4.5, flyger två UAV:er över ett kvadratisk område. I figurerna betyder röd färg att ingen information inhämtats och grönt betyder att området är avspanat. I början samverkar UAV:erna för att så snabbt som möjligt spana av de viktigaste delarna av området, dvs längs vägen, korsningen och tvärvägar. I de två första bildrutorna ser vi hur UAV:erna flyger mot korsningen, svänger tillbaka en gång för att se noggrannare över den väg de först flugit.

I bildruta tre har de spanat av de prioriterade områdena och styr runt resten av området. I den fjärde rutan avspanas så det sista delen av området.



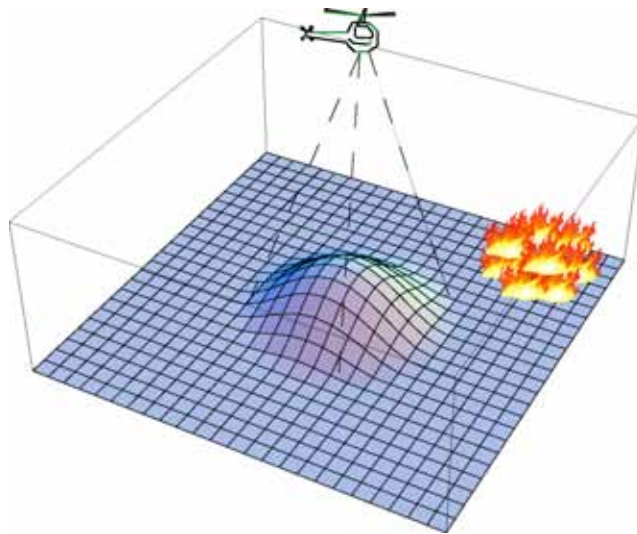
Figur 4.4: En snabb överflygning av det mest aktuella området följs i andra rutan upp av en andra överflygning.



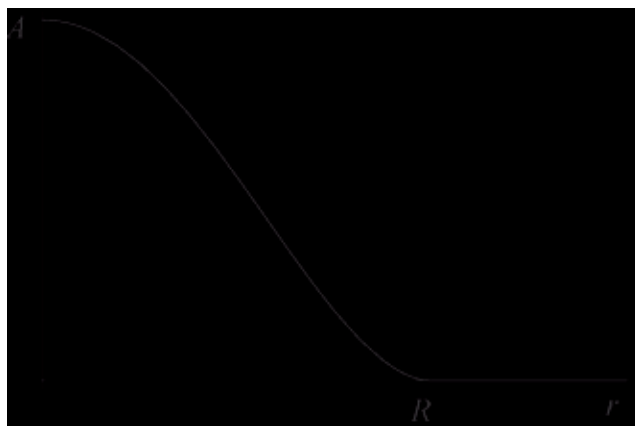
Figur 4.5: När vägarna är kontrollerade täcks de andra områdena in, och till sist det som varit minst prioriterat.

Summan av det som flera UAV:er ser av en punkt på marken blir ett mått på hur väl avspanad den punkten är. För varje punkt anger man ett värde på hur noggrannt man önskar att den skall spanas av. Man kan säga att tillväxthastigheten på informationen om en viss punkt på marken är summan av de olika UAV:ernas spaningsinsats. Hur väl en UAV ser marken representeras av en funktion med det principiella utseende som visas i figur 4.7 och en illustration av effekten syns i figur 4.6. Målet är att så snabbt som möjligt samla in "tillräckligt" mycket information för alla punkter. "Tillräckligt" mycket information kan definieras som ett värde,  $C$ . I exemplet sattes värdet på  $C$  högre längs vägarna som ansågs ha större vikt och lite lägre i ytterområdena som därför inte blev lika "lönsamma" för algoritmen att spana av i början. Informationsbehovet kan även varieras över tid, liksom att redan inhämtad information kan förlora sitt värde när den åldras, och då gör man  $C$  beroende av tiden.

Tanken är nu att styra UAV:erna så att skillnaden mellan den ackumulerade informationen och den önskade graden av information blir så liten som möjligt.



Figur 4.6: Spaningens effektivitet beror av avståndet



Figur 4.7: Spaningseffektivitetens avståndsberoende

Om man tar hänsyn till den sammanlagda skillnaden, över hela området, så kan man styra UAV:erna mot de punkter som har störst skillnad mellan faktiskt och önskad avspanningsgrad. Det ger en algoritm som minskar det totala felet så fort som möjligt.

Algoritmen kan varieras och utökas på flera sätt. Kurvan som beskriver spaningseffektiviteten (figur 4.7) kan varieras efter sensorn, och höjdberoenden kan tas med. De styrlagar som algoritmen resulterar i innehåller flera konstanter och förstärkningsfaktorer. Hur man bäst väljer och värdesätter dem på ett sätt som passar för de UAV:er och sensorer som används är ännu inte helt klart utan fortfarande en forskningsfråga.

### Begränsningar och alternativ algoritmer

Algoritmen förutsätter i sin nuvarande formulering fullständig kommunikation mellan UAV:erna. Detta är naturligtvis ett starkt krav på systemet men inte nödvändigt för algoritmen som sådan eftersom den fungerar utmärkt också för enstaka individer. Styrkan är framförallt den enkla och tydliga formuleringen



och snabba beräkningen av lösningar. Nackdelen är att den bara löser problemet lokalt, och inte gör en planering, den är "girig" och ser bara till att göra det bästa i ögonblicket. Den är dock formulerad så att den tillslut löser spaningsproblemet och spanar över hela ytan. Algoritmen går också att utvidga med både tid och positionsberoende bevakningskrav, något som ofta är ett krav i situationer som det illustrerande scenariot beskriver. En alternativ algoritm till den ovan beskrivna presenteras i artikeln [18]. Den algoritmen bygger på en annan idé, nämligen att sprida ut sensorerna (UAV:erna) över ett område så varje UAV:s delområde är lika "intressant" ur spaningssynpunkt. Delområdena kan vara olika stora till ytan men innehåller lika stor "förväntad information".

#### 4.1.4 Spaning efter lätttrörliga mål, Pursuit Evasion Games

*Efter en serie attentat mot infrastruktur i en FN-kontrollerad stad står ett UAV-förband i hög beredskap. När så en explosion inträffar vid elverket lyfter en UAV och börjar söka av närområdet. Eftersom det är troligt att förövarna ser UAV:n och agerar därefter, kan man inte bara svepa av området likt en gräsklippare, utan måste ständigt återvända till de mest kritiska flyktvägarna på ett oförutsägbart sätt. Samtidigt söker markstyrkor systematiskt igenom byggnad efter byggnad.*

#### Algoritmer för autonomi

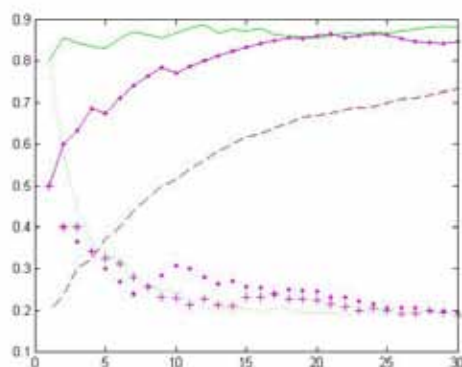
Detta problem är ganska svårt, bland annat för att det innehåller många parametrar som måste tydliggöras för att det skall kunna formuleras på ett algoritmiskt eller matematiskt sätt. Idealt skulle ett system kunna avgöra vilka områden som är mest akuta att söka av utifrån nyckelbegreppen flyktväg, förmodat transportsätt, sannolik destination för förövarna samt terräng. Det ställs ganska stora krav på detektion och igenkänning eftersom förloppet är snabbt och flera av momenten är tidkritiska. Algoritmen i avsnitt 4.1.3 kan utökas med att ta hänsyn till att information åldras. I situationen som beskrivs ovan kan det användas så att UAV:erna ofta återvänder till områden som har hög bevakningsprioritet för att se om förövarna som hållt sig gömda blir synliga. När väl en bil eller annat rörligt mål upptäcks kan metoden för att följa en flyende bil (avsnitt 4.2.2) användas. Vidare kan den algoritm av Cortes m fl som nämns i avsnitt 4.1.3 användas för att sprida ut UAV:erna på ett effektivt sätt så att de bevakar möjliga flyktvägar med hänsyn till vägnät. Algoritmen som löser en del av problemet i avsnitt 4.1.2 kan även användas för att analysera troliga sökområden om det finns information om förövarnas transportsätt. Slutligen kan algoritmerna från avsnitt 2.1.2 användas för att fördela spaningsresurser efter hur tidkritiska de olika sökområdena anses vara. Problemet är komplext och i litteraturen saknas det en färdig lösning för det kompletta problemet.

När spaningsinformation indikerar mål finns det ibland extra information om spaningsinformationens tillförlitlighet. Då är viktig är att kunna bekräfta indikationer, information som inte är säkra observationer. En algoritm som löser en sådan deluppgift presenteras i artiklarna [14, 15, 13], se figur 4.8.

## 4.2 Förmåga: Följa och belysa flyende bil

### 4.2.1 Framtida scenario

*Under en internationell insats blir plötsligt en svensk observationspost beskjuten med raketgevär, RPG. En soldat skadas allvarligt i attacken, och förövarna*



Figur 4.8: Figuren visar hur ett antal måлиндikationer som efter vidare spaning kan bekräftas som mål eller falsklarm. Målsannolikheten beräknas efter ett antal observationer vara lika god som sensorsystemets eget falsklarmsnivå respektive detektionssäkerhet. Sensorn visar att tre av observationerna är sannolika mål, av vilka en var mycket osäker medan en av de mest trovärdiga observationerna visade sig vara ett falsklarm.

*lämnar platsen i en civil pickup. Posteringen rapporterar in händelsen och en patrullerande Killer Bee UAV, se C.1.1, ges i uppdrag att hitta och följa bilen.*

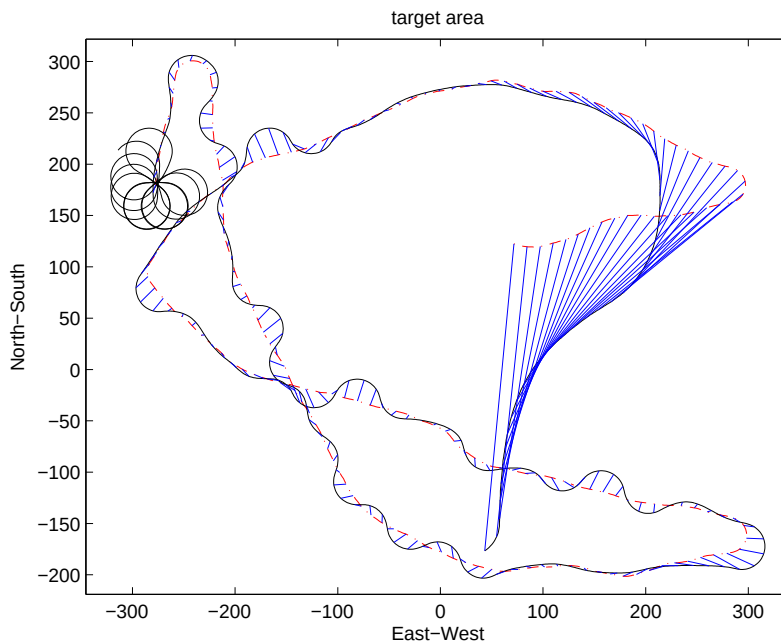


Figur 4.9: En bil som följs av en Killer Bee.

*UAV:n hittar en bil på väg bort från platsen, och efter att posteringspersonal identifierat pickusen i en bild tagen av UAV:n beslutas om vapeninsats. Eftersom denna Killer Bee har vapendelarna utbytta mot extra bränsle måste emellertid verkan ske från en annan plattform. Valet står mellan en Predator, se C.1.5, på hög höjd som av det låga molntäcket hindras från att se bilen, och en Netfires modul, C.2.2, någon mil från posteringen. Vapen avlossas samtidigt som föraren i bilen upptäcker UAV:n och gör allt för att skaka av sig förföljaren. Med en maxfart av 150 km/h har UAV:n ett hastighetsövertag, men det är ändå oklart om den lyckas ligga tillräckligt nära bilen under positionsinmätningen. Strax innan missilen når fram måste måldata vara tillräckligt bra för att missilens egen sökare ska kunna upptäcka målet och slutfasstyra till en träff.*

#### 4.2.2 Algoritm för följning av rörligt mål

Karaktären på detta problem beror mycket på hur målets och UAV:ns hastigheter förhåller sig till varandra. Är UAV:ns lägsta hastighet flera gånger större än bilens maxhastighet tvingas UAV:n cirkla målet. Om UAV:ns lägsta hastighet å andra sidan är i samma storleksordning som bilens kan man följa den närmare. För att hantera fallet då bilen kör långsammare än UAV:ns lägstahastighet måste UAV:n slingra för att göra av med överskottsfarten, utan att tvingas göra 360-graderssvängar och hamna långt bakom målet. I figur 4.10 visas ett exempel på hur en UAV kan slingra på detta sätt.



Figur 4.10: Resultande flyg- och bilspår. UAV:n startar vid (50,-170) och bilen vid (70,120), de heldragna strecken visar samtidiga för bil och UAV. Notera hur UAV:n slingrar för att göra av med det försprång som hela tiden skapas av den högre hastigheten.

Hur åstadkommer man då en autonom följning? Den föreslagna lösningen påminner om hur en målsökande missil styr mot sitt mål, men är modifierat för att åstadkomma ett slingrande beteende när målet är nära.

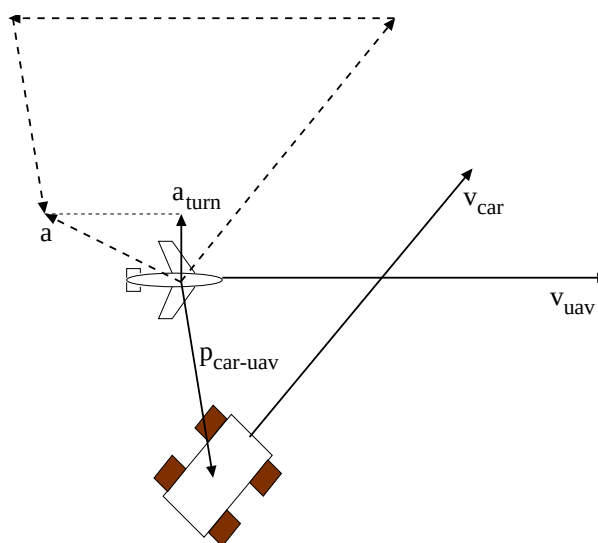
För att effektivt följa ett rörligt mål måste man ta hänsyn till både avstånd mellan UAV och mål, samt skillnaden i hastighet. I figur 4.11 har vi ritat ut både hastigheter,  $v_{\text{uav}}$  och  $v_{\text{car}}$  samt skillnaden i position  $p_{\text{car-uav}} = p_{\text{car}} - p_{\text{uav}}$ .

Hade vi haft en helikopter, med lägsta fart 0 km/h, hade man valt accelerationen enligt

$$a = k_1(p_{\text{car}} - p_{\text{uav}}) + k_2(v_{\text{car}} - v_{\text{uav}}).$$

Detta  $a$  är utritat i figuren, för  $k_1 = k_2 = 1$ . Eftersom vår UAV har en lägsta hastighet större än 0 väljer vi en acceleration,  $a_{\text{turn}}$ , som ligger så nära det önskade,  $a$ , som möjligt, utan att bromsa UAV:n och därmed underskrida UAV:ns lägstahastighet, den sk stallhastigheten.

I den färdiga algoritmen får man välja  $k_1$  och  $k_2$  så att beteendet blir en bra blandning av att styra mot målet och att åka parallellt med det. Sätter vi  $k_1 = 0$  kommer UAV:n flyga i samma riktning som målet, men ignorera om



Figur 4.11: Illustration av styrlagen. Notera hur  $a_{turn}$  gör att UAV:n svänger vänster för att lägga sig ovanför bilen. Hade UAV:n istället styrt mot bilen, dvs höger, hade bilen först passerats i hög hastighet varefter UAV:n behövt vända ett halvt varv och kommit långt efter, och möjligtvis tappat bort bilen.

målet är nära eller långt bort. I andra extremfallet, om  $k_2 = 0$  försöker UAV:n hela tiden styra mot målet, oavsett hastigheter. Detta leder, som beskrivs i bildtexten till figur 4.11, till att UAV:n ibland hamnar långt efter målet efter att ha passerat det i motsatt riktning.

Mer detaljer kring denna algoritm kan man läsa i [22].

### 4.2.3 Begränsningar och alternativa algoritmer

I forskningslitteraturen har vi hittat tre alternativ till den beskrivna algoritmen. I [38] beskrivs en algoritm för att cirkla ett långsamt mål. Genom att rita upp en cirkel av önskad radie runt målet och sedan välja den närmsta av de två flygriktningar som tangerar cirkeln fås cirkelmönster. Denna metod tar dock inte hänsyn till målets hastighet och medför därför att man ibland flyger i motsatt håll och hamnar långt bakom målet. Vidare behandlas inte fallet då man ligger innanför önskad spaningscirkel. I [37] beskrivs ett liknande cirkelförfarande. Här behandlas fallet då man ligger för nära men omloppsriktningen, med- eller moturs, är given från början och beror inte på läget. Artikeln [34], är den enda som tar hänsyn till målets hastighet, och föreslår ett slingrande mönster. Slingrandets amplitud beror emellertid bara av målets hastighet, och inte av om det manövrerar åt något håll. Om målet då tex svänger vänster när UAV:n slingrar åt höger avbryts inte slingrandet, vilket resulterar i ett stort avstånd mellan UAV och mål.

Varken den presenterade algoritmen eller de tre nämnda tar hänsyn till byggnader och lövverk som kan skymma målet. Detta är förstås en viktig begränsning, särskilt i stadsterräng. En algoritm som gör detta måste ha en terrängdatabas, samt kanske en vägdatabas där bilens väg kan förutsägas. Då handlar problemet om att röra UAV:n så att de platser där man tror att bilen skall åka kommer att synas. Ett problem som lite påminner om den spaning längs väg som presenteras i avsnitt 4.3.2.

### 4.3 Förmåga: Detaljerad spaning mot punktmål och över yta

System: Predator, avsnitt C.1.5 och ScanEagle, avsnitt C.4.2.

#### 4.3.1 Framtida scenario

*Rykten cirkulerar om ett planerat bakhåll längs en väg som skall att användas av styrkor ur Nordic Battle Group. En spaningsinsats görs för att finna och närmare studera fordon och objekt längs vägen. En ScanEagle, avsnitt C.4.2, skickas ut. Den är utrustad med en gimbalupphängd sensor som kan riktas in mot olika punkter längs flygbanan oberoende av farkostens orientering. Gimbalupphängningen tillåter att UAV:n svänger över vägen samtidigt som sensorn hämtar in bilder från flera vinklar av samma objekt vilket förbättrar positionsestimeringen.*

#### 4.3.2 Algoritmer för statisk målinmätning

Spaning efter mål längs en väg innebär att samla detaljerad information om upptäckta mål. Spaningsproblemet försvåras av att intressanta områden skymms av vegetation, terräng och byggnader. En algoritm för att samtidigt styra sensor och farkost har studerats av FOI [42]. Arbetet bygger bland annat på en algoritm som gör en modell av informationsmängden i en mätning som ursprungligen publicerades av Grocholsky i [23]. Problemet formuleras sedan som ett optimeringsproblem där mängden information skall maximeras samtidigt som villkor ställs på flygbana, siktvinklar och andra parametrar och variabler som ingår i problemet.

#### Algoritm för optimal rutt för inmätning av målkoordinater

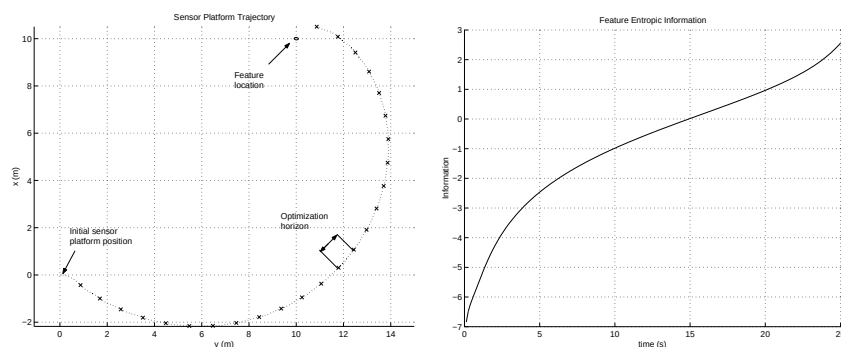
I avsnitt 3.2.3 beskrevs tekniken för mikroplanering. Följande avsnitt kan också ses som en tillämpning av mikroplanering. Det konkreta problemet som skall lösas är att med en riktningsmätande sensor skatta positionen av ett antal punktmål under en flygning i ett område.

Tanken är att man översätter det konkreta måttet, i detta fallet positions-skattningarna, till ett mer abstrakt mått på information, som sedan kan maximeras med en optimeringsrutin. Teknisk sett kan information ses som ett mått på hur väl en stokastisk variabel är känd. Ordet "information" kan i samband med detektion, inmätning, övervakning etc syfta på flera helt olika slags storheter. En betydelse åsyftar själva faktainnehållet från vissa data, som i satsen "det finns ett stridsfordon i vägskalet". En annan betydelse åsyftar storheter som anger hur "statistiskt värdefulla" dessa data är. Till den senare hör främst Shannons information och Fisherinformation. Fisherinformationen är en storhet som beskriver hur tillförlitlig skattningen kan förväntas vara eller hur mycket "information" om parametervärdet en mätning kan förväntas ge.

**Sensormodell och problemformulering** En passiv sensor, som tex en kamera, har bara förmåga att mäta en relativ vinkel till objektet, den har ingen möjlighet att direkt mäta avståndet. Uppgiften att mäta in ett objekts position med en sådan sensor kan formuleras som ett optimeringsproblem där man söker en sekvens av styrorder till sensorplattform och sensorinriktning som maximerar en målfunktion, exempelvis en funktion av objektets informationsmatris, vilket i praktiken innebär att osäkerheten hos objektets position minimeras.

Problemet formuleras nu som ett optimalt styrproblem, där man bestämmer en sekvens av styrsignaler, så att den förväntade informationen, baserat på

de mätningar som har gjorts, vid nästa mätning blir så stor som möjligt. I figur 4.12 syns hur en farkost har planerat sin bana stegvis och vid varje 'x' gjort en ny mätning och en ny optimering så att nästa mätning skall tillföra så mycket information som möjligt, dvs minska osäkerheten om målets position så mycket som möjligt.



Figur 4.12: UAV:ns bana. Varje 'x' markerar en ny optimering, planering.

Tidshorisonten i mikroplaneringen, dvs tiden till nästa mätning och ny planering, kan varieras. Vilken tidshorisont som skall väljas beror på hur komplext problemet är. En lång tidshorisont ger ett svårlöst optimeringsproblem, och när tiden väljs mycket lång kan det inte längre kallas mikroplanering. Olika tidshorisonten kan ge vitt skilda resultat. Till vänster i figur 4.13 visas planeringsresultatet för tre olika planeringshorisonten i det ovan beskrivna inmätningsexemplet och i tabellen 4.1 redovisas antal steg i optimeringsrutinen och styrparametrar. Till höger visas informationsvärdet för objektet i de tre fallen. En kort horisont (1) medför att farkosten inledningsvis färdas i princip vinkelrätt relativt riktningen till objektet. Detta beror på att den passiva sensorn enbart kan mäta vinkeln till objektet. Med en lång horisont går farkosten mer rakt på för att vika av mot slutet. Jämför man informationen ser man att resultatet med den korta horisonten (1) har mest information till en början, men passeras av den mellanlånga horisonten (2) vid  $t \approx 3$ , och av den långa horisonten (3) vid  $t \approx 6$ . Med lång horisont (3) har man alltså råd att inhämta lite information inledningsvis om man vet att man kommer få mycket information på slutet.

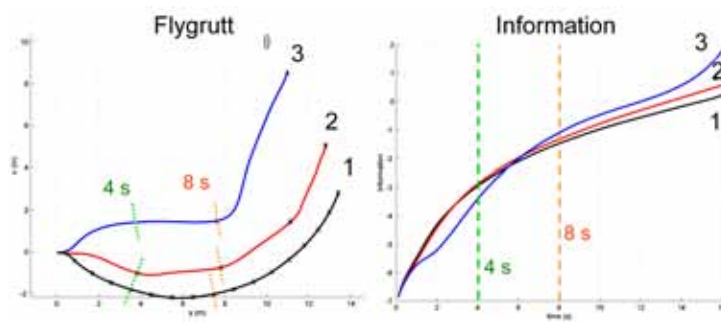
| Fall                            | 1  | 2  | 3  |
|---------------------------------|----|----|----|
| Tidshorisont $t_f$ s            | 1  | 4  | 8  |
| Antal steg i optimeringsrutinen | 16 | 4  | 2  |
| Total tid s                     | 16 | 16 | 16 |
| Styrparametrar $m$              | 2  | 4  | 8  |

Tabell 4.1: Tre fall som illustrerar effekten av hur lång tidshorisont som används i mikroplaneringen.

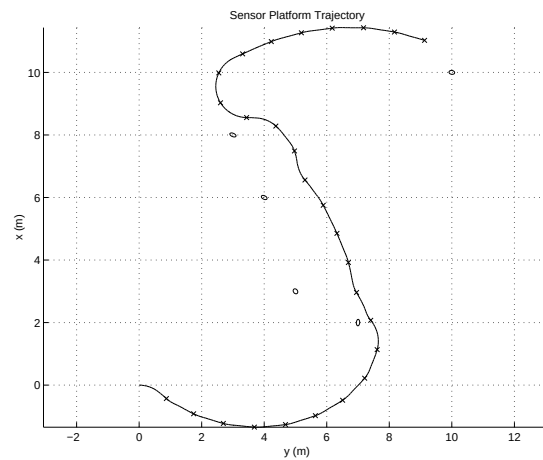
Genom att utöka modellen kan flera mål mätas in. På så sätt kan systemet styra längs en bana som mäter in positionen av flera mål samtidigt som andra villkor, som farkostens manöverbegränsningar, kan uppfyllas i optimeringsstegen. I figur 4.14 ses ett exempel på en sådan bana.

### 4.3.3 Begränsningar och alternativa algoritmer

Den idé som ursprungligen presenteras i arbeten av Manyika, Durrant-Whyte och Grocholsky [23, 36] har stor potential att utvecklas och användas för mer



Figur 4.13: Banor för farkosten för olika tidsteg i optimeringsrutinen, se tabell 4.1, samt informationsökningen.



Figur 4.14: En bana som beräknas under flygning och som ger bästa möjliga inmätning av flera måls positioner.

än den ganska enkla tillämpningen att mäta positioner med en bäringsmätande sensor. Det teoretiska ramverket är beskrivet i kapitel 11 i [42] och därur kan både begränsningar och möjligheter extraheras. Det har trots sin relativa elegans och enkelhet en svaghet i de möjligt beräkningstunga lösningar som är resultatet av angreppssättet som formuleras i kapitel 4 i [42]. En alternativ formulering skulle kunna skapa goda förutsättningar för en effektiv mikroplanering. För att till fullo utnyttja potentialen krävs djup insikt i de matematiska förutsättningarna vilket kräver goda kunskaper i ämnet.





## 5 Slutsatser

I denna rapport har vi sammanställt och beskrivit ett antal autonomialgoritmer som skulle kunna användas i obemannade militära system för spaning och verkan. Urvalet har styrts av ett antal förmågor som bedömts vara relevanta för den svenska försvarsmakten.

Trots att det idag läggs stora summor på autonomiforskning runt om i världen fann vi för vissa delproblem ingen acceptabel lösning i den litteraturstudie som genomfördes och rapporterades i [24]. I flera av dessa fall har vi inom projektet kombinerat och utvecklat algoritmer, se tex [58], [8], och [61].

Många av de beskrivna algoritmerna är tillräckligt bra för att erbjuda en mänsklig operatör en avsevärd avlastning. Som framgår av avsnitten rörande algoritmernas begränsningar finns det emellertid fortfarande utrymme för förbättringar. Tex vore det bra med en version av följningsalgoritmen i avsnitt 4.2 som effektivt hanterar skymmande objekt i form av hus eller vegetation, eller en variant av algoritmen i 4.1.3 som kompletterar den lokala sökningen med någon form av global planering. För dessa båda exempel finns förbättringar inom räckhåll, men i andra fall begränsar fundamentala teoretiska resultat algoritmernas prestanda. Ett exempel på detta är den approximativa algoritmen i avsnitt 2.1, den är just approximativ, eftersom exakta optimala lösningar till sådana problem med säkerhet inte går att producera på rimlig tid.

Eftersom förmågan för ett UAV- eller robotsystem beror av mycket mer än de autonomialgoritmer som finns implementerade inkluderade vi i denna rapport två appendix som beskriver de viktiga delsystem som sensorer och kommunikationsutrustning utgör. Rapporten avslutades sedan med ett tredje appendix innehållande systembeskrivning för ett antal system som redan är operativa, eller skulle kunna bli det i en nära framtid.

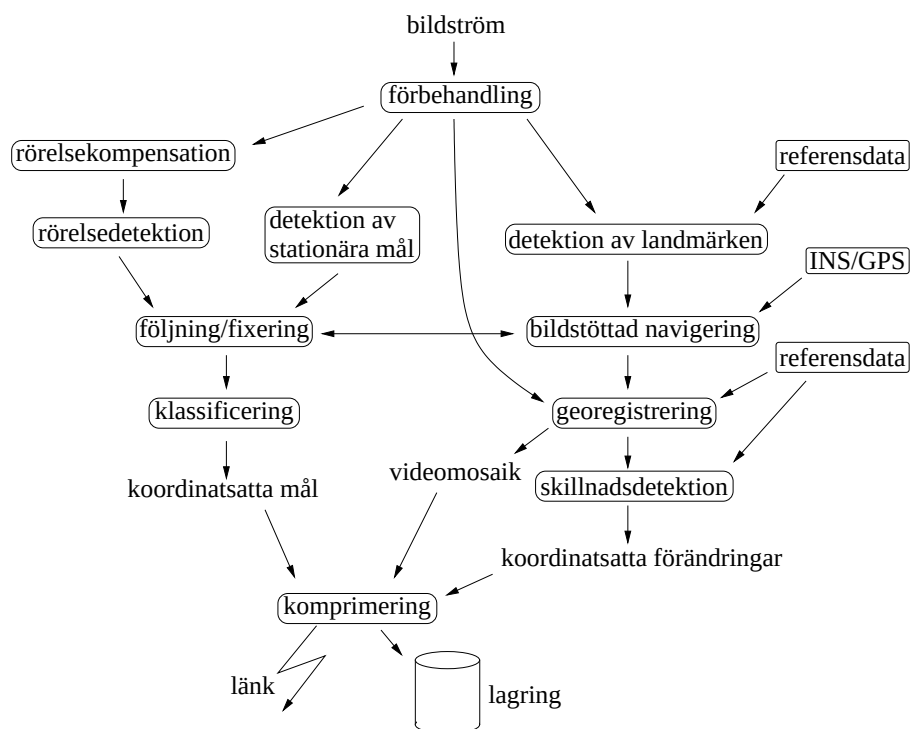
Avslutningsvis hoppas vi att denna sammanställning har gett läsaren en aktuell och tillgänglig bild av vilka hot och möjligheter som autonoma militära system medför.



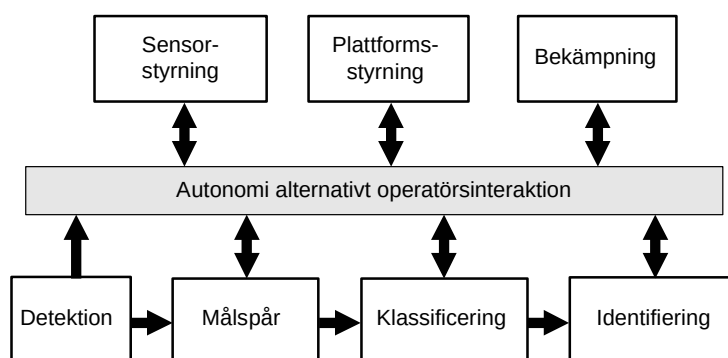
## A Sensordataanalys i autonoma system

Robusta metoder för detektion, association, geolokalisering och olika typer av bildrelaterad återkoppling är alla fundamentala kritiska funktioner för att ett autonomt system skall kunna fatta egna sunda beslut vid interaktion med en icke tillrättalagd omvärld. I figur A.1 visas en schematisk beskrivning av sådana funktioner och relationer dem emellan.

I situationer då autonoma system skall nyttjas för spaning och verkan måste viss typ av automatisk detektion nyttjas. Ju högre grad av autonomi hos systemen, och därmed minskad grad av operatörsmedverkan, desto större krav ställs på den autonoma förmågan att ur sensordata kunna detektera eftersökta objekt på marken även i de fall signal-brusförhållandet mellan objekt och bakgrundsbrus är svagt. I figur A.2 illustreras hur en signalbehandlingskedja för ett autonomt system kan se ut där den klassiska kedjan av förfinad sensordataanalys via förmågorna detektion-klassificering-igenkänning av mål, kompletteras med kapaciteten att påverka datainsamlingen via sensor- och plattformsstyrning. Denna kapacitet kommer i närtid ske via kvalificerad interaktion med operatör, för att på längre sikt kunna ersättas med autonoma metoder.



Figur A.1: Schematisk beskrivning av bildrelaterad signalbehandling i en autonom flygande plattform för spaning, övervakning eller verkan.



Figur A.2: Signalbehandlingskedja för detektion/igenkänning och dess interaktion med styrning av sensorer och plattform. Interaktionen kan ske autonomt eller via en operatör.

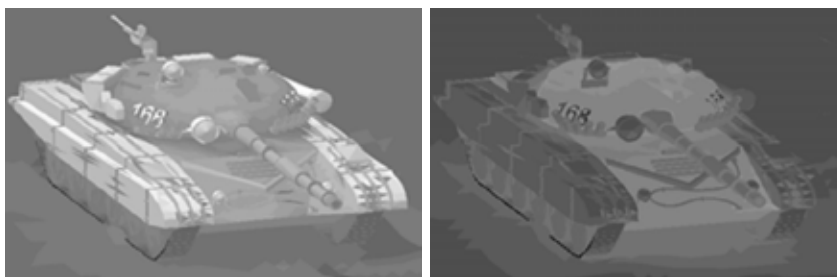
## A.1 Detektion

Datorbaserad detektion kan, åtminstone i vissa fall, på sikt tänkas ersätta människan i spaningssituationer då så stora datamängder ska avsökas att det inte är möjligt att ägna mer än något fåtal sekunder åt varje enskild bild. Datorn kan i sådana situationer hjälpa operatören genom att peka ut områden av potentiellt intresse, vilket sparar arbetstid. Huruvida tidsbesparingen är relevant beror givetvis på hur mycket data som ska bearbetas och hur mycket tid som står till förfogande. En möjlig användning av datorbaserad detektion skulle således kunna vara att ange i vilka bilder (väl synliga) föremål och egenskaper av ett visst slag förekommer, t ex militära fordon, hjulspår, byggnader, vägar eller föremål i rörelse.

Detektionsförmåga är av stor vikt vid värdering av ett systems prestanda. Denna förmåga beror på graden av falsklarm som kan tolereras. Ett system kan exempelvis tillåtas att initialt uppvisa en hög falsklarmfrekvens under förutsättning att denna frekvens kan nedbringas i antingen efterföljande signalbehandling eller i kombination med andra sensorer som uppvisar andra egenskaper. Ett system med hög detektionssannolikhet vid hög falsklarmfrekvens kan exempelvis utnyttjas för invisning av mer avancerad efterprocessning eller invisning av andra högupplösande sensorer som saknar täckningskapacitet. I ett militärt autonomt system kommer detekterade markobjekt exempelvis kunna generera följande responser hos systemet:

- Påverka styrningen av den egna plattformen och dess sensorer (alternativt andra plattformar och deras sensorer) för att i realtid kunna optimera tex. datainsamlingen så att mer högupplöst sensordata erhålls vars kvalitet även medger klassificering och igenkänning.
- Initiera en förfinad analys av de potentiella målens identitet och rörelsemönster via algoritmer för igenkänning och följning.
- Presentera detekterade regioner för en mänsklig operatör som via sin överlägsna lägesuppfattning kan prioritera mål och sälla bort falskmål och eventuella skenmål.

Detektion sker ofta genom att man för varje bildelement i indata beräknar ett antal lokala egenskaper, särdrag. Egenskaperna beror vanligtvis på utseendet hos den lokala omgivningen kring det centrala bildelementet, exempelvis kanter och linjer i olika orienteringar. I detektionssteget bedöms värdena för dessa egenskaper av en klassificerare för att avgöra om bildelementet tillhör



Figur A.3: Simulerade IR-signaturer för en T-72 stridsvagn. Vänster: Eftermiddag en svensk sommardag. Tunna plåtar blir snabbt uppvärmda. Höger: Samma dag, efter solnedgång. De tunna plåtarna har hunnit kallna.

ett mål eller en bakgrund. Klassificeraren utgörs av en matematisk funktion som vanligen optimerats för sin uppgift via träningsdata innehållande mål och bakgrunder. Observera alltså att även detektionssteget innehåller minst en klassificerare, och att denna klassificering sker före klassificeringssteget.

En detektors prestanda kan uttryckas i termer av antalet bearbetade pixlar per sekund, andelen funna mål och andelen falsklarm. Observera att termen detektor här syftar på den matematiska funktion som utvärderar sensordata, inte den fysiska komponent i sensorn som insamlar fotoner. Önskvärt är att uppnå låg falsklarmssannolikhet samtidigt med hög upptäcktssannolikhet. Beroende på applikation prioriteras dessa mot varandra vid designen av detektorn.

På de följande sidorna beskrivs översiktligt fyra alternativa koncept för detektion av markmål:

- Rörelsedetektion – temporal analys. Markfordon i rörelse detekteras genom sin egenrörelse i bildsekvenser (eller konsekutiva bilder över samma region).
- Detektion av stillastående utbredda markmål – spatiell analys. Här beskrivs metoder för att via spatiella (rumsliga) egenskaper ur bilddata detektera markmål. Även detektion av sk ”hotspots” beskrivs.
- Detektion via förändringsanalys – jämförelse med tidigare insamlat referensmaterial.
- Anomalidetektion på multispektrala sensordata.

Men innan vi beskriver dessa i detalj skall vi nämna något om IR-signaturer.

### A.1.1 Signalvariation mål/bakgrund och signaturanpassning

IR-signaturer hos ett markfordon varierar påtagligt som funktion av väder, tidpunkt på dagen, interaktionen med fordonets lokala omgivning och såväl dess aktuella driftstillstånd som dess driftshistorik. I figur A.3 visas signaturvariation beroende på soluppvärmning.

Då utvecklingen av metoder för detektion av utbredda markmål i här refererad verksamhet på FOI mestadels baserats på statistiska metoder är det väsentligt att det finns ett acceptabelt signaturunderlag som beskriver målsignaturens möjliga variation. I huvudsak har arbetet med att utveckla detektionsmetoder under åren 2004–2006 utnyttjat förenklade IR-texturer som draperats på CAD-modeller, eftersom det inte är tänkbart att via uppmätningar i

fältförsök kunna inhämta representativt bildmaterial som innefattar all signalvariation. Det föreligger alltså ett behov av förbättrad, mer realistisk, modellering av fordonssignaturer för att ta fram ett representativt signaturunderlag för bl.a. detektionsutveckling. Samverkan mellan olika kravställare på denna verksamhet är nödvändig.

### A.1.2 Rörelsedetektion

Detektion av objekt i rörelse ur bildsekvenser är idag ett väletablerat område. En översikt av området presenteras i rapporten *The target detection and tracking processing chain: A survey of methods with special reference to EO/IR sequences* [31].

#### 2D-scener

Vid höghöjdsspaning över plan terräng är det lätt att kompensera för den av plattformens rörelse orsakade pixelförflyttningen mellan successiva bilder genom anpassning till en parametriserad modell för en plan yta i rörelse, se exempelvis [12] och [26]. Dessa enklare situationer beskrivs ofta som 2D-scener och uppstår då något av följande är uppfyllt:

- Omvärlden väl kan approximeras med ett plan.
- Avståndet är stort, mer än 1 km, och avbildas med ett smalt synfält, mindre än 5 grader.
- Sensorsystemet enbart roteras eller zoomas mellan bilderna.

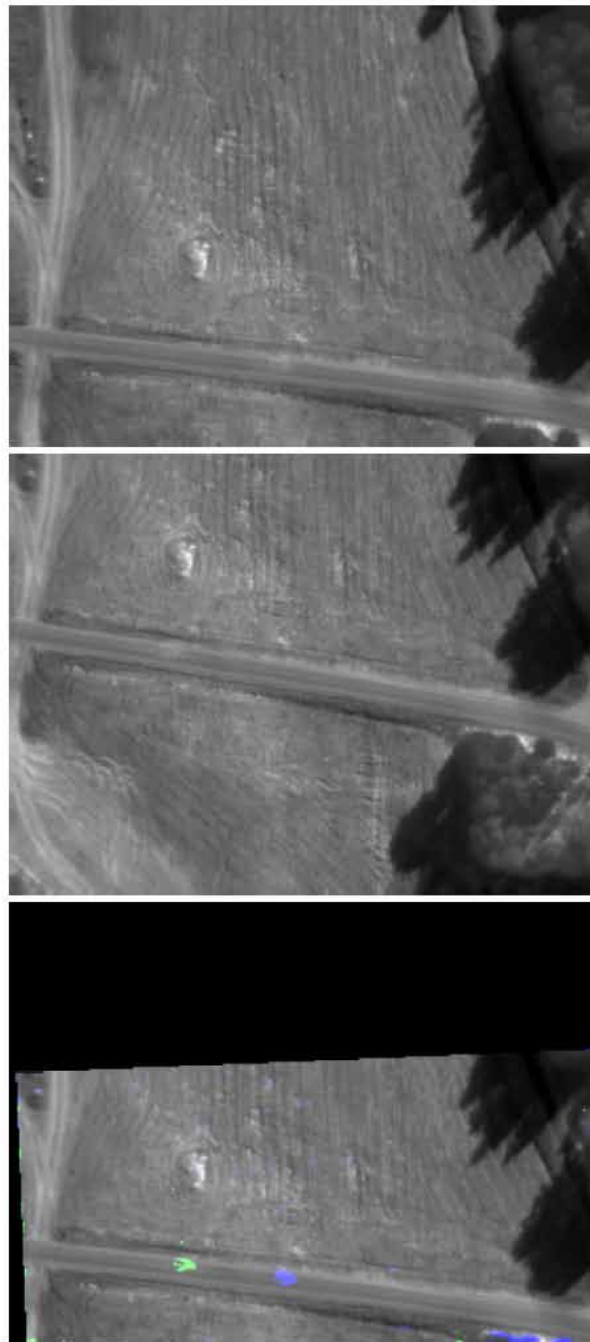
Ofta skattas den parametriserade modellen via hierarkiska metoder, se figur A.5. Ett exempel på detektion i en 2D-scen visas i figur A.4. Väl fungerande metoder för rörelsedetektion i 2D-scener kan effektivt implementeras i standarddatorer idag och kan mycket väl byggas in ombord på obemannade farkoster. Samma metodik kan nyttjas för att generera videomosaik ifrån videosekvenser, se figur A.7.

#### 3D-scener

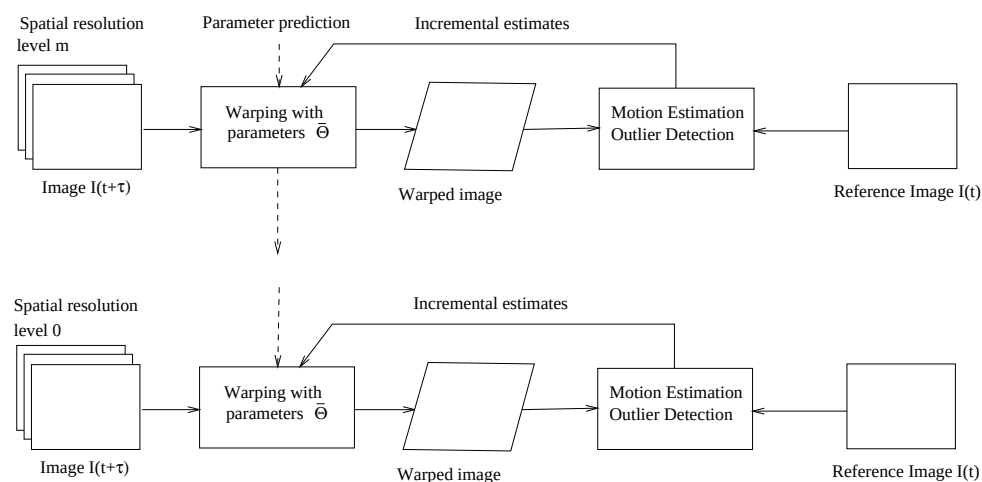
Områden som inte förflyttats konsistent med den skattade parametriska rörelsemodellen har rört sig relativt bakgrunden. Detta illustreras i figur A.6. Vid flygning på låg höjd, i synnerhet i kuperad terräng eller över stadsområden, kan en planrörelsemodell användas för att kompensera för rotation och zoomning, men en lokalt varierande parallaxrörelse orsakad av det varierande djupet i bilden återstår. Detta problem visas i figur A.6. Man kan emellertid visa att samtliga sådana återstående rörelsevektorer (residualvektorer) pekar mot en punkt i bildplanet kallad epipolen, se [26]. När plattformen rör sig parallellt med bildplanet pekar parallaxvektorerna längs plattformens rörelseriktning; vid mer allmän rörelse kan epipolens läge skattas utgående från exempelvis tröghetssensordata. Områden vars rörelsevektorer inte pekar mot epipolen har rört sig relativt bakgrunden. Robusta, väl fungerande metoder för rörelsedetektion i sådana situationer, som brukar benämnas 3D-scener, kan ännu inte återfinnas i litteraturen utan fortsatta forskningsinsatser krävs. Speciellt sensordatafusion med navigationsdata är intressanta ur militär synvinkel.

### A.1.3 Detektion av stationära mål

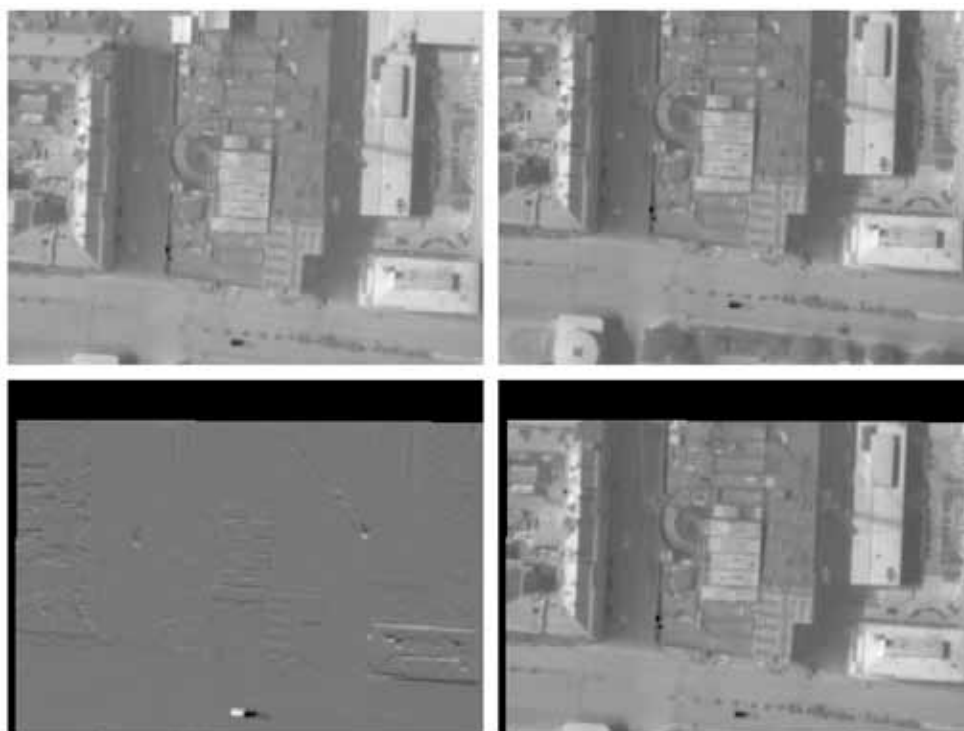
En central funktion i flera obemannade spanings- och verkansystem som studeras är att med en IR-kamera, i realtid, med låg falsklarmssannolikhet och hög detektionssannolikhet, kunna detektera markmål, i synnerhet militära fordon.



Figur A.4: Detektion av rörliga mål vid plan terräng via rörelsekompensering. Överst och i mitten visas två successiva LWIR-bilder med ungefär 65% överlapp. Nederst visas regioner som bör granskas närmare med avseende på rörliga mål. Det rörliga fordonet genererar ett larm för vardera positionen i de två bilderna. Observera att fordonet som sådant inte har en speciellt stark signatur utan kan vara relativt svårt att detektera utan datorstöd.



Figur A.5: En global rörelsekompensation skattas ofta iterativt i ett hierarkiskt ramverk.



Figur A.6: Detektion av rörelse försvåras påtagligt då scenen inte längre kan approximeras via ett markplan. Överst visas två successiva LWIR-bilder med omkring 85% överlapp. Nederst: Till höger visas bild två efter rörelsekompensation mot markplanet. Till vänster visas differensen efter rörelsekompensationen. Det är tydligt att byggnadernas avvikelser från markplanen slår igenom och försvårar analysen. Det rörliga fordonets rörelsevektorer är dock orienterade åt vänster medan de stationära byggnadernas rörelsefält efter rörelsekompensationen pekar mot epipolen som i det här fallet ligger i plattformens rörelseriktning.





Figur A.7: Detektion av små rörliga mål (människor) via rörelsekompensering kan ske samtidigt som systemet genererar en videomosaik av bildsekvensen. Scenen innehåller påtaglig 3D-struktur och en kompletterande databas med geoinfo i kombination med navigationsdata från plattformen har nyttjas för att enbart söka rörliga objekt på marken. Bilddata består av en IR-sekvens över Linköping stad.

Under 2002–2003 gjordes en omfattande litteraturstudie inom detektion av markmål vilket resulterade i att en lovande ansats kunde identifieras. Se referens (Karlholm m fl, 2003, [30]).

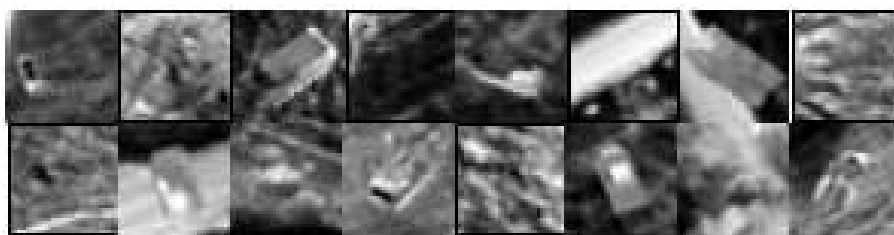
Denna metod har vid FOI IR-system under de senare åren implementerats, vidareutvecklats, och utvärderats mot simulerade testdata; resultaten har avrapporterats i [28] och [29], och i kortare form som ett konferensbidrag [27]. Metoden för detektion av militära fordon i flygspaningsdata gör det möjligt att på en standard-PC bearbeta i storleksordningen 10 megapixel per sekund, och att upptäcka 90% av målen vid 1 falsklarm per sekund. Detta gäller fristående okamouflerade fordon. Exempel på den typ av simulerade träningsdata som använts visas i figur A.8.

Metodiken har framgångsrikt vidareutvecklats i samarbete med svensk industri för att detektera fotgängare vid mörkerkörning.

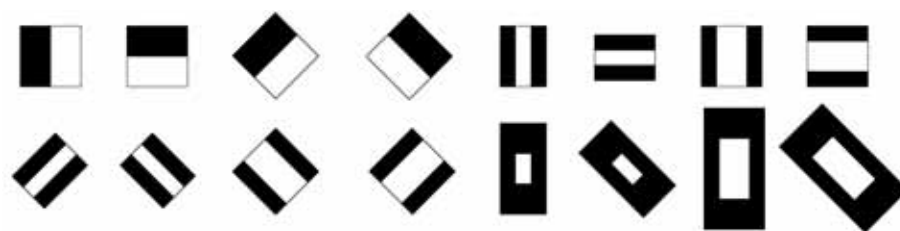
Även om stora framsteg på senare år gjorts inom området snabba kraftfulla detektorer, är det idag inte möjligt att i pankromatiska EO-bilder på rimlig tid och med hög säkerhet automatiskt detektera väl skylda eller kamouflerade objekt. Se avsnitt A.1.5 för anomalidetektion i multispektrala data som adresserar sådana svåra situationer.

### Val av särdrag

En detektionsalgoritm fungerar vanligtvis så att man för varje bildpunkt testat om ett lokalt fönster kring punkten (som i figur A.8) innehåller ett mål. Detektionsalgoritmen genomför testet genom att applicera ett antal operatorer eller filter som känner av lokala strukturer, särdrag, i fönstret. I det aktuella fallet har filter av de typer som visas i figur A.9 använts; dessa är känsliga för kanter och linjer av olika slag, samt punkter vars gråvärde avviker från omgivningen. Detektionsalgoritmen viktat samman filtersvaren, och om värdet överstiger en



Figur A.8: Exempel på mål- och bakgrundsbilder som använts vid träning och testning av detektionsalgoritmen. Dessa har skapats genom att placera texturerade 3D-CAD-modeller i en syntetisk omgivning draperad med en IR-textur.



Figur A.9: Filtrertyper som används av den implementerade detektionsalgoritmen. Genom att variera höjd, bredd och position kan mer än 100.000 olika filter genereras i fönster av storleken 26x26 bildelement.

tröskel beslutas att fönstret innehåller ett mål.

### Effektivisering

Träningen av detektionsalgoritmen går i princip ut på att bestämma vilka filter som ska användas, samt hur filtersvaren ska viktas samman. Nu är emellertid detektion av markmål, på den svåra klottermiljön, ett utomordentligt svårt problem, så för att uppnå acceptabla prestanda med avseende på falsklarms- och detektionssannolikhet krävs ett mycket stort antal filter, flera tusen. Även om svaren från filtren i figur A.9 kan beräknas mycket effektivt, är det omöjligt att i realtid (videotakt) applicera flera tusen filter i varje bildpunkt. En elegant lösning på detta problem är att använda en sekvens av detektorer, så som visas i figur A.10. Först bearbetas bilden med en enkel detektor som har en viss förmåga att förkasta bakgrunder och en hög sannolikhet att acceptera ett verkligt mål. Om en signifikant andel (kanske hälften) av alla bildpunkter på detta sätt kan avfärdas, återstår en mindre del att bearbeta i nästa steg. Man har därför råd att då använda en mer komplex detektor för att ytterligare reducera antalet bakgrundsomgivningar. Sekvensen förlängs sedan på samma sätt tills önskad falsklarmssannolikhet uppnåtts. Med denna metodik kan det antal filter som i snitt måste appliceras i varje bildpunkt reduceras med mer än 90%.

### Hierarkisk detektion

För att ytterligare effektivisera beräkningarna kan man även dela upp varje steg i ett antal detektorer, var och en specialiserad på ett visst vyintervall. I regel har man exempelvis i en kvalificerad UAV en rätt god kunskap om avståndet till och orienteringen av markplanet. Markfordon undviker också i största möjliga mån branta lutningar. Sammantaget medför detta att osäkerheten om elevationsvinkeln mellan markplanet (och därmed fordonet) och spaningsplattformen

Figur A.10: Sekvens av detektorer ökar effektiviteten.

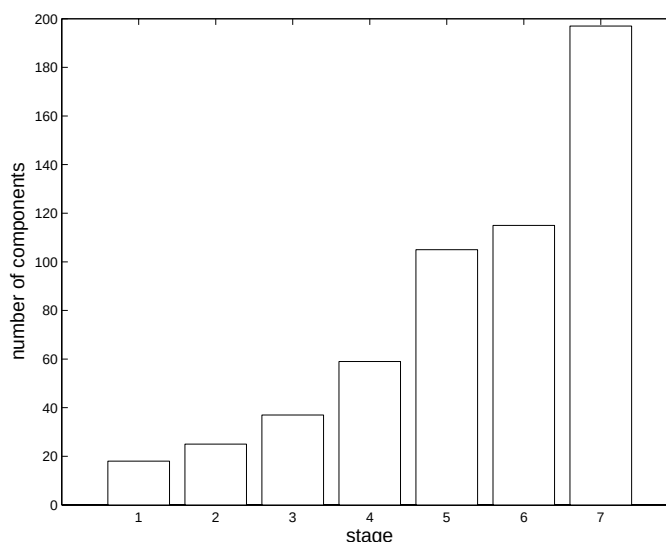
Figur A.11: Hierarki av detektorer. Den sekventiella bearbetningen sker nu uppifrån. För varje steg görs en allt finare uppdelning i vyintervall för att klara det allt svårare diskrimineringsproblemet. Varje modul består i sin tur av en sekvens av detektorer.

Figur A.12: Exempel på träningsdata för en av de nedre modulerna ur detektorhierarkin i figur A.11.

Den aktuella modulen tränades så att varje steg i sekvensen förkastade 75% av de återstående bakgrundsexemplen, och accepterade 99% av fordonsexemplen. I figur A.14 visas hur antalet filter i successiva steg ökar, som följd av att



Figur A.13: De åtta först valda filtren för att särskilja mål orienterade som i figur A.12 från bakgrunder.



Figur A.14: Den diskuterade modulen nederst i figur A.11 består av en sekvens av 7 detektorsteg. Antalet filter som krävs i de olika stegen visas här.

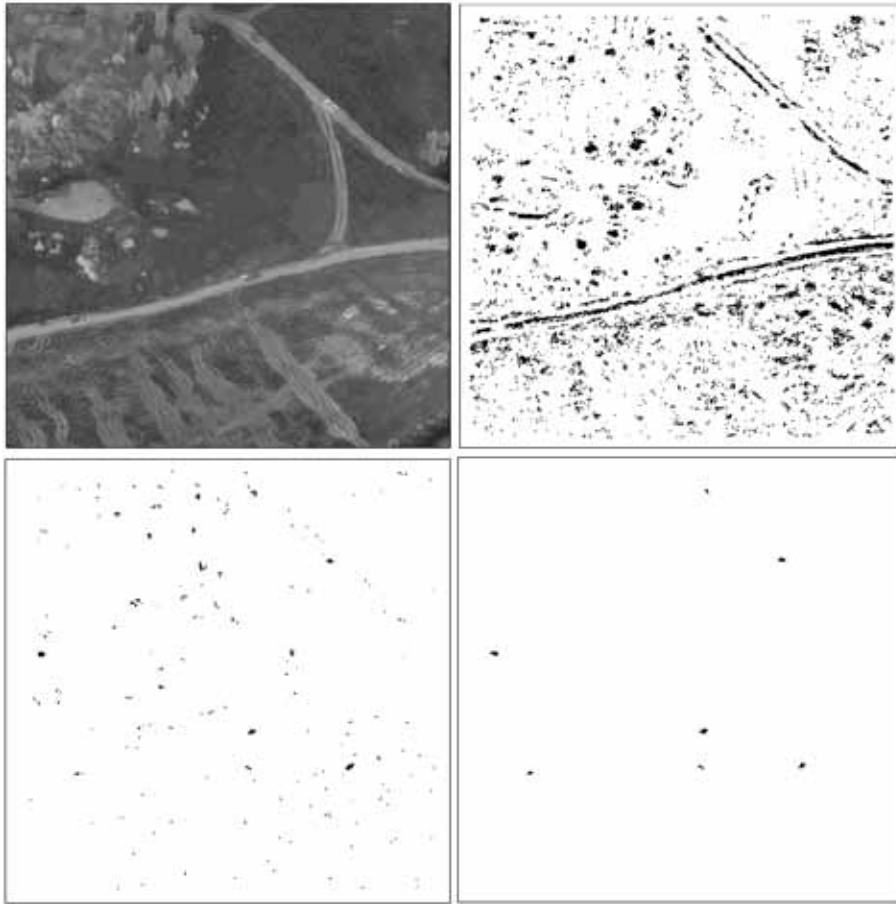
det blir allt svårare att särskilja återstående bakgrunder från målen.

#### Exempel på detektion av utbredda mål

Slutligen visas i figur A.15 ett bearbetningsexempel där detektorhierarkin applicerats på en bild från en simulerad flygning över ett spaningsområde med ett antal fordon utplacerade i terrängen. Notera att indikationerna för mål eller särskilt mållika bakgrundsomgivningar tenderar att bilda ansamlingar, medan det stora flertalet falsklarm består av isolerade indikationer. Detta kan utnyttjas för att efter varje bearbetningssteg ytterligare reducera antalet falsklarm. Falsklarmen tenderar också, till skillnad från sanna mål, att fluktuera mycket beroende på vyriktning, vilket också kan utnyttjas på så sätt att man under datainsamlingen fixerar kameran mot en punkt i terrängen under någon sekund och ackumulerar indikationerna under spaningsplattformens förflyttning. Sammanfattningsvis kan sägas att metoden verkar mycket lovande. Metoden har potential att med smärre justeringar även kunna adressera särskiljning mellan målklasser, dvs klassificering och eventuellt även igenkänning. För att säkerställa att nödvändiga prestandanivåer med avseende på detektion uppnås för verkliga data krävs dock ett bättre målsignaturunderlag. Arbete med att ta fram detta pågår, se avsnitt A.1.1.

#### A.1.4 Förändringsanalys

Rörelsedetektion är i och för sig i strikt mening att betrakta som förändringsanalys, men vi menar här förändringar i scenen som uppkommit mellan två flygningar. Det är svårt att automatisera förändringsanalys eftersom ett föremåls

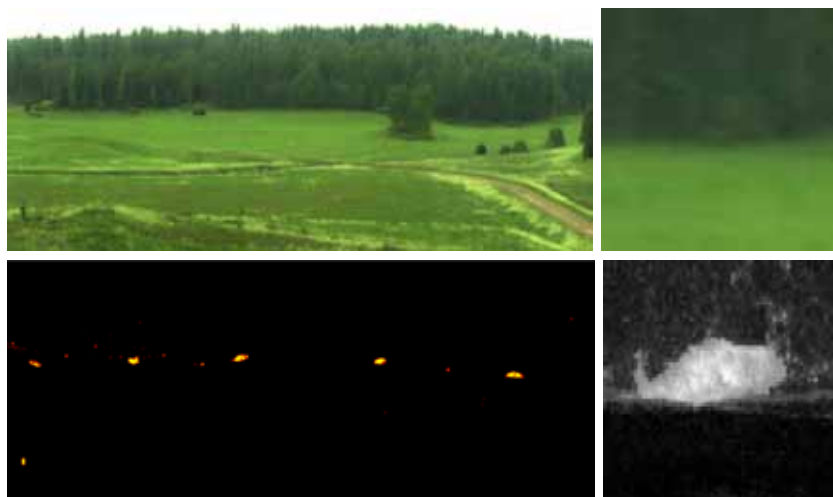


Figur A.15: Indata, samt bearbningsresultat från de tre nivåerna i detektionshierarkin. Observera det minskade antalet falsklarm.

utseende varierar starkt beroende på aspektvy, belysning, väder, etc. Forskningsresultat från de senaste åren har visat att det är möjligt att kompensera för stora delar av dessa naturliga variationer utgående från något totalt korresponderande referensbilder tagna under olika betingelser, se exempelvis [10]. I princip möjliggör detta i ett övervakningsscenario skillnadsdetektion på pixelnivå, givet ett tillräckligt stort referensmaterial och en förmåga att registrera bilderna med hög noggrannhet. Genom att koncentrera analysen på egenskaper som är mer stabila än gråvärden kan emellertid större robusthet uppnås. För naturliga terrängstrukturer är höjdinformation från stereopar den mest intressanta stabila egenskapen, se exempelvis [33]. I spaningsdata från småbruten eller öppen terräng kan även sökning efter nya fordonsspår inkluderas i förändringsanalysen. Spår har egenskaper som framträder relativt tydligt oavsett förändrade yttre omständigheter i spaningsområdet och är svåra att dölja efter tyngre fordon. Vintertid kan dock detta vara starkt väderberoende.

#### A.1.5 Anomalidetektion på multi- och hyperspektrala sensordata

Multi- och hyperspektrala sensorer medger kompletterande detektionsmetoder kontra de övriga detektionsmetoderna beskrivna i detta kapitel. I sådana system återfinns spektral information i varje pixel, i fallet med multispektrala sensorer är antalet våglängdsband mellan två och tio medan det i det hyperspektrala fallet kan röra sig om flera hundra våglängdsband. Detta medger att



Figur A.16: Exempel på hyperspektral anomalidetektion. Den övre vänstra bilden har erhållits ur tre visuella spektralband. I mitten till ovan till höger visas en inzoomning på ett kamouflagenät. Nedan till höger har varje pixel förstärkts enligt anomalieresultatet. Nederst till vänster visas slutligt anomalieresultat för hela bilden.

metoder för pixelvis detektion kan utvecklas, vilket gör att även partiellt skylda objekt kan detekteras. Anomalidetektion är ett viktigt verktyg för att detektera material med spektrala egenskaper som avviker från bakgrunden och som har en liten sannolikhet att förekomma normalt. Vid anomalidetektion skattas en lokal eller global fördelningsfunktion som beskriver bakgrundens spektrala variation i sensordata och när en pixel klassificeras till att inte tillhöra bakgrundsklassen sägs den vara detekterad som en anomali. En anomalidetektor separerar inte olika typer av mål från varandra, men efterbehandling kan ge information om exempelvis klustring av anomaliegenskaper, och därmed tillåta separering i olika klasser av anomalier. Exempel på anomalidetektion ges i figur A.16. Olika spektralt baserade detektionsmetoder finns beskrivna i [5]. Resultat för militära mål beskrivs i [4].

## A.2 Igenkänning

Tillgång till robusta tillförlitliga system för automatiserad måligenkänning (ATR - Automatic Target Recognition) skulle signifikant öka den totala förmågan hos ett autonomt system. Förmågan hos tillgängliga ATR-system bedöms dock som otillräcklig i dagsläget för att klartecken för ett vapenverkan skulle kunna ges utan att en mänsklig operatör engageras. Den största prestandavinsten i dagsläget bedöms vara att tillföra stödfunktioner, t ex målvalsförslag och förändringsanalys.

Det problem som adresseras med den ansats som beskrivits i detta kapitel kring detektion av utbredda markmål handlar om att i bilddata finna samtliga instanser av en klass av objekt, t ex markstridsfordon. Systemet har tränats att detektera exempel ur denna klass och utformas så att det kan generalisera till nya data. Användning av expertmoduler (figur A.11) specialiserade på att detektera en viss delmängd av målklassen (i den beskrivna implementeringen ett vyintervall) gör det möjligt att hantera problemet att det för varje steg i detektorn blir allt svårare att skilja återstående bakgrunder från mål. Utöver vyintervall kan man här även tänka sig uppdelning i måltyper, t ex stridsvagnar, pansarskyttefordon, lastbilar, etc. En allt mer förfinad uppdelning medför

att detektionskedjan gradvis övergår i igenkänning, eftersom information om måltyp och orientering blir allt mer precis. Framtida arbete kommer att utvisa hur framgångsrikt den föreslagna metodiken är.





## B Kommunikationssystem för robot- och UAV-system

Kommunikation i ett UAV-system används främst i tre syften. Det första är att styra det flygande segmentet (UAV:erna). Det andra är att sända sensordata tillbaka till marksegmentet. Det tredje är att UAV:er verkar som en länk mellan två andra noder i ett större kommunikationsnät. Eftersom tvåvägskommunikation behövs finns både en upplänk och en nedlänk. Upplänken används för styrning och uppdaterande av uppdrag, vilket innebär jämförelsevis låga krav på överföringskapacitet, 10 kbps skulle förmodligen räcka i de flesta fall.

Kapacitetskravet på nedlänken beror på vilken typ av sensorinformation som ska överföras, men generellt gäller att nedlänken kräver högre överföringskapacitet än upplänken. Man har sett behov på upp till ca 500 Mbps på nedlänken. Kravet beror bl a på att sensorinformationen ofta skickas i obearbetat skick till marksegmentet, vilket tolkar informationen. Kapacitetskraven skulle minska betydligt ifall sensorinformationen bearbetades samt komprimerades innan den sändes över till marksegmentet.

Det tredje syftet är länkfunktionen, där UAV:n fungerar som en relänod. Detta är en viktig funktion bl a för att utöka kommunikationens räckvidd. Det kan tex vara att överföra information från landsegmentet till en annan UAV som befinner sig utanför den ursprungliga sändarens räckvidd. En annan viktig tillämpning är att använda UAV:n som en upphöjd relänod mellan noder på marknivå som annars har svårt att kommunicera med varandra. Ett typiskt scenario kan vara i en stad, där både byggnader och terräng kan försvåra informationsöverföringen. I en del fall kan det vara bättre att använda andra lösningar som tex satelliter som reläer trafiken. En nackdel med satelliter är dock att kommunikationssystemet kan bli beroende av kommersiella system.

Ett kommunikationssystem som både har en laserlänk samt en radiolösning skulle vara mer robust eftersom teknikerna bygger på helt skilda fysikaliska principer, vilka kan komplettera varandra i de lägen när en av metoderna fungerar sämre. Ur ett framtida perspektiv för UAV:er kan det nya cellulära radio-systemet WiMAX [57], för trådlös infrastruktur, vara intressant att undersöka.

### B.1 Radiokommunikationslösningar

I arbetet med att ta fram en lämplig kommunikationslösning för en viss tillämpning brukar hänsyn tas till olika gränssättande parametrar. Det kan vara nödvändig räckvidd, vilken minskar med frekvensen, eller ett kapacitetsbehov i form av nödvändig datatakt. Om kommunikationen även måste vara störtålig (robust) måste den effektiva datatakten minskas eftersom en del går åt för att rätta eventuellt fel som uppstått i överföringskanalen.

Ett annat område man måste ta hänsyn till är vilka antenner som brukar användas i traditionella radiosystem. Dessa är oftast inte lämpliga att användas på UAV-system. Antenner framtagna för radiolösningar på lägre frekvenser blir för stora att användas på små UAV:er. Lämpligt kan vara en smart-skin-

teknik där antennen både elektriskt samt fysiskt integrerats i UAV:ns skrov [40]. Tekniken är även intressant ur ett kostnadsperspektiv eftersom både sändare och mottagare i vissa system kan integreras. I det här arbetet tas hänsyn till bl a UAV:ns möjliga lastvikt eller vilken mängd sensorinformation som UAV:n ska kunna överföra.

### B.1.1 Ra 180

Följande data är hämtat ur [55]

|                        |                         |
|------------------------|-------------------------|
| Vikt:                  | 10 kg                   |
| Drifttid:              | ca 10 h                 |
| Uteffekt               | 0,025 W    lågläge      |
|                        | 5 W    normalläge       |
| Räckvidd (normalläge): | 8 km    normalantenn ca |
|                        | 4 km    marschantenn ca |
| Bandbredd:             | 25 kHz    per kanal     |
| Datatakt:              | 16 kbps                 |
| Frekvensområde:        | 30–87,975 MHz           |
| Antal kanaler:         | 2320 st.                |
| Kostnad:               | ca 100 kkr              |

Frekvenshoppande radio, designad för att fungera i en telestörd miljö. Ra 180 finns i två versioner, en bärbar och en mobil. Ra 180 kan anslutas till försvarets Telesystem 900 och därifrån även till det civila telenätet. Det går förmodligen inte att använda tillhörande antenner på en UAV och därför måste en annan antenntlösning väljas. Radiolösningen är möjlig att använda för system som inte ska överföra stora datamängder på kort tid, eftersom radio-systemet använder låg datatakt. Ra 180 skulle kunna användas för att länka trafik vidare men inte som inbyggd kommunikationslösning. Om det krävs mycket långa räckvidder kan en satellitlänk användas. Tänkbara alternativ är de långreckviddiga UAV:erna eftersom dessa kan ta radions vikt.

### B.1.2 Link-16

Följande data är hämtade ur [53].

|                 |                               |
|-----------------|-------------------------------|
| Vikt:           | 18 kg                         |
| Uteffekt        | 1 W    låg                    |
|                 | 25 W    medium                |
|                 | 200 W    normal               |
| Frekvensområde: | 969–1206 MHz    51 frekvenser |
| Datatakt:       | ca 0,2 – 2 Mbps               |
| Storlek:        | 32x25x19 cm                   |
| Kostnad:        | ca 1 Mkr                      |

En radiolösning i form av länk-16 kommer att användas vid internationella insatser, förmodligen redan 2008. Kommunikationen är både säker och störtlålig, och systemet kan tillåta 128 samtidiga användare (nät). Länk-16 är ett alternativ för de större UAV:erna eftersom existerande terminaler kräver hög uteffekt och även alstrar mycket värme. På de minsta UAV:erna kan det vara svårt att leda bort värmen, speciellt om de inte skall flyga på hög höjd där temperaturen är låg. Antenntekniken som används av systemet har förbättrats och rundstrålande antenn med förstärkning på 7 dBi har tagits fram. Är ett

möjligt alternativ för de långräckviddiga systemen (se Ra 180), men inte ett kostnadseffektivt alternativ, speciellt inte om UAV:n tillsammans med kommunikationsutrustning förstörs under uppdraget.

### B.1.3 GTRS, Gemensam taktiskt radiosystem

Följande data är hämtade ur [54].

|                 |             |
|-----------------|-------------|
| Vikt:           | 2 kg        |
| Frekvensområde: | 30–2000 MHz |
| Antal kanaler:  | 2–8 st      |
| Kostnad:        | ca 100 kkr  |

GTRS är en standardiserad mjukvaruradio i vilken ny och gammal radio ska kunna laddas in i form av mjukvara s.k. mjukvaruvågformer. Mjukvaruradion befinner sig ännu i ett utvecklingsskede och finns ännu inte i bruk. I mjukvaruradion blir det möjligt att ladda in radiovågformen för tex Ra 180 eller länk-16. Härigenom blir det möjligt att i samma hårdvaruplattform få olika kommunikationslösningar, där vilken beror på det tillfälliga behovet. Givetvis är hårdvaran gränssättande för vilka radiovågformer som kan användas. Några av radions fördelar är att den är flexibel och lättare kan samgrupperas med andra radiolösningar. En GTRS-lösning kommer att vara ett möjligt alternativ för alla UAV:er utom de allra minsta.

## B.2 Laserlänkslösningar

Följande data är hämtade ur [39].

|            |                               |
|------------|-------------------------------|
| Vikt:      | < 100 g                       |
| Effekt:    | 100 mW                        |
| Räckvidd:  | ca 10 km (200m vid tät dimma) |
| Bandbredd: | ca 10 Mbps (visat i försök)   |

En optisk laserlänk av typen retrokommunikation har både fördelar och nackdelar. En fördel är att det går att konstruera små kompakta system med låg vikt samt det mycket låga effektbehovet. Teknikens väderkänslighet samt kravet på fri sikt försämrar dock kraftigt möjliga räckvidder. Tekniken har goda smygegenskaper och är även svår att störa. En retrokommunikationslösning passar bra för små lätta UAV:er och skulle med fördel kunna integreras i UAV:ns befintliga laser- och EO-system. En nackdel med tekniken idag är att det är svårt att styra, rikta och följa mottagaren med lasern.

Detta avslutar kapitlet om kommunikationslösningar.



## C Spelkort: Autonoma Sensor- och Vapensystem

I detta kapitel beskrivs system lämpliga för samverkande autonom spaning och verkan. Materialet är till stora delar hämtat från [48], [49] och [56]. Systemen är uppdelade i följande grupper:

- Spanings-UAV:er med verkansmöjlighet: Killer Bee, Predator, Hunter, Sperwer och FireScout.
- Attackrobotar med spaningskapacitet: Locaas, Netfires (Lam och Pam), och Taifun.
- Styrda vapen som skulle kunna målinvisas av en UAV: Hellfire, Viper Strike, Excalibur, SRAW, Laserbomb och GPS-Bomb.
- Spanings-UAV:er: Skylark, ScanEagle, Skeldar och Global Hawk.
- Långräckviddiga attack-UAV:er och robotar: x-45, x-47, Neuron, Tomahawk och Rbs15.

Grundläggande data för systemen presenteras i tabell C, och de följande sidorna innehåller korta systembeskrivningar och i vissa fall illustrationer.

### C.1 Spanings-UAV:er med verkansmöjlighet

För att öka förmågan att bekämpa tidskritiska mål har ett antal UAV:er som från början var tänkta som rena spaningsplattformar utrustats med verkansdelar. Nedan beskrivs ett antal sådana system.

#### C.1.1 Killer Bee

Killer Bee tillverkas av Northrop Grumman, och är en liten Blended wing-body-UAV. Den finns i tre olika storlekar KB-2, KB-3 och KB-X, med spännvidder på 2 m, respektive 2,8 m och 5,3 m. Designen ger flera fördelar, förutom aerodynamiska prestanda och smygegenskaper möjliggör den att flygkroppen sätts samman av endast tre olika delar. Detta leder i sin tur till lägre produktionskostnader, och enligt Northrop Grumman kan UAV:n serietillverkas till mindre än en 20-del av priset för en taktiskt medelhöjds UAV (t ex Predator). Designen är också robust, vilket möjliggör att UAV:n kan släppas från snabbt flygande större flygplan. Versionen KB-2 är liten nog att transporteras på en HumVee och KB-3 är stor nog att ta t ex två Bonus-stridsdelar, se avsnitt C.3.4, i lasten. Förmågan att både starta och landa utan flygfält har demonstrerats.

| Ref. Data           | Spännv.:<br>(m) | Max vikt:<br>(kg) | Last:<br>(kg) | Hast.:<br>(km/h) | Flygtid/räckv.:<br>(tim. el. km) | Maxhöjd:<br>(km) |
|---------------------|-----------------|-------------------|---------------|------------------|----------------------------------|------------------|
| [56] Skylark        | 2,1             | 6                 | –             | 32–64            | 5–10 h                           | –                |
| [48] ScanEagle      | –               | 18                | 6             | 93               | 15 h+                            | 4,9              |
| [52] Killer Bee-2   | 2,0             | 20                | 3–7           | 100–201          | 12–24 h                          | 5,5              |
| [52] Killer Bee-3   | 2,8             | 39                | 7–14          | 100–193          | 12–24 h                          | 5,9              |
| [48] Locaas         | –               | 41                | –             | 370              | 0,5 h/ 180 km                    | –                |
| [45] Hellfire       | 0,33            | 45                | –             | –                | 9 km                             | –                |
| [48] Lam            | –               | 54                | –             | –                | 30 min                           | –                |
| [48] Skeldar        | –               | 150               | –             | –                | 4–5 h/ 100 km                    | –                |
| [56] Taifun         | 2,25            | 160               | –             | 153              | 4 h+                             | 4,0              |
| [52] Killer Bee-X   | 5,3             | 163               | 27–54         | 100–195          | 12–24 h                          | 6,1              |
| [56] Sperwer/Ugglan | 4,3             | 299               | –             | 209              | 6 h                              | 5,2              |
| [56] Sperwer EC/LE  | 6,4             | 349               | –             | 153              | 12 h                             | 6,1              |
| [45] Rbs15          | 1,4             | 619               | –             | –                | 110 km+                          | –                |
| [56] Hunter         | 8,8             | 726               | –             | 204              | 12 h                             | 4,6              |
| [56] Hunter E       | 15,2            | 953               | –             | 196              | 25 h                             | 6,1              |
| [56] Predator       | 14,9            | 1021              | –             | 225              | 40 h+                            | 7,6              |
| [56] FireScout      | 8,5             | 1429              | –             | 232              | 8 h                              | 6,1              |
| [45, 49] Tomahawk   | 2,7             | 1588              | –             | 880              | 1800 km+                         | –                |
| [56] Predator B     | 20,1            | 4763              | –             | 354              | 28 h+                            | 15,2             |
| [47, 44] x-45 C     | 15              | 5529              | 2040          | M 0,85           | 2200 km+                         | 12+              |
| [52] x-47 B         | –               | –                 | 2040          | –                | 2700 km+                         | 9+               |
| [56] Global Hawk    | 35,3            | 11612             | –             | 731              | 42 h                             | 20               |
| [48] Excalibur      | –               | –                 | –             | –                | 40 km                            | –                |
| [49] SRAW           | –               | –                 | –             | –                | 0,5 km                           | –                |

Tabell C.1: Systemen sorterade efter maximal startvikt.

| Data från [52] | KB-2    | KB-3    | KB-X     |
|----------------|---------|---------|----------|
| Spännvidd:     | 2 m     | 2,8 m   | 5,3 m    |
| Flyghöjd max   | 5,5 km  | 5,9 km  | 6,1 km   |
| Max startvikt  | 20 kg   | 39 kg   | 163 kg   |
| Last:          | 3-7 kg  | 7-14 kg | 27-54 kg |
| Operationstid: | 12–24 h | 12-24 h | 12-24 h  |



Figur C.1: En Killer Bee UAV. Med tillstånd av Northrop Grumman Inc.



Figur C.2: Katapultstart av en Killer Bee KB-3. Med tillstånd av Northrop Grumman Inc.

### C.1.2 Hunter, MQ-5B

Hunter, [48], är ett korträckviddigt taktiskt UAV-system tillverkat av Northrop Grumman. Huntersystem har flugit över 32000 timmar, varav 13000 i strid över Irak och Balkan. 2003 var Hunter den första UAV att utrustas med verkansdelar, en tidig version av Viper Strike, se avsnitt C.3.2. Operationstiden med två Viper Strike är upp till 16 timmar.

|                             |          |
|-----------------------------|----------|
| Data för Hunter E från [56] |          |
| Spännvidd:                  | 16,5 m   |
| Flyghöjd max                | 6,1 km   |
| Max startvikt               | 950 kg   |
| Flyghöjd max                | 7.600 m  |
| Max startvikt               | 1.000 kg |
| Operationstid:              | 40 h     |



Figur C.3: En Hunter UAV. Med tillstånd av Northrop Grumman.

### C.1.3 FireScout

FireScout är en stor UAV-helikopter med 8 mspännvidd som är utvecklad av Northrop Grumman för amerikanska flottan och flygvapnet. Förutom spaning

kan den även genomföra målinvisning och själv verka mot mål genom tex "Viper strike"-ammunition, se avsnitt C.3.2.



Figur C.4: En FireScout UAV. Med tillstånd av Northrop Grumman Inc.

#### C.1.4 Sperwer

Sperwer, [48], är ett fransktillverkat taktiskt UAV system, som i Sverige går under betäckningen Ugglan. Den senaste versionen kan ta en yttre vapenlast på max två gånger 30 kg under vingarna. Tänka vapen är antingen AT-roboten Spike LR eller smart ammunition av Bonus-typ, avsnitt C.3.4.

|                                |        |
|--------------------------------|--------|
| Data (version EC-LE) från [56] |        |
| Spännvidd:                     | 6,4 m  |
| Flyghöjd max                   | 6,1 km |
| Max startvikt                  | 350 kg |
| Operationstid:                 | 12 h   |

#### C.1.5 Predator och Predator B

Predator är en medelhöjds-UAV, med mycket lång operationstid, tillverkad av General Atomics. Första versionen kallades MQ-1 och kunde ta en vapenlast i form av två Hellfire-robotar, se figur C.5.



Figur C.5: En Predator UAV.

Följande version, MQ-9, även kallad Predator B eller Reaper är avsevärt mycket större och snabbare, detta till priset av kortare operationstid. Predator B kan bära upp till 14 Hellfire-robotar, eller ett par laserstyrda bomber, [48].



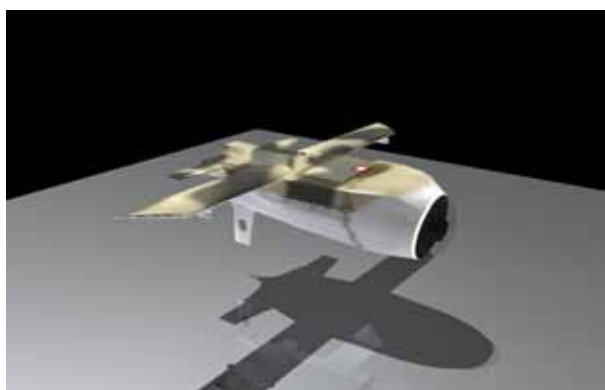
| Data från [56] | MQ-1     | MQ-9 (B) |
|----------------|----------|----------|
| Spännvidd:     | 15 m     | 20 m     |
| Flyghöjd max   | 7,6 km   | 15,2 km  |
| Max startvikt  | 1020 kg  | 4760 kg  |
| Operationstid: | 40 h     | 28 h     |
| Hastighet:     | 225 km/h | 350 km/h |

## C.2 Attackrobot med spaningskapacitet

Här tar vi upp tre typer av spanande attackrobotar LOCAAS, Netfires och Taifun.

### C.2.1 LOCAAS (Low Cost Autonomous Attack System)

LOCAAS är en flygande subrobot avsedd för (semi-) autonom bekämpning av i terrängen rörliga eller flyttbara mål, [6]. LOCAAS planeras att ingå som en transportförpackad substridsdel i ett flertal olika bärrobotar och andra stridsdelsbärare. LOCAAS, se figur C.6, är en ca 80 cm lång turbojetmotordriven, GPS-navigerande attackrobot/substridsdel med utfällbara vingar och styrytor, som med hjälp av en 3D-mätande laserradar, från ca 200 m flyghöjd, under 30 minuter kan avspana en yta motsvarande ca 80 km<sup>2</sup>. 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 avståndsverkande multifunktionsstridsdel. Utgående från observerad måltyp väljer målsökaralgoritmen anfallsprofil och initieringsstillfälle för den projektilbildande stridsdelen som har tre valbara verkansmoder, KEPil (long rod), RSV-4 (aerostable slug) alternativt splitterdusch med ca 30° spridningsvinkel.



Figur C.6: En LOCAAS-robot.

|                |               |
|----------------|---------------|
| Data från [48] |               |
| Hastighet:     | 370 km/h      |
| Max startvikt  | 41 kg         |
| Operationstid: | 0,5 h/ 180 km |

### C.2.2 Eldunderstödssystemet Netfires

NETFIRES, [48], är ett 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, tex en MARKUS-soldat, som har utrustats med en för ändamålet lämplig sambandsutrustning, kan efter att ha tilldelats ett användarnamn och lösenord utnyttja ett eller flera i stridsområdet grupperade NETFIRES-system. För de båda i systemet ingående robottyperna, LAM (Loitering Attack Missile) och PAM (Precision Attack Missile), kan dubbelriktat samband upprättas mellan operatör och robot, 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 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. Vapensystemet samutvecklas av Lockheed-Martin och Raytheon.

|                         |       |
|-------------------------|-------|
| Data för LAM, från [48] |       |
| Max startvikt           | 54 kg |
| Operationstid:          | 0,5 h |

### C.2.3 Taifun

Taifun, [48], är en spanings- och attack-UAV tillverkad av tyska Rheinmetall. Den är tänkt att söka och slå mot rörliga mål i valda sökområden eller längs utpekade vägar.

|                |          |
|----------------|----------|
| Data från [56] |          |
| Spännvidd:     | 2,25 m   |
| Flyghöjd max   | 4 km     |
| Max startvikt  | 160 kg   |
| Operationstid: | 4 h+     |
| Hastighet:     | 153 km/h |

## C.3 Styrda standardvapen som kan målinvisas av UAV

I detta stycke beskriver vi ett antal vapen som i kombination med en målinvisande UAV kan utgöra ett autonomt vapensystem.

### C.3.1 Laserbomb, GPS-bomb och Hellfire-robotar

Att genom laserutpekning eller skickade måldata från en UAV visa in en styrd bomb eller en markmålsrobot utvärderas för närvarande i minst två amerikanska projekt. I teknologidemonstratorn "Hunter Standoff Killer Team", [50], som pågått sedan 2002, skall en styrd bomb, se figur C.7, fälld av ett bemannat attackflygplan på hög höjd styras in av en Hunter UAV. Ett annat projekt, kallat AMUST [46] (Airborne Manned/Unmanned system Technology), syftar till att förlänga attackhelikopters effektiva vapenräckvidd, genom att använda sensorerna på en framskjuten UAV till målidentifiering och sedan verka mot målet med Hellfire robotar, se figur C.8, från en attackhelikopter.



Figur C.7: GBU-12, Paveway, en laserstyrd bomb.



Figur C.8: En Hellfire-robot monterad under en Predator.

### C.3.2 Viper Strike

Viper strike är en sorts styrd glidbomb och ser ut som en liten missil med mycket stora vingar. Den är utrustad med GPS-navigering och semi-aktiv lasermålsökare och kan slå mot både hårda och mjuka mål. Vingarna gör att den kan flyga sista biten mot målet aningen i en väldigt brant eller flack bana. Branta banor lämpar sig väl för mål i närheten av högre hus i urban terräng. Om lasermålsökaren används krävs en man-in-the-loop, som belyser målet med laser. Belysningen kan ske aningen från marken, eller från UAV:n via fjärrstyrning. Stridsdelen är mindre än Hellfire, bara 4 kg. Viper Strike är också utrustad med en "self-destruct"-funktion, för att undvika att odetonerad ammunition blir liggande på stridsfältet. Ammunitionen har fällts från både Hunter- och Predator-UAV:er, samt C-130 flygplan.

### C.3.3 Artillerigranat Excalibur

Excalibur, [48], är en styrd 155 mm granat med förbättrad räckvidd och precision. Enligt uppgift har räckvidden ökat med 30% upp till 40 km och precision ned till 20 m, att jämföras med ca 370 m för en ostyrd granat. Styrningen mot en given koordinat sker med hjälp av integrerade GPS- och IMU-sensorer. En tänkbar utveckling av systemet är att möjliggöra överföring och uppdatering av målläge efter avfyring. Granaten skulle då kunna styras mot ett rörligt mål.

### C.3.4 Hårdmålsammunition Bonus, Strix och Skeet

Bonus är en artillerigranat med målsökare som under fallet mot marken roterar och därmed söker av ett spiralformat spår på marken. Om ett mål upptäcks i detta spår avfyras en riktad sprängverkansladdning mot detta.

|                               |                                                  |
|-------------------------------|--------------------------------------------------|
| Data Bonus, från [6] och [51] |                                                  |
| Vikt:                         | 6,5 kg                                           |
| Diameter:                     | 138 mm                                           |
| Längd:                        | 140 mm (OBS! Bildanalysvärde).                   |
| Sensor:                       | En flerfärg, passiv IR-sensor<br>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               |
| Avsökningssområde:            | 32.000 m <sup>2</sup>                            |

En tänkbar vidareutveckling är att målsökaren även kan reagera på en laserutpekning vilket möjliggör styrning från en UAV. Två ytterligare varianter på styrd ammunition presenteras nedan. Strix, [48], är en taksående granatkastammunition med IR-målsökare och räckvidd upp till 7 km. Skeet, [48], är en bonus-liknande substridsdel som väger 4 kg och är 13 cm i diameter. Liksom Bonus roterar den i sin bana och avfyrar en RSV-laddning mot mål som upptäcks av IR-sensorn längs den spiralformade sökbanan. Förutom RSV har den även splitterverkan mot mjukare mål. Fyra stycken Skeet-stridsdelar ingår i en stridsdel med namnet BLU-108.

### C.3.5 SRAW Short Range Assault Weapon

Behovet av ett styrt precisionsvapen som kan användas av en insatsstyrka i urban miljö har identifierats av bl a US Marine Corps. Detta ledde under år 2005 till initieringen av utvecklingen av SRAW-MPV (Short-Range Assault Weapon-Multiple Purpose Variant, [49]). Vapnet är baserat på ett korträckviddigt, upp till 500 m, missilvapen med utbytbar stridsspets för bekämpning av olika typer av mål, såsom byggnader, bunkrar och lätta bepansrade fordon, och är tänkt att kunna bäras och avfyras av en enskild infanterisoldat. Systemet har GPS- och INS-sensorer och har därför potentialen att ges äkta "through the window"-precision vilket, om vapnet också ges tillräcklig manöverbarhet, ger möjlighet till bekämpning av mål utan krav på fri sikt från skytt, genom utnyttjande av krökta banor. Därigenom kan även bättre skydd för skytt uppnås, och fördelarna med separationen mellan skytt och inmätning utnyttjas. Denna inmätning kan ske från marken såväl som från luften. SRAW liknar Saabs MBT LAW, (Light Anti-Tank Weapon).

### C.3.6 Kanon på stridsvagn och stridsfordon

Förmågan att avge indirekt eld med huvudbeväpningen på stridsvagnar och stridsfordon med hjälp av inmätning från tex en flygande plattform skulle markant öka den effektiva räckvidden för dessa system.

## C.4 Spanings-UAV:er

Nedan beskrivs fyra spaningsUAV:er. En liten, Skylark, med flygtid upp till 1,5 timmar, en lite större, ScanEagle med flygtid upp till 15 timmar, en ännu större av helikoptertyp, Skeldar, med flygtid på 4–5 timmar, samt slutligen en extrem höghöjds-UAV, Global Hawk, med flygtid på upp till 42 timmar.

### C.4.1 Skylark

Skylark, [35], är ett bärbart mini-UAV system som skall lösa spaningsuppgifter i närområdet, tex för att ta reda på vad som finns bakom nästa kulle. Ett testsystem beställdes av FMV i april 2004.

|                                |           |
|--------------------------------|-----------|
| Data från [35]                 |           |
| Spännvidd                      | 2,4 m     |
| Flyghöjd max                   | 5,000 m   |
| Flyghöjd operativ              | 100–200 m |
| Systemvikt (inkl. markstation) | 35 kg     |
| Operationstid:                 | 90 min    |

### C.4.2 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, se figur C.10, och tas hem med hjälp av ett system med en hängande kabel, se figur C.11.



Figur C.9: En Scan Eagle UAV. Med tillstånd av Insitu, Inc. och the Boeing Company

ScanEagle har en cirkulärkropp med bakåtsvepta rektangulära vingar och skjutande propeller. Den 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 väger 37 kg. Motorn är placerad längst bak i flygkroppen med bränsletank och



Figur C.10: Katapultstart av Scan Eagle. Med tillstånd av Insitu, Inc. och the Boeing Company



Figur C.11: Återfångst av Scan Eagle. Med tillstånd av Insitu, Inc. och the Boeing Company

hjälpssystem monterade direkt framför. Det ger en kompakt och koncentrerad framdrivningsenhet. Framför framdrivningsenheten har man samlat all avionik vilket lämnar nospartiet fritt för spaningsutrustning. UAV:n landar inte i vanlig mening, utan använder något som kallas SkyHook Retrieval System, se figur C.11. Det innebär att en mast med ett hängande rep reses från t ex en släpvagn. UAV flygs sedan mot repet så att det träffar vingens framkant. Repet glider därefter längs framkanten till vingspetsen där en krok grabbar tag i repet och UAV:n blir hängande.

|                             |        |
|-----------------------------|--------|
| Data från [6]               |        |
| 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:                 | 25 m/s |
| Maxfart:                    | 36 m/s |
| Flygtid:                    | 15 h   |
| Max flyghöjd:               | 5000 m |

### C.4.3 Skeldar

Skeldar, [48], är en helikopter-UAV som nyligen presenterades av Saab aerodynamics. Den beräknas vara operativ under 2007.

|                |        |
|----------------|--------|
| Data från [48] |        |
| Max startvikt  | 150 kg |
| Operationstid: | 4–5 h  |
|                | 100 km |

### C.4.4 Global Hawk

Global Hawk, [52], är en extrem höghöjds-UAV. Under "Operation Iraqi Freedom" flög Global Hawk 15 uppdrag. Trots att den därmed endast utförde 3% av flygfotouppdragen under kriget, stod den för mer än 55% av den tidskritiska data rörande luftvärnsmål som samlades in. Under dessa uppdrag upptäckte UAV:n minst 13 LV-batterier, 50 LV-avfyrningsramper, 300 missilcontainrar och 70 LV-transportfordon. Den tog vidare bilder av minst 300 stridsvagnar, vilket motsvarar 38% av Iraks tillgängliga resurser. UAV:n styrdes av markpersonal både i mellanöstern och i Kalifornien. För att underlätta dessa uppdrag skapades "Internet-style chat rooms" för att personal på olika orter effektivt skulle kunna samarbeta och styra UAV:n.

## C.5 Långräckviddiga vapen: UCAV och kryssningrobotar

I detta stycke skall vi kort beskriva UAV:er och robotar avsedda att slå mot välförsvarade mål på lite större avstånd, t ex de amerikanska prototyp-UAV:erna x-45 och x-47, den Europeiska Neuron, och robotar som Tomahawk och svenska Rb15.

### C.5.1 UCAV (Unmanned Combat Air Vehicle): X-45, X-47 och Neuron

I projektet J-UCAS pågår utvecklingen av två UCAV (Unmanned Combat Aerial Vehicle) prototyper, Boeings X-45 och Northrop Grummans och Lockheeds X-47. Det europeiska Neuron-projektet syftar till att ta fram en nedskalad UCAV-prototyp. Denna typ av UAV:er är tänkta att främst genomföra farliga attackuppdrag och SEAD-uppdrag (Suppression of Enemy Air Defence).



Figur C.12: En Global Hawk UAV. Med tillstånd av Northrop Grumman Inc.

|                           |           |
|---------------------------|-----------|
| Data för x-45C, från [49] |           |
| Spännvidd:                | 15 m      |
| Längd:                    | 11,9 m    |
| Höjd:                     | 1,2 m     |
| Nyttolast:                | 2.040 kg  |
| Hastighet:                | Mach 0,85 |
| Maxhöjd:                  | 12.200 m  |
| Räckvidd:                 | 2.400 km  |



Figur C.13: En x47 UAV. Med tillstånd av Northrop Grumman Inc.

### C.5.2 Saab Rbs 15

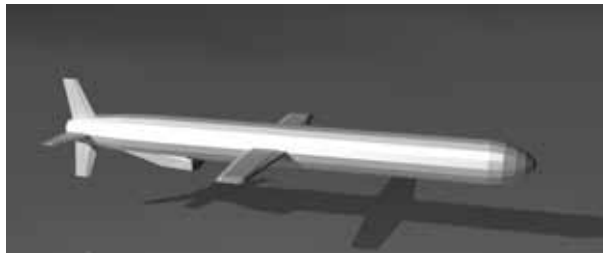
Rbs 15 är en svensk sjömålsrobot som tillverkas av Saab Bofors Dynamics.



|                |                                |
|----------------|--------------------------------|
| Data från [49] |                                |
| Motor          | Turbojet                       |
| Startvikt:     | 630 kg                         |
| Längd:         | 4,33 m                         |
| Diameter       | 50 cm                          |
| Spännvidd:     | 1,4 m                          |
| Hastighet      | Underljud                      |
| Räckvidd       | 200 km                         |
| Flyghöjd:      | Strax ovan vattenytan          |
| Stridsspets:   | 200 kg HE blast                |
| Guidance       | TN, GPS, Aktiv radar (J band)  |
| Platform:      | Från båt, flygplan eller land. |

### C.5.3 Tomahawk

Tomahawk Land Attack Missile (TLAM) är en långräckviddig allväders, underljudskryssningsmissil, se figur C.14. Den tillverkas av Raytheon och kan även avfyra från ubåtar i undervattensläge.



Figur C.14: Kryssningsmissilen Tomahawk.

|                |                                                                       |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Data från [49] |                                                                       |
| Operativ år:   | 1983                                                                  |
| Motor          | Williams International F107-WR-402 turbofan och en solid-fuel booster |
| Startvikt:     | 1440 kg                                                               |
| Längd:         | 5,56 m utan booster<br>6,25 m med booster                             |
| Diameter       | 0,52 m                                                                |
| Spännvidd:     | 2,67 m                                                                |
| Hastighet:     | ca 880 km/h                                                           |
| Räckvidd       | 1100 km                                                               |
| Stridsspets:   | 450 kg(konventionell)                                                 |
| Guidance       | GPS, TERCOM, DSMAC                                                    |

Dessa system avslutar genomgången av autonoma UAV- och robotsystem som kan användas för autonom verkan och spaning.



## Litteraturförteckning

- [1] Vitaly Ablavsky, Steve Holden, and Magnús Snorrason. Effecient pursuit of a moving target via spatial constraint exploitation. In *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Montreal, Canada*. AIAA, 6–9 August 2001.
- [2] Vitaly Ablavsky and Magnús Snorrason. Optimal search for a moving target: A geometric approach. In *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Denver, Colorado*. AIAA, 14–17 August 2000.
- [3] Vitaly Ablavsky, Daniel Stouch, and Magnús Snorrason. Search Path Optimization for UAVs using Stochastic Sampling with Abstract Pattern Descriptors. In *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Austin, Texas*. AIAA, 11–14 August 2003.
- [4] J. Ahlberg. Processing of spectral images recorded under THALES JP 8.10 trials - results from Sweden. Technical Report FOI-SH-0007-SE, ISSN 1650-1942, Swedish Defence Research Agency, SE-581 11 Linköping, Sweden, 2005.
- [5] J. Ahlberg and I. Renhorn. Multi- and hyperspectral target and anomaly detection. Scientific Report FOI-R-1526-SE, ISSN 1650-1942, Swedish Defence Research Agency, SE-581 11 Linköping, Sweden, 2004.
- [6] Peter Alvå, Folke Andersson, Martin Hagström, Johan Pelo, Dag Wallström, Sven-Lennart Wirkander, and Petter Ögren. Samverkande robotar i nätverk - Slutrapport. Technical Report FOI-R--1826--SE, FOI, 2005.
- [7] D.A. Anisi. Adaptive node distribution for on-line trajectory planning. In *Proceedings of Congress of the International Council of the the Aeronautical Sciences*. ICAS, September 2006.
- [8] David Anisi, John Robinson, and Petter Ögren. Safe Receding Horizon Control of an Aerial Vehicle. In *IEEE, Conference on Decision and Control, San Diego, CA*, 13–15 December 2006.
- [9] R.C. Arkin. *Behavior-Based Robotics*. Bradford Book, 1998.
- [10] R. Basri and D. W. Jacobs. Lambertian reflectance and linear subspaces. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 25(2):218–233, 2003.
- [11] 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*, 18(6), December 2002.
- [12] James R. Bergen, P. Anandan, Keith J. Hanna, and Rajesh Hingorani. Hierarchical model-based motion estimation. In *ECCV*, pages 237–252, 1992.

- [13] Luca F. Bertuccelli and Jonathan P. How. Robust UAV Search for Environments with Imprecise Probability Maps. In *IEEE Conference on Decision and Control, 2005 and 2005 European Control Conference. CDC-ECC'05, Seville, Spain*, pages 5680–5685, 2005.
- [14] Luca F. Bertuccelli and Jonathan P. How. Bayesian forecasting in multivehicle search operations. In *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Keystone, CO*, 21–24 August 2006.
- [15] Luca F. Bertuccelli and Jonathan P. How. Search for Dynamic Targets with Uncertain Probability Maps. In *IEEE, ACC*, 2006.
- [16] 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.
- [17] Howie Choset. Coverage for robotics - A survey of recent results. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, 31:113–126, 2001.
- [18] Jorge Cortes, Sonia Martinez, Timur Karatas, and Francesco Bullo. Coverage control for mobile sensing networks. *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS*, April 2004.
- [19] Atilla Dogan. Probabilistic Path Planning for UAVs. In *AIAA Unmanned Unlimited Systems, Technologies, and Operations*, San Diego, California, 2003.
- [20] Yeonju Eun and Hyochong Bang. Cooperative Control of Multiple UCAVs for Suppression of Enemy Air Defense. In *AIAA 3rd "Unmanned Unlimited Technical Conference, Workshop and Exhibit, Chicago, Illinois*, 20–23 September 2004.
- [21] Dave Ferguson and Anthony (Tony) Stentz. The Delayed D\* Algorithm for Efficient Path Replanning. In *IEEE Conference on Decision and Control, 2005 and 2005 European Control Conference. CDC-ECC'05, Seville, Spain*. IEEE, April 2005.
- [22] Henrik Grankvist. Autopilot design and pathplanning for a uav. Master's thesis, Royal Institute of Technology, 100 44 Stockholm, December 2006.
- [23] B. Grocholsky. *Information-Theoretic Control of Multiple Sensor Platforms*. PhD thesis, The University of Sydney, ACFR, March 2002.
- [24] Martin Hagström, Sven-Lennart Wirkander, and Petter Ögren. Survey of Autonomous Algorithms for Cooperative Surveillance and Strike Problems. Technical Report FOI-R--2016--SE, FOI, 2006.
- [25] Islam I. Hussein and Dusan M. Stipanovic. Effective coverage control for mobile sensor networks. In *Proceedings of IEEE CDC*. IEEE, December 2006.
- [26] M. Irani and P. Anandan. A unified approach to moving object detection in 2D and 3D scenes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 20(6):577–589, 1998.
- [27] J. Karlholm. Design and evaluation of a hierarchy of boosted classifiers for detection of ground targets in aerial surveillance imagery. In *Automatic Target Recognition XIV, Proc. SPIE*, volume 5426, April 2004.

- 
- [28] J. Karlholm. Implementation and evaluation of a method for detection of ground targets in aerial EO/IR imagery. Scientific Report FOI-R-00-1267-SE, ISSN 1650-1942, Swedish Defence Research Agency, SE-581 11 Linköping, Sweden, 2004.
  - [29] J. Karlholm. Implementering av en detektionsalgoritm för bearbetning av IR-video. Teknisk rapport Report FOI-R-00-1716-SE, Swedish Defence Research Agency, SE-581 11 Linköping, Sweden, 2004.
  - [30] J. Karlholm, M. Ulvklo, S. Nyberg, A. Lauberts, and A. Linderhed. A survey of methods for detection of extended ground targets in EO/IR imagery. Scientific Report FOI-R-0892-SE, ISSN 1650-1942, Swedish Defence Research Agency, SE-581 11 Linköping, Sweden, June 2003.
  - [31] J. Karlholm, M. Ulvklo, J. Nygård, M. Karlsson, S. Nyberg, M. Bengtsson, L. Klasén, A. Linderhed, and M. Elmqvist. The Target Detection and Tracking processing chain: A survey of methods with special reference to EO/IR Sequences. Scientific Report FOA-R-00-01767-408,616-SE, ISSN 1104-9154, Defence Research Establishment, Division of Sensor Technology, SE-581 11 Linköping, Sweden, December 2000.
  - [32] Yoshiaki Kuwata and Jonathan P. How. Three Dimensional Receding Horizon Control for UAVs. In *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Providence, Rhode Island*, 16–19 August 2004.
  - [33] Y. G. Leclerc, Q.-T. Luong, and P. V. Fua. Self-consistency and MDL: A paradigm for evaluating point-correspondence algorithms, and its application to detecting changes in surface elevation. *International Journal of Computer Vision*, 51(1):63–83, 2003.
  - [34] Jusuk Lee, Rosemary Huang, Andrew Vaughn, Xiao Xiao, and J. Karl Hedrick. Strategies of Path-Planning for a UAV to Track a Ground Vehicle. In *AINS Conference*, 2003.
  - [35] Jerry Lindbergh. Mini-UAV Skylark. *FMV Tidningen Protec, Teknik för Sveriges Säkerhet*, (1), 2006.
  - [36] J. Manyika and H. Durrant-Whyte. *Data Fusion and Sensor Management: A Decentralized Information-Theoretic Approach*. Prentice Hall, 1994.
  - [37] Morgan Quigley, Michael A. Goodrich, Steve Griffiths, Andrew Eldredge, and Randal W. Beard. Target Acquisition, Localization, and Surveillance Using a Fixed-Wing Mini-UAV and Gimbaled Camera. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 2600–2605, April 2005.
  - [38] Fahd Rafi, Saad M. Khan, Khurram Shafiq, and Mubarak Shah. Autonomous Target Following by Unmanned Aerial Vehicles. In *Defence and Security Symposium , Orlando, Fl. SPIE*, 2006.
  - [39] Jouni Rantakokko. Kan prestanda för retrokommunikationssystem förbättras genom att använda traditionella radiosystemtekniker? Technical Report FOI-R--1883--SE, FOI, 2005.
  - [40] A. Roederer and et al. J. Mosig. Summary final report Cost action 260 activities and results. Cost Action 260. *Smart antenna computer aided design & technology.*, 2001.

- [41] Ketan Savla, Francesco Bullo, and Emilio Frazzoli. On Traveling Salesperson Problems for Dubins' vehicle: stochastic and dynamic environments. In *IEEE Conference on Decision and Control, 2005 and 2005 European Control Conference. CDC-ECC'05, Seville, Spain*, April 2005.
- [42] Per Skoglar, Jonas Nygård, Rickard Björström, Petter Ögren, Johan Hamberg, Patrik Hermansson, and Morgan Ulvklo. Path and Sensor Planning Framework Applicable to UAV Surveillance with EO/IR sensors. Technical Report FOI-R-1741-SE, Swedish Defence Research Agency, September 2005.
- [43] Chung Tin. Robust Multi-UAV Planning in Dynamic and Uncertain Environments. Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology, September 2004.
- [44] Airforce technology webpage. <http://www.airforce-technology.com>.
- [45] Aviation now: Specifications missiles. [http://www.aviationnow.com/media/pdf/spec\\_04.missiles.pdf](http://www.aviationnow.com/media/pdf/spec_04.missiles.pdf).
- [46] Aviation today. <http://www.aviationtoday.com/cgi/rw/show-mag.cgi?pub=rw\&mon=1104\&file=mumsthe.htm>.
- [47] Boeing webpage. <http://www.boeing.com/>.
- [48] Defense update international online defense magazine. <http://www.defense-update.com/>.
- [49] Federation of american scientists, military analysis network. <http://www.fas.org/man/dod-101/sys/>.
- [50] Global security webpage. <http://www.globalsecurity.org/military/library/news/2005/09/mil-050909-nns03.htm>.
- [51] Il guang gong yang corporation webpage. <http://www.iggy.co.kr/>.
- [52] Northrop grumman webpage. <http://www.northropgrumman.com/unmanned>.
- [53] Rockwell collins, product catalog. [http://www.rockwellcollins.com/ecat/gs/MIDS\\_LVT.html](http://www.rockwellcollins.com/ecat/gs/MIDS_LVT.html).
- [54] Rockwell collins, product catalog. [www.rockwellcollins.com/content/pdf/pdf\\_7500.pdf](http://www.rockwellcollins.com/content/pdf/pdf_7500.pdf).
- [55] Soldf.com, informationssida om ra 180. <http://www.soldf.com/ra180.html>.
- [56] Specifications unmanned aerial vehicles and drones. [http://www.aviationnow.com/media/pdf/spec\\_04.uav.pdf](http://www.aviationnow.com/media/pdf/spec_04.uav.pdf).
- [57] Wimax day. <http://www.wimaxday.net/site/>.
- [58] Petter Ögren, Adam Backlund, Tobias Harryson, Lars Kristensson, and Patrik Stensson. Autonomous UCAV Strike Missions using Behavior Control Lyapunov Functions. In *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit; Keystone, CO, USA*, 21-24 August 2006.
- [59] Petter Ögren and Naomi Ehrich Leonard. A Convergent Dynamic Window Approach to Obstacle Avoidance. *IEEE Transactions on Robotics*, April 2005.

- [60] Petter Ögren and Maja Winstrand. Combining Path Planning and Target Assignment to Minimize Risk in a SEAD Mission. In *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, San Francisco, California*, 15–18 August 2005.
- [61] Petter Ögren, Sven-Lennart Wirkander, Anna Stefansson, and Johan Pelo. Formulation and Solution of the UAV Paparazzi Problem. In *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit; Keystone, CO, USA*, 21–24 August 2006.