

FOI-R--0261--SE november 2001 ISSN 1650-1942 Metodrapport

Christer Wigren

Pansarvärnsrobot mot motmedelskyddade stridsfordon en simuleringsstudie

| Utgivare | Rapportnummer, ISRN | Klassificering | | | |
|--|--|---|--|--|--|
| Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI | rets Forskningsinstitut - FOI FOI-R0261SE Metodrapport | | | | |
| Ledningssystemteknik | Forskningsområde | | | | |
| Box 1165 | 6. Telekrig | | | | |
| 581 11 Linköping | Månad, år | Projektnummer | | | |
| | november 2001 | E30323 | | | |
| | Verksamhetsgren | L | | | |
| | 5. Uppdragsfinansierad v | erksamhet | | | |
| | Delområde | | | | |
| | 61 Telekrigföring med EN | I-vapen och skydd | | | |
| Författare/redaktör | Projektledare | | | | |
| Christer Wigren | Gustaf Olsson | | | | |
| | Godkänd av | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | Tekniskt och/eller veter | nskapligt ansvarig | | | |
| Rapportens titel | | | | | |
| Pansarvärnsrobot mot motmedelskyddade stridsfordon - e | en simuleringsstudie | | | | |
| | | | | | |
| Sammanfattning (högst 200 ord) | | | | | |
| En simuleringsstudie har utförts med syfte att utvärdera effekten mellan en bildalstrande pv-robot och ett stridsfordon. Robotmode Javelin. Dessa öppna data har kompletterats med uppskattning har utförts både med ideala robotbanor och helt dynamiska scen till känslighetsanalyser där pålåsningspunkter väljs systema känslighetsanalyser har några av sekvenserna med de ideala ro | av multispektral vattendimma so ellen har utgått från kända data fr ar om övriga data som är nödvä arier. Sekvenser genererade me tiskt inom ett område kring s botbanorna analyserats med en | m skylande motmedel i en duell rån den amerikanska pv-roboten Indiga att känna till. Simuleringar ed ideala robotbanor har använts stridsfordonen. Förutom dessa modell för bildanalys som ger ett | | | |
| kvalitativt mått på hur lätt det är att följa målet under sekvensen. | , | | | | |
| Simuleringar har gjorts med olika inställningar för roboten va | Simuleringar har gjorts med olika inställningar för roboten vad avser bl.a. höjdprofil. För de olika höjdprofilerna har sedan fem | | | | |
| olika horisontella aspektvinklar använts i simuleringarna. Effekte rörelse har testats. Den multispektrala vattendimman har inte förutsättningar visar simuleringarna att den ändock är effektiv mo | en av dimmans kontrast samt e varit optimerad för den aktuella t det studerade pv-robot hotet. | ffekten av att stridsfordonen är i hotriktningen men under vissa | | | |

Förutom att värdera effekten av multispektral vattendimma presenteras en utvärderingsmetodik för värdering av döljande eller maskerande åtgärder på en plattform.

| Nyckelord | | |
|--|------------------------|--|
| Simulering, stridsfordon, pansarvärnsrobot, motmedel | | |
| | | |
| Ovriga bibliografiska uppgifter | Sprak Svenska | |
| | | |
| ISSN 1650-1942 | Antal sidor: 51 s. | |
| Distribution enligt missiv | Pris: Enligt prislista | |
| | Sekretess Öppen | |

| Issuing organization | Report number, ISRN | Report type | | |
|--|------------------------------|---------------------------------------|--|--|
| FOI – Swedish Defence Research Agency | FOI-R0261SE | Methodology report | | |
| Command and Control Warfare Technology | Research area code | | | |
| P.O. Box 1165 | 6. Electronic Warfare | | | |
| SE-581 11 Linköping | Month year | Project no. | | |
| | November 2001 | E30323 | | |
| | Customers code | | | |
| | 5. Contracted Research | | | |
| | Sub area code | | | |
| | 61 Electronic Warfare, EM \ | Neapons and Protection | | |
| Author/s (editor/s) | Project manager | | | |
| Christer Wigren | Gustaf Olsson | | | |
| | Approved by | | | |
| | | | | |
| | | · · · · · · · · · · · · · · · · · · · | | |
| | Scientifically and techn | ically responsible | | |
| Report title (In translation) | | | | |
| Anti-tank missile against armoured vehicles using counter | measures - a simulation stud | ly | | |
| | | | | |
| Abstract (not more than 200 words) | | | | |
| A simulation study that evaluates the effect of multispectral waterfog as an obscuring countermeasure on an armored vehicle against the threat of an imaging IR guided anti-tank missile is presented. The model of the missile is based on data about the Javelin missile found in the open literature, other needed data were estimated. Missile simulations have been performed using both dynamically generated missile paths and ideal missile paths. The latter have been used for analyzing the sensitivity of the lock-on position. Some of the image sequences generated using ideal missile paths have also been used to investigate the target's trackability. Simulations have been made using different height profiles for the missile path. For the different height profiles five different horizontal aspect angles have been used. The effects of the contrast of the multispectral waterfog and target movement have also been studied. The multispectral waterfog has not been optimized for the missile approach angle but the simulations show that it can still be effective against an imaging IR guided anti-tank missile. In addition to evaluating the effect of multispectral waterfog an evaluation method for the assessment of concealing or camouflaging measures are presented. | | | | |
| Keywords | | | | |
| Simulation, armoured vehicles, anti-tank missile, counterm | neasures | | | |
| | | | | |
| Further bibliographic information | Language Swedish | | | |
| | | | | |
| ISSN 1650-1942 | Pages 51 p. | | | |
| | Price acc. to pricelist | | | |

Security classification

Innehåll

| 1 | INLEDNING | 6 |
|--|--|--|
| 2 | METODBESKRIVNING | 7 |
| 2.1 | Ingångsdata från litteraturen | 7 |
| 2.2 | Synfält | 7 |
| 2.3 | Robothastighet | 8 |
| 2.4 | Höjdprofil | 8 |
| 2.5 | Känslighet hos sensor | 8 |
| 2.6 | Målföljare | 9 |
| 2.7 | Robotdynamik | 9 |
| 3 | SIMULERINGSVERKTYG | 13 |
| 3.1 | OPTSIM | 13 |
| 3.2 3. 3. 3. 3. 3. 3. | Detaljer om modellerna i OPTSIM2.1OPTSIM2.2MAIS2.3IGOSS2.4MUSS2.5SeekCorr2.6Robotdynamik | 14 14 15 15 16 16 16 |
| 3.3 | GLCM TM | 16 |
| 4 | RESULTAT OCH DISKUSSION | 17 |
| 4.1 | Utan vattendimma | 17 |
| 4.2 | Med vattendimma (negativ kontrast) | 26 |
| 4.3 | Vattendimma med olika kontrast (negativ, svagt negativ, svagt positiv) | 31 |
| 4.4 | Stridsfordon i rörelse (v = 10 m/s) med vattendimma | 36 |
| 4.5 | GLCM TM beräkningar | 39 |
| 5 | VALIDERING AV SIMULERINGSRESULTAT | 44 |
| 6 | SAMMANFATTNING OCH SLUTSATSER | 45 |
| API SIM | PENDIX A - INGÅNGSPARAMETRAR TILL MODELLER I OPTSIM IULERINGAR | 47 |
| 7 | REFERENSER | 51 |

1 Inledning

Lätta manburna pansarvärnsrobotar (pv-robotar) med bildalstrande målföljare är idag en realitet som ett stridsfordon kan ställas inför [1].För att skydda sig mot en sådan robot är det inte troligt att enklare typer av motmedel, t ex i form av facklor, har någon nämnvärd effekt. I stället kan motmedel användas som ändrar stridsfordonets signatur och/eller form. Döljande rök är ett exempel på motmedel med sådana effekter. Att använda motmedel i form av rök är dock inte utan problem. Traditionell rök har t ex en bra döljande effekt i det visuella våglängdsområdet men är nästan fullständigt transparent i det infraröda (IR) [2,3]. Problemet är att de partiklar som sätter ner sikten i det visuella våglängdsområdet är för små för att ha effekt i IR-området. För att uppnå döljande effekt i IR-området är därför en vanlig metod att använda en rök som innehåller metallpartiklar med rätt storleksfördelning [2]. Detta ger avsedd effekt på förmågan att skyla föremål bakom rökmolnet men har nackdelen att metallpartiklarna kan förändra signaturen radikalt genom att bilda en tunn metallfilm på den yta där de faller ner. Dessutom är metallröken ofta giftig vilket försvårar övning med röken i fredstid.

Ett alternativ till traditionell och metallpartikelbaserad skyddsrök är att använda multispektral vattendimma (MSD). Vanlig vattendimma innehåller liksom den traditionella röken aerosoler som är alldeles små för att ge en skylande effekt i IR-området. Den multispektrala vattendimman måste därför skapas genom att vatten med ett högt tryck pressas genom speciella munstycken för att ge en optimal storleksfördelningen hos vattendropparna. Försök har visat att denna konstgjorda vattendimma har goda skylande egenskaper i både IR-och det visuella våglängdsområdet [2,3].

I denna rapport redovisas resultat av och slutsatser från simuleringar där en bildalstrande pv-robot ställs mot stridsfordon med och utan MSD. Olika parametrar som kan påverka utgången av ett robotanfall, så som robotens anfallsvinkel, fordonets rörelse och den multispektral vattendimmans kontrast mot omgivningen har studerats. Förutom direkta duellsimuleringar har simuleringsverktyg för bildsekvensanalys använts.

2 Metodbeskrivning

För att ge simuleringarna en viss verklighetsförankring har den amerikanska Javelinroboten använts som förebild. Mycket av den information som behövs för att utföra simuleringar går dock inte att finna i den öppna litteraturen men så långt som möjligt har dock verkliga (öppna) data på roboten använts vilket presenteras i avsnitt 2.1. Förutom dessa data har ett antal mer eller mindre kvalificerade bedömningar gjorts om hur en pv-robot med dessa givna prestanda kan tänkas fungera. Uppskattningar av robotens prestanda och vilket resonemang som ligger bakom dessa presenteras i avsnitt 2.2-2.7.

2.1 Ingångsdata från litteraturen

De öppna data på Javelin som använts är följande [1]:

| Våglängdsområde | 8-12 μm |
|---|---------|
| Antal bildelement, N _H xN _V | 64x64 |
| Maximalt skjutavstånd, s _{max} | 2500 m |
| Detektormaterial | CdHgTe |
| Elevationsvinkel vid | 18° |
| utskjutning | |
| Max höjd vid top attack | 150 m |
| Max höjd vid direct fire | 50 m |

2.2 Synfält

Robotsystemet (Javelin) består, förutom av en robot, av ett sikte i vilket en operatör pekar ut målet för roboten. Efter avfyring är roboten helt autonom och får ingen uppdatering från operatören vad gäller målposition. Detta gör att roboten måste använda sitt eget sensorsystem för att följa målet från maximalt 2500 meter till träff. I litteraturen [1] står det nämnt att uppgraderingar av roboten i framtiden kan innebära fler detektorelement i robotens sensorsystem för att på så sätt öka det maximala skjutavståndet, dvs. den momentana upplösningsförmågan för varje detektorelement begränsar maximalt skjutavstånd. Beroende på typ av målföljare innebär detta antagligen att ett mål bör uppta minst n=2 (förmodligen kanske till och med 3 eller 4) detektorelement i den riktning där målet är som minst. Under detta antagande samt att den kritiska dimensionen är $\Delta d=3$ meter för ett typiskt stridsfordon blir det totala synfältet för robotens målföljare:

$$FOV = \frac{N}{n} \arctan\left(\frac{\Delta d}{s_{\max}}\right) = \frac{64}{2} \arctan\left(\frac{3}{2500}\right) = 2,2^{\circ}$$

De simuleringar som gjorts inför denna rapport har antagit att målföljning sker med hjälp av korrelation, där korrelationskärnas storlek är 5x5 bildelement stor, och uppdateras med 30% i varje bild. I detta fallet är 2 bildelement i den kritiska riktningen i minsta laget för att kunna följa ett stridsfordon hela vägen från ett avstånd på 2500 meter och simuleringar visar att synfältet bör vara av storleksordningen 1°x1°. Ett sådant litet synfält kan dock ge problem med styrning i slutskedet av närmande förloppet eftersom målet i ett sådant läge kan fylla hela robotens synfält redan på ett avstånd av 170 m. I ett sådant fall är det svårt att centrera målet och roboten träffar därför gärna i kanten av eller strax utanför målet oavsett målföljningsprincip.

2.3 Robothastighet

Den hastighet med vilken roboten rör sig kan påverka dess förmåga att träffa ett mål. Hastighetsprofilen för TOW 2 enligt referens [4] har använts som en första approximation (figur 1). TOW 2 kan avfyras från en helikopter och har något längre räckvidd än Javelin varför hastighetsprofilen förmodligen visar en hastighet som är något för hög, speciellt i begynnelseskedet, men detta fel påverkar förmodligen resultatet ganska lite.



Figur 1 Robotens hastighet som funktion av tiden från avfyring

2.4 Höjdprofil

Banprofilen för en Javelinrobot beror på vilken stridssituation som föreligger. Den ena typen av banprofil, top attack, används för att när så är möjligt slå mot ett stridsfordon ovanifrån där den minsta bepansringen antas vara. Vid strid i bebyggelse kan denna metod vara svår att använda då stridsfordon t ex kan ta skydd i övergivna huskroppar och i ett sådant fall används en annan banprofil, direct fire. För båda typerna av banprofiler går roboten iväg med en utskjutningsvinkel på 18°. Med höjdprofilen top attack går roboten efter avfyring upp till en höjd på 150 meter medan den bara går till 50 meter för direct fire. I top attack har det i simuleringarna antagits att roboten går upp till ca 150 meter över den höjd från vilken roboten skjuts iväg och sedan att denna höjd hålls fram till dess att den måste börja svänga nedåt för att uppnå en önskad anfallsvinkel på 15 eller 30° (anfallsvinkel är en variabel som kan varieras i modellen). Den önskade vinkeln erhålles endast om roboten styr med maximal centripetalacceleration men vid syftbäringsstyrning (vilket används i simuleringarna) tar det ett litet tag för roboten att svänga in mot målet och den slutliga anfallsvinkeln blir i simuleringarna därför ca 5° större än den önskade vinkeln. I direct fire har det antagits att roboten går upp till ca 50 meter över utskjutningshöjd och att den sedan styr med avsikt att gå rakt mot den förmodade träffpunkten.

2.5 Känslighet hos sensor

En CdHgTe detektor (används i Javelinroboten) kan typiskt ha en specifik detektivitet, D^* , på 10^{10} cm Hz^{1/2} W⁻¹ vilket resulterar i ett brus från detektorn på:

$$P_{brus} = \frac{\sqrt{A_{detektorelement}\Delta f}}{D^*}$$

där $A_{detektorelement}$ är arean som ett detektorelement har och Δf är bandbredd. Med en detektorstorlek på 50x50 μ m² och en bandbredd på 25 Hz blir brusnivån 2,5 10⁻¹² W. Sensormodellen i simuleringarna kommer automatiskt att lägga till brus som motsvarar denna nivå. Bara för att få en känsla för hur stor betydelse denna brusnivå har kan det vara av

intresse att jämföra denna brusnivå med signalen från ett mål med medeltemperaturen 20 °C som befinner sig i en bakgrund med medeltemperaturen 15 °C. Under antagandet att målet har temperaturen 20 °C och en emissivitet på 0.5 blir målets radians ~17,2 W sr⁻¹ m⁻² (λ =8-12 µm). Om vi antar att målsökaren har en apertur på 5 cm, synfältet 1°, och antal detektorelement 64x64 så blir den infångade effekten:

$$P_{mail} = R \cdot A_{mail} \cdot \Omega = R \frac{\varphi_H \varphi_V d^2}{N_H N_V} \frac{\phi^2}{2d^2} = R \frac{\varphi_H \varphi_V \phi^2}{N_H N_V 2} = 17.2 \frac{\left(\frac{\pi}{180}\right)^2 0.05^2}{64^2 2} = 1,60 \cdot 10^{-9} W$$

En bakgrundstemperatur på 15 °C och emissiviteten 0.5 ger på motsvarande sätt en radians på 15,7 W sr⁻¹ m⁻² (λ =8-12 µm) och en infångad effekt på 1,46 10⁻⁹ W. Skillnaden mellan mål och bakgrund (signal) blir alltså 1,4 10⁻¹⁰ W. Det vill säga ett signal/brus-förhållande på ≈56. Detta är ett ganska stort tal och det skulle därmed gå att förenkla simuleringen genom att inte ta hänsyn till brusnivån. Tidsvinsten är dock minimal och denna förenkling är därför inte gjord.

2.6 Målföljare

I simuleringarna har det antagits att en korrelationsmålföljare används för målföljning. Detta är en mycket kraftfull metod att följa upplösta mål men har en del nackdelar. Speciellt när målföljaren låser på målet på avstånd där hela målet och en del av bakgrunden ryms inom korrelationskärnan, resulterar detta ofta i att målföljaren följer kanten på målet. För att förbättra robotens förmåga att träffa i centrum av målet byter roboten därför följealgoritm när målföljaren uppskattar att det är 200 meter kvar till målet. Under de sista 200 metrarna försöker målföljaren centrera målet genom att först bestämma en intensitetströskel till medelvärdet av intensiteten av bilden inom synfältet (bestämningen av tröskelnivån görs endast i den första bilden efter att målföljaren bytt följealgoritm). Sedan antas målpositionen i bilden vara medelvärdet av positionen av alla bildelement med en intensitet över (eller under om så önskas) tröskelnivån. Uppskattningen av avståndet, d, till målet sker enligt följande ekvation:

$$d = \frac{h}{\sin(\varphi_{målsökare})}$$

där h är uppskattad höjd, $\varphi_{målsökare}$ är utvridningsvinkel i vertikalled för målsökaren relativt ett jordfast koordinatsystem (0° = horisontalriktning).

2.7 Robotdynamik

För att roboten skall bete sig på ett rimligt sätt beskrivs dess rörelse i lufthavet med en enkel robotdynamikmodell. I denna modell anges maximal manöverförmåga och vilken typ av styrprincip som skall användas. Den maximala manövreringsförmågan anges som en maximal centripetalacceleration och bestämmer tillsammans med robotens hastighet den maximala svängradien för roboten. Den maximala svängradien kan sedan användas för att bestämma hur stor vinkel roboten maximalt kan svänga under ett tidssteg:

$$\begin{aligned} a &= \frac{v^2}{r} \\ \dot{\theta} &= \frac{v}{r} \end{aligned} \} \Rightarrow \dot{\theta}_{\max} = \frac{a_{\max}}{v}$$
 Ekvation 1

där *a* är robotens centripetalacceleration, *v* är robotens hastighet, *r* är robotens svängradie och $\dot{\theta}$ är robotens vinkelhastighet (hur snabbt den svänger). Antag att den maximala

centripetalaccelerationen är 40g (~400 m/s²) och hastigheten 300 m/s då blir det maximala vinkelsteget ~3 °/bild om vi antar att bildfrekvensen är 25 Hz.

Målsökaren kan orienteras i en godtycklig riktning i förhållande till robotkroppen och strävar hela tiden efter att ha målet i centrum av bilden. Robotens banprofil (konstant höjd till dess att vinkeln ner till målet blir det rätta) kan dock ge problem för målsökaren att hinna vrida sig tillräckligt snabbt. Om vi antar (något förenklat) att roboten rör sig vinkelrätt mot den vektor som går mellan målet och roboten blir vinkelhastigheten som målsökaren måste vridas:

 $\dot{\theta} = \frac{v_{\perp}}{r}$ Ekvation 2

Figur 2 Definition av beteckningar för beräkning av målsökarutvridning

Med en mer realistisk bana enligt figur 2 blir:

$$\dot{\theta} = \frac{v \sin^2 \theta}{h}$$
 Ekvation 3

Under antagandet att roboten avviker från en bana på konstant höjd och börjar styra mot målet först när vinkeln mellan roboten och målsökaren är 30°, att höjdskillnaden mellan robot och mål är 150 m och att robotens hastighet är 300 m/s blir vinkelhastigheten för målsökaren utvridning 0.5 rad/s = 29 °/s = 1,2 °/bild (bildfrekvens 25 Hz). Detta är en större vinkel än halva synfältet för roboten (1°/2 = 0.5°) och leder till att roboten kan få problem i slutskedet med att hålla kvar bilden av målet i synfältet. Robotdynamikmodellen, som också är ansvarig för utvridningen av målföljaren, försöker därför prediktera hur målföljaren bör vrida sig för att hålla målet i centrum:

$$\Delta \theta_{n+1} = 2 \cdot \Delta \theta_n - \Delta \theta_{n-1}$$
$$\dot{\theta}_n = \dot{\theta}_{n-1} + \frac{\Delta \theta_{n+1}}{\Delta t}$$

utan prediktering blir

$$\dot{\theta}_n = \frac{\Delta \theta_n}{\Delta t}$$

där $\Delta \theta_n$ är det uppmätta vinkelfelet vid tiden t_n och $\dot{\theta}_n \Delta t$ anger hur mycket målsökaren skall vrida sig till nästa tidssteg. Detta sätt att vrida målföljaren är dock inte utan problem eftersom målföljningen kan bli instabil om den hoppar mellan olika mållåsningspositioner, och kan leda till att målet tappas genom att det riktiga målet snabbt försvinner ut ur synfältet. För att minska denna effekt sker endast denna prediktering i höjdled. Det är också möjligt att manuellt sätta den maximala utvridningshastigheten, $\dot{\theta}_n \Delta t$.

Om anfallsvinkeln i slutskedet är 15° i stället för 30° blir med, ovanstående resonemang, målsökarens vinkelhastighet bara 0,3 °/bild och målsökaren kommer därför att kunna styra utan denna prediktering. På korta skjutavstånd (t.ex. 800 meter) kommer dock roboten inte att hinna upp till 150 meters höjd innan den måste börja styra nedåt mot målet varvid vinkelhastigheten blir större och målsökaren måste därför även i detta fallet använda prediktering för att träffa målet.

I början av ett robotskott går roboten enligt en förutbestämd bana och styr egentligen bara i sidled (yaw-led). Under slutskedet måste dock roboten börja styra mot målet även i höjdled (pitch-led) och speciellt om målet rör sig verkar den bästa styrprincipen vara att styra mot en förmodad träffpunkt (syftbäringsstyrning). Vid denna styrprincip sätts robotens vinkelhastighet till:

$$\dot{\theta}_{robot} = \kappa \cdot \dot{\theta}_{målsökard}$$

där κ är en konstant (syftbäringskonstanten eller, eftersom målets hastighet nästan är försumbar, navigationskonstanten) som satts till 4 i dessa simuleringar. För att inte roboten skall börja svänga okontrollerat och ofysikaliskt snabbt, begränsas dess vinkelhastighet enligt ekvation 1.

Tidpunkten när roboten skall börja plana ut i inledningsskedet av robotbanan och när den skall börja styra mot målet i höjdled bestäms bland annat av robotens maximala centripetalacceleration. För att roboten skall hinna plana ut till rätt höjd måste utplaningen börja på höjden H- Δ h, där H är önskad sluthöjd och Δ h bestäms av:



Figur 3 Definition av beteckningar för beräkning på vilken höjd roboten måste börja svänga för att kunna plana ut på höjden H.

I slutskedet måste styrning i höjdled också börja strax innan vinkeln till målet motsvarar den optimala nedslagsvinkeln.



Figur 4 Definition av beteckningar som används för att beräkna när roboten måste börja svänga för att träffa målet med vinkeln φ .



Roboten börjar sin nerfärd när dess utvridningsvinkel i pitch-led är större än vinkeln i ekvation 4. Om skjutavståndet är väldigt kort kommer villkoret enligt ekvation 4 att inträffa innan roboten kommer upp på rätt höjd. Att träffa målet har högre prioritet än att komma upp på rätt höjd och därför kan roboten börja svänga nedåt innan den kommit upp på denna höjd.

3 Simuleringsverktyg

I detta kapitel beskrivs de simuleringsverktyg som har använts. Robotsimuleringar har gjorts i simuleringsmiljön OPTSIM som beskrivs i avsnitt 3.1. Denna miljö kopplar samman ett antal modeller. De enskilda modellerna som använts i robotsimuleringarna beskrivs i avsnitt 3.2. Förutom robotsimuleringar har analyser gjorts i bildsekvenser som skapats i OPTSIM. En metod som använts vid denna typ av analys finns beskriven i avsnitt 3.3.

3.1 OPTSIM

Under senare år har ett antal simuleringsverktyg (modeller) i form av datorprogram utvecklats inom projekt vid institutionen för *Telekrigvärdering* på FOI i Linköping. Dessa har använts som fristående program för olika typer av simuleringsverksamhet inom olika projekt. Olika typer av målföljningsmodeller har t.ex. använts direkt mot videoupptagningar för att värdera olika typer av motmedel. De enskilda modellerna är mycket användbara som fristående program men genom att koppla samman dem ökar användbarheten. Exempelvis kan de sammankopplade modellerna användas för telekrigstudier i duellform i dynamiska scenarier [5, 6, 7] eller för utvärdering av autonoma varnarsystem [8].

Vid studier av dynamiska telekrigdueller modelleras bl.a. hur rörliga mål i en given bakgrund kan skyddas med hjälp av olika former av motmedel, under anfall av robotar med olika passiva optroniska sensorsystem. För att kunna göra sådana studier meningsfulla måste en simuleringsmiljö, förutom att modellera motmedel i form av t.ex. rök, dimma, facklor eller laserstörare, kunna beskriva scenariot som innehåller en bakgrund, och olika objekt i form av flygplan, fartyg, eller markbaserade stridsfordon. Dessutom bör simuleringen kunna beskriva hur denna bild av scenen degenereras i ett sensorsystem, och den ska kunna beskriva hur en målsökare reagerar på den slutliga bilden.

För att göra allt detta har ett antal datormodeller kopplats samman. Det program som kopplar ihop de övriga modellerna är OPTSIM (OPTronic Simulation Interface Model) se figur 5. En mera detaljerad beskrivning av metodiken i OPTSIM finns i referens [9].



Figur 5 Modellstruktur för OPTSIM-simuleringar genomförda inom studien.

De modeller som kopplats samman i den här studien är MAIS [10] (Model of Atmospheric effects on Images in Sensor systems) som genererar 2D IR-bilder av 3D objekt i 3D-bakgrunder med hänsyn tagen till atmosfärsdämpning. MUSS [11] (MUlti Spektral Stridsrök) som genererar motmedel i form av multispektral vattendimma (kan även hantera rök och facklor). IGOSS [12] (Image Generation in Optronic Sensor Systems) som modellerar en sensors beteende. SeekCorr [13] är en modell av en korrelationsmålföljare som använts för målföljning. För att beskriva robotdynamiken har en nykonstruerad modell, JavelinDynamics, använts.

3.2 Detaljer om modellerna i OPTSIM

I detta kapitel beskrivs de olika modellerna i OPTSIM paketet och de ingångsparametrar som användes till de olika modellerna.



Figur 6 Bild som visar geometrier vid simuleringar.

Simuleringarna beskriver en pv-robot som anfaller stridsfordon som står uppställda på koordinaterna (0,0,0), (0,50,0) resp. (0,-50,0). Den önskade anfallsvinkeln, pitch, under slutfasen av närmandeförloppet när roboten varit i *top attack* har varit antingen 15 eller 30° (under simuleringen blir vinkeln något större eftersom roboten inte styr med maximal centripetalacceleration). Yaw-vinkeln varierades mellan fem olika vinklar: 0°, 45°, 90°, 135° och 180°. Aspektvinklar (= yaw) och de ingående komponenterna som bestämde hur scenariot ser ut (hastighet på fordon, samt vilka simuleringsmodeller som ingår i simuleringen) styrdes genom parameterbyten i OPTSIM. Den multispektrala dimmans kontrast styrdes genom inställningar i motmedelsmodellen, MUSS. Typen av styrning för roboten styrdes genom parameterbyten i cobtdynamikmodellen, JavelinDynamics. I övrigt ändrades inte ingångsparametrar i de olika modellerna. De inställningar (parametervärden) som användes i de olika modellerna finns redovisade nedan under respektive avsnitt och i appendix A. Målen har inte gjort några undanmanövrar under förloppet, utan är stillastående eller så rör de sig framåt i negativ x-riktning.

3.2.1 OPTSIM

OPTSIM är det program som kontrollerar vilka modeller som ingår i en simulering, kopplar ihop de som skall användas, bestämmer i vilken ordning de skall användas och ansvarar för att information skickas mellan dem. Parametrar som är inte ändras mellan olika simuleringar redovisas i Appendix A, tabell 2. Det som också sätts är hastigheten på fordonen, starttid för motmedel (när detta används), samt vilken aspektvinkel roboten (yaw) och målsökaren (yaw och pitch) har vid simuleringens början. Dessa parametrar ändras mellan olika simuleringar men vad de är framgår av det sammanhang där de diskuteras.

3.2.2 MAIS

MAIS [10] är modellen som beskriver bakgrunden och målen genom att använda ingångsdata som andra program skapat. Signaturen på bakgrunden har skapats med hjälp av programmet SensorVision [14] och motsvarar signaturen som den ser ut mitt på dagen under sommaren registrerade med sensorer med känslighetsområde inom det kortvågiga IR-bandet (3-5 μ m). Radiansnivåer hos bakgrunden har inte erhållits direkt från SensorVision utan skalats till nivåer svarande mot emissiviteten 1.0 (endast egenstrålning) och temperaturer mellan 10 och 20 °C. I MAIS har sedan våglängdsområdet ändrats till 8-12 μ m. För att minska effekterna av att enstaka bildelement i texturbilden kan lösas upp vid korta avstånd används texturfilterfunktionen i OpenGL [15]. Förutom med IR-signaturer beskrivs bakgrunden även geometriskt med hjälp av en 3D-modell. 3D-modellen har tagits fram genom att en laserradar har skannat in ett cirka 1x2 km² stort område i närheten av FOI-huset i Linköping [16].

Modellen av stridsfordonen är också baserad på en 3D-modell. IR-signaturen hos dessa objekt har skapats genom att koppla gråskalenivåer från en visuell textur till radiansnivåer svarande mot emissiviteten 1.0 och temperaturer mellan 15 och 30 °C. Detta är givetvis en ganska grov förenkling av målets signatur. I verkligheten är det rimligt att anta att delar av fordonet har denna ganska höga temperatur medan andra delar kanske har en temperatur som ligger närmre bakgrundens signatur. Resultatet av simuleringarna ska därför betraktas som ett värsta fall scenario, vilket betyder att om simuleringar visar att motmedelsystemet klarar att värja fordonet från IR-robotarna skulle detta, under i övrigt motsvarande förhållanden, också vara fallet vid riktiga fältförsök. Eventuella signaturer från avgaser från fordonen finns inte med i modellen.

MAIS har också möjlighet att lägga till effekten av atmosfärstransmission och emission. I dessa simuleringar har transmissionen beräknats med hjälp av MODTRAN [17] och sedan har ett egenutvecklat program MPRF använts för att anpassa transmissionen i våglängdsområdet mellan 8 och 12 μ m till en exponentialfunktion. MODTRAN har använt *subarctic summer* som modellatmosfär. De avstånd som använts i beräkningar och anpassningar har varit mellan 0.1 och 3.0 km och med steglängd 0.1 km, höjden över havet har varit 30 meter. Detta ger en extinktionskoefficient som är 0.168 km⁻¹. Atmosfärstransmissionen skulle kunna modelleras noggrannare men avståndet mellan mål och robot har aldrig att vara större än 3 km och transmissionen på en höjd av 30 meter har ansetts vara tillräckligt representativ för att kunna användas i simuleringarna. En beräkning på höjden 150 meter ger en extinktionskoeffecient på 0.158 km⁻¹ (en skillnad på 6 %).

Slutbilden från MAIS är en bild som har 64x64 bildelement. Små detaljer och objekt kommer inte att inkluderas när bilden skapas (detta sker med automatik i de flesta 3D program) och för att minska effekten av detta på simuleringsresultatet är den bild som skapas av 3D-motorn (OpenGL i detta fall) 256x256 bildelement stor. Denna bild medelvärdesbildas till rätt storlek innan den skickas vidare till nästa modell i optsimkedjan (se figur 5).

3.2.3 IGOSS

Addering av objekt och bakgrundsbilder har av historiska skäl gjorts med hjälp av sensormodellen IGOSS [6] och därmed har rörelseoskärpa som uppkommer när objekt haft en stor transversell rörelse kunnat simuleras. I de simuleringar som presenteras i denna rapport är rörelseoskärpa, p.g.a. att objektet har en stor hastighet, inte en speciellt viktig effekt att ta hänsyn till och det är därför lättare att hantera objekt och bakgrund i samma modell. Det är däremot viktigt att kunna styra objekten från OPTSIM och av den anledningen måste

modellen MAIS hanteras som en objektmodell i OPTSIM i stället för att använda den som en bakgrundsmodell. Bilden från MAIS kommer dock bara att skickas vidare till andra modeller om bilden adderas till en bakgrundsbild. Addering (eller i detta fallet omvandling) sker med hjälp av sensormodellen IGOSS (i praktiken ändras inte bilden av denna hantering i detta fall). IGOSS används även för att lägga till detektorbrus och andra effekter som påverkar vad sensorn ser. De ingångsdata som använts till IGOSS-modellen finns redovisade i tabell 6, Appendix A.

3.2.4 MUSS

Motmedelsmodellen MUSS användes under simuleringarna för att generera motmedel i form av multispektral vattendimma. De data som varierar i MUSS mellan serierna bestod i att himmels-, luft- och marktemperaturen varierades för att på så sätt ändra vattendimmans kontrast (MUSS beräknar bl.a. effekten av reflekterad himmelsstrålning): 2 °C vid negativ kontrast, 10°C vid svagt negativ kontrast och 18 °C vid svagt positiv kontrast. Data för vattendimman finns redovisade i tabell 3, Appendix A. Placeringarna av munstycken, samt data som varierar mellan munstycken finns i tabell 4, Appendix A.

Dimman, som genereras i MUSS, utvecklas ur munstycken som är utplacerade på stridsfordonet. Av simuleringstekniska skäl används endast ett fåtal munstycken. Dessa är placerade i en rad på fronten och i en rad mitt på stridsfordonet. För att kompensera det låga antalet munstycken, så ökas vattenmängden per munstycke så att den totala vattenåtgången motsvarar vad som kan vara rimligt för ett verkligt system.

Meteorologiska data som användes i modellen finns redovisade i tabell 5 Appendix A. I simuleringarna kommer vinden rakt framifrån och blåser dimman över stridsfordonet.

3.2.5 SeekCorr

För att simulera målföljaren i roboten används en modell av en korrelationsmålföljare, SeekCorr. Parametrarna som bestämt beteendet i denna modell finns beskriven i tabell 7, Appendix A.

3.2.6 Robotdynamik

För att styra en målsökare i OPTSIM finns det möjlighet att använda antingen en intern integrerad del av OPTSIM eller en extern modell. Ett exempel på en extern modell är Dynamics [18]. Dynamics har möjlighet att kommunicera och använda robotdynamiken i de avancerade robotmodeller som framtagits inom projekt *Teknisk Hotsystemanalys*. I simuleringarna presenterade i denna rapport används en annan extern modul som skapats för att på bästa sätt simulera banan hos en markbaserad pv-robot. I detta fallet beskrivs projektilens rörelse i slutfasen med hjälp av syftbäringsstyrning [19] med en begränsad lateral acceleration styrd av g_{max} på 40g. Ingångsdata till Robotdynamikblocket finns beskriven i tabell 8, Appendix A.

3.3 GLCM TM

De statiska och dynamiska robotsimuleringar som gjorts i OPTSIM miljön (beskriven ovan) använder en specifik målföljare men med inställningsmöjligheter som har utprovats mer på känsla än med ett systematiskt tillvägagångssätt. Resultaten är förmodligen ändå tillförlitliga men för att verifiera detta har en målföljaroberoende metod för utvärdering av målföljbarheten i bildsekvenser eller enstaka bilder använts. Metoden bygger på att intensitet och struktur i målet och i bakgrunden beräknas genom så kallade grånivåstrukturmatriser (GLCM) [20, 21]. Genom att jämföra GLCM för målet med GLCM för bakgrunden kan en målföljbarhet beräknas (GLCM TM). Den här metoden ger förutom en möjlighet att värdera målföljbarheten dessutom en möjlighet att jämföra signaturer i simuleringar med de som erhållits vid fältförsök och det går på så sätt att validera simuleringsresultaten.

4 Resultat och diskussion

En pv-robotattack mot en stridsfordonspluton bestående av 3 stridsfordon på en linje och ett inbördesavstånd på 50 meter har studerats med hjälp av den simuleringsmetodik som beskrivs ovan. Simuleringar har först utförts mot stridsfordon utan motmedelsåtgärder för att se att robotmodellen beter sig på avsett sett i en ostörd miljö. Sex olika fall har studerats. Dessa fall består dels av tre olika anfallsvinklar: top attack 30°, top attack 15° och direct fire, och för varje anfallsvinkel har en simulering gjorts med fordonet stillastående och en simulering har gjorts med fordonet i rörelse (10 m/s i negativ x-riktning). Beräkningar av när roboten skall börja svänga för att erhålla angivna top attack-vinklar (se figur 4 och ekvation 4) utgår ifrån att roboten styr maximalt när den börjar svänga (detta är t.ex. fallet om hundkurvestyrning skulle användas). Den styrprincip som använts vid simuleringarna (syftbäringsstyrning) innebär dock att roboten använder förändringar av målsökarens utvridning i förhållande till robotkroppen för att styra robotkroppen och det tar därför lite extra tid för roboten att svänga in mot målet. Resultatet av detta blir att anfallsvinkeln i slutskedet blir ca. 5° större än den önskade vinkeln. Varje simuleringsfall har utförts med 5 olika aspektvinklar: rakt framifrån (0°), snett framifrån (45°), rakt från sidan (90°), snett bakifrån (135°) och rakt bakifrån (180°). Efter de ostörda simuleringarna har samma typer av simuleringar utförts i en störd miljö (dock har banprofilen i vissa fall begränsats till top attack 15°). Som störning har simulerad multispektral vattendimma använts. Tre olika kontraster hos vattendimman har studerats. Simuleringar har gjorts både i dynamiska scenarier där målsökarens val av målposition har fått bestämma robotens bana och med ideala robotbanor. Det dynamiska scenariot har analyserats för att se var roboten träffar målet eller om den inte träffar har robotbanan och sekvenser som visar vad målsökaren ser analyserats för att finna orsaken till detta. Målsökarsekvenser från de ideala robotbanorna har också analyserats dels med hjälp av multipla målföljare där målpålåsningspunkter har valts systematiskt i ett område kring målet. Detta för att studera hur känslig målföljaren är för val av mållåsningspunkt. De ideala robotsimuleringarna kan inte ge information om vad som sker i slutet av robotbanan, eftersom innehållet inom synfältet är förutbestämt av robotbanan, utan slutsatser måste begränsas till vad som sker under den del av händelseförloppet där målet upptar en mindre del av synfältet. Förutom analys med målsökarsimuleringar har några sekvenser analyserats med hjälp av GLCM TM (gray-level co-occurrence matrix trackability metric) för att studera om det finns möjlighet att konstruera en målföljare som klarar att följa stridsfordonet, även då störningen är aktiverad.

4.1 Utan vattendimma

Simuleringar utan vattendimma har gjorts för samtliga geometriska konfigurationer: top attack 30°, top attack 15° och direct fire, samt både med stillastående fordon och med fordonen i rörelse (10 m/s). Simuleringarna består av känslighetsanalyser av pålåsningsposition i sekvenser där robotbanan är ideal. Det vill säga robotdynamikmodellen har alltid fått exakt information om var centrum av målet befinner sig i bilden. En del av resultatet från dessa känslighetsanalyser finns redovisade i figur 7 - 9. Känslighetsanalysen är gjord genom att välja varje bildelement inom ett område (som gott och väl täcker målet) som pålåsningspunkt och sedan göra en målföljningssimulering för varje sådan pålåsningspunkt. Det betyder att antalet målföljningssimuleringar per sekvens varierar mellan 100 och 1200 beroende på aspektvinkel och avstånd vid pålåsning. Scenarierna är genererade med hjälp av datormodeller och avståndet mellan robot och mål kan därför hela tiden loggas och utnyttjas vid analysen. Genom att utnyttja information om avstånd i känslighetsanalysen kan det projicerade transversella avståndet från målföljaren till centrum av målet hela tiden beräknas och användas som kriterium på om målföljningen är lyckad eller ej. Vid denna beräkning tas ej hänsyn till om markytan är vinkelrät mot infallsriktningen för roboten eller ej och det verkliga avståndet kan därför vara större. En något missvisande bild kan därför ges vid analysen eftersom, speciellt vid små anfallsvinklar i höjdled, det vertikala avståndet blir större i verkligheten än beräknat. När det projicerade avståndet håller sig inom 5 meter från centrum på fordonet under hela sekvensen är sannolikheten dock ganska hög att låsningpunkten har hållit sig på fordonet men det är inte helt säkert. Avståndet ges också bara till det mittersta stridsfordonet och om roboten låser över på ett av de andra två målen kommer detta inte att registreras vid den automatiska analysen utan registreras som miss. Därför måste det automatiskt beräknade resultatet kombineras med en manuell observation vid uppspelning av sekvensen där alla målföljare är inritade för att se om resultatet ser riktigt ut eller ej.

Resultatet av känslighetsanalysen visar att roboten i de flesta fall kan träffa stridsfordonet utan större problem. Ett undantag är när yawvinkeln är 90°. I detta fall har målföljaren ofta mer än ett fordon i synfältet och låspunkten tenderar att hoppa mellan dessa mål och den automatiserade känslighetsanalysen tolkar detta som miss, en manuell studie av sekvensen visar dock att det är fler än de röda målföljarna i figurerna som låser på något av målen under hela sekvensen. Ett annat undantag erhålles för yawvinkeln 135° när fordonen är i rörelse. Det avvikande resultatet i detta fall beror på att det stridsfordon som roboten låst på rör sig på ett sådant sätt att det försvinner bakom en kulle under en kort tidperiod i början av sekvensen varvid målföljaren låser över på någon detalj i terrängen och hittar sedan inte tillbaka till stridsfordonet när detta dyker upp igen. Om låsning sker efter det att fordonet passerat kullen är det dock inte något problem att hålla låsning.



Figur 7 Känslighetsanalys av målföljning från avstånd 800 m utan vattendimma med yawvinkel 0° (överst), 45°, 90°, 135° och 180° (nederst). Bilderna visar den första bilden i sekvensen i vilken pålåsningspunkter väljs. Varje färgat bildelement visar positionen av en pålåsningspunkt. Färgkodningen röd visar vilka pålåsningspunkter som resulterar i att målföljning sker inom ett projicerat avstånd på 5 m från centrum av målet under hela sekvensen och blå visar att målföljningen i minst en bild i sekvensen har legat utanför denna radie. Det gröna +-tecknet visar centrum av målet. (a) Referensbild utan markerade pålåsningspunkter, (b) Resultat med stillastående stridsfordon och "top attack 30°", (c) stridsfordon i rörelse (10 m/s) "top attack 30°", (d) Resultat med stillastående stridsfordon och "top attack 15°", (e) stridsfordon i rörelse (10 m/s) "top attack 15°", (f) Resultat med stillastående stridsfordon och "direct fire". Observera att för aspektvinkeln 90° är träffsannolikheten mycket större än vad som framgår av figuren eftersom målföljarna ofta växlar mellan de tre fordonen och den automatiska analysen tolkar detta som att den tappar låsning.



Figur 8 Känslighetsanalys av målföljning från avstånd 1600 m utan vattendimma med yawvinkel 0° (överst), 45°, 90°, 135° och 180° (nederst). Bilderna visar den första bilden i sekvensen i vilken pålåsningspunkter väljs. Varje färgat bildelement visar positionen av en pålåsningspunkt. Färgkodningen röd visar vilka pålåsningspunkter som resulterar i att målföljning sker inom ett projicerat avstånd på 5 m från centrum av målet under hela sekvensen och blå visar att målföljningen i minst en bild i sekvensen har legat utanför denna radie. Det gröna +-tecknet visar centrum av målet. (a) Referensbild utan markerade pålåsningspunkter, (b) Resultat med stillastående stridsfordon och "top attack 30°", (c) stridsfordon i rörelse (10 m/s) "top attack 15°", (f) Resultat med stillastående stridsfordon och "top attack 15°", (e) stridsfordon i rörelse (10 m/s) "top attack 15°", (f) Resultat med stillastående stridsfordon och "direct fire", (g) stridsfordon i rörelse (10 m/s) "direct fire". Observera att för aspektvinkeln 90° är träffsannolikheten mycket större än vad som framgår av figuren eftersom målföljarna ofta växlar mellan de tre fordonen och den automatiska analysen tolkar detta som att den tappar låsning.



Figur 9 Känslighetsanalys av målföljning från avstånd 2500 m utan vattendimma med yawvinkel 0° (överst), 45°, 90°, 135° och 180° (nederst). Bilderna visar den första bilden i sekvensen i vilken pålåsningspunkter väljs. Varje färgat bildelement visar positionen av en pålåsningspunkt. Färgkodningen röd visar vilka pålåsningspunkter som resulterar i att målföljning sker inom ett projicerat avstånd på 5 m från centrum av målet under hela sekvensen och blå visar att målföljningen i minst en bild i sekvensen har legat utanför denna radie. Det gröna +-tecknet visar centrum av målet. (a) Referensbild utan markerade pålåsningspunkter, (b) Resultat med stillastående stridsfordon och "top attack 30°", (c) stridsfordon i rörelse (10 m/s) "top attack 30°", (f) Resultat med stillastående stridsfordon och "top attack 15°", (e) stridsfordon i rörelse (10 m/s) "top attack 15°", (f) Resultat med stillastående stridsfordon och "direct fire", (g) stridsfordon i rörelse (10 m/s) "direct fire". Observera att för aspektvinkeln 90° är träffsannolikheten mycket större än vad som framgår av figuren eftersom målföljarna ofta växlar mellan de tre fordonen och den automatiska analysen tolkar detta som att den tappar låsning.

Känslighetsanalysen ovan ger ingen information om vad som sker i slutet av ett närmandeförlopp eftersom målföljarna inte kan gå längre än till kanten av bilden. Detta har ingen betydelse när avståndet är stort och bilden av stridsfordonet upptar en bråkdel av synfältet. För att få mer information om vad som kan hända i slutet av närmandeförloppet måste däremot helt dynamiska simuleringar genomföras där målsökaren tillsammans med robotdynamiken bestämmer hur bilderna skall genereras i sekvensen. Vid helt dynamiska scenarier är det inte resursmässigt möjligt att genomföra mer än enstaka simuleringar per simuleringsfall. De tiotusentals simuleringar som finns representerade i känslighetsanalysfigurerna ovan reduceras därför till en simulering per anfallsriktning i de helt dynamiska scenarierna. Resultatet av en helt dynamisk simulering analyseras dels genom att studera sekvensen som visar vad målsökaren ser under simuleringens gång och dels genom att studera robotbanan och se om och eventuellt var den skär målet. Några exempel på en sådan analys finns representerade i figur 10 - 12 för olika moder och tre olika avstånd.



Figur 10 Robotbanans skärning med stridsfordonet vid "top attack 30°" för olika skjutavstånd: 800 m (överst), 1600 m och 2500 m (underst). Yawvinkeln 0° och en pålåsningspunkt kring centrum av målet har använts.



Figur 11 Robotbanans skärning med stridsfordonet vid "top attack 15°" för olika skjutavstånd: 800 m (överst), 1600 m och 2500 m (underst). Yawvinkeln 0° och en pålåsningspunkt kring centrum av målet har använts. Det stora bomavståndet vid avståndet 800 meter beror på att prediktering i vertikalled inte använts och målsökaren vrids därför inte ut i tillräckligt snabb takt.



Figur 12 Robotbanans skärning med stridsfordonet vid "direct fire" för olika skjutavstånd: 800 m (överst), 1600 m och 2500 m (underst). Yawvinkeln 0° och en pålåsningspunkt kring centrum av målet har använts. Att roboten inte träffar målet när skjutavståndet är 2500 meter beror på att låspunkten inte valts inom det område som ger träff enligt känslighetsanalysen (se figur 9). Observera att detta område är mycket mindre vid "direct fire" än för "top attack 15°" och "top attack 30°".

På korta avstånd (800 m) och *top attack 30°* missar roboten men inte med mer än storleksordningen 1 m (förutom i 90° fallet där instabiliteter orsakade av flera identiska mål i synfältet och en prediktering av målsökarens position till nästa bild lätt leder till att roboten missar målet). Den marginella missen beror delvis på att roboten inte hinner upp till rätt höjd innan den måste börja svänga in mot målet och därmed finns det inte så mycket tid till att stabilisera roboten mot rätt träffpunkt. Effekten av detta förstärks i och med att det är svårt att centrera målet i slutskedet eftersom synfältet är så litet (stridsfordonet kan fylla hela robotens synfält när avståndet är så stort som 170 m). För att minska detta problem något skulle hundkurvestyrning kunna användas i slutfasen. Detta kan dock ge problem om stridsfordonet rör sig. I denna studie har det inte betraktats som så viktigt att visa att roboten verkligen kan

träffa mitt i målet både vid orörliga och rörliga mål men i och med att roboten kommer så nära finns det med största sannolikhet sätt att lösa detta problem. En känslighetsanalys visar att det inte är svårt att välja rätt låspunkt på detta avstånd.

Det är en viss skillnad i resultat mellan *top attack 15°* och de andra moderna för roboten. Vid *top attack 15°* gjordes målsökarutvridningen, till skillnad mot *top attack 30°*, utan prediktering i pitchled (prediktering gjordes dock alltid vid generering av sekvenser med ideala robotbanor). Roboten missar därför i nästan samtliga fall vid ett skjutavstånd på 800 m vilket beror på att roboten aldrig kommer upp på höjd innan den måste börja svänga in mot målet. Målsökarens utvridningsvinkel (i pitchled) per tidssteg bli då större än halva synfältet och målet kommer därför långsamt glida ur målföljarens blickfång. Vid en anfallsvinkel (yaw = 135°) träffar roboten men detta beror på att avfyringshöjden i detta fall var eleverad (80 m) för att målet skulle bli synligt för skytten. I *direct fire* har roboten inga problem vid korta avstånd trots att ingen prediktering sker i pitchled.

På stora avstånd (1600 m och 2500 m) och *top attack 30°* hinner roboten upp till höjden 150 meter utan problem och hinner stanna kvar på denna höjd i ett par sekunder. Träffbilden i detta fallet är mycket bättre än vid avståndet 800 m men roboten tenderar fortfarande att glida ut till kanten av fordonet mycket beroende på att roboten fortfarande styr in sig mot en förmodad träffpunkt när målsökaren slår över till centroidmålföljning. En känslighetsanalys visar att det inte är svårt att välja rätt låspunkt. Låspunkten måste dock ligga på målet vilket kan ge ett litet problem på det större avståndet eftersom det är så få bildelement som innehåller delar av målet. Med *top attack 15°* hinner roboten upp till höjden 150 meter vid avståndet 2500 m utan problem och hinner stanna kvar på denna höjd i ett par sekunder. På det något kortare avståndet (1600 m) hinner roboten nästan upp till rätt höjd innan den måste svänga. I båda fallen hinner dock målsökaren vrida sig i tillräcklig snabb takt utan att målpositionen måste prognosticeras. Roboten lyckas också något bättre att träffa mitt i målet än vad fallet var vid en anfallsvinkel på 30°. Även med *direct fire* klarar roboten av att träffa målet utan större problem.

Stridsfordonens hastighet (v = 0 m/s eller 10 m/s) påverkar inte resultatet nämnvärt.

4.2 Med vattendimma (negativ kontrast)

Med ett skjutavstånd på 800 meter och top attack 30° med dimma klarar målsökaren att bibehålla låsning ganska länge men tappar ofta i slutskedet eller när dimman driver över den kant där målföljaren har låst. I framifrånaspekt där dimman inte alls täcker kan detta resultera i träff även om de dynamiska scenarierna som genererats ofta resulterar i att roboten glider av målet i slutskedet. Däremot när roboten kommer in bakifrån eller från sidan har dimman bättre verkan även om känslighetsanalysen nedan tyder på att det är lätt att hitta en låspunkt där roboten håller låsning. Som har nämnts tidigare ger känslighetsanalysen dock endast tillförlitlig information när bilden av målet täcker en ganska liten del av synfältet vilket naturligtvis inte gäller i slutskedet av närmande förloppet (definitivt inte de sista 2-300 metrarna vid ett synfält på 1°). De dynamiska simuleringarna visar att det närmsta avståndet till stridsfordonen under robotbanan ofta inte är mycket större än storleksordningen 10 m. När aspektvinkeln i pitchled minskar ökar chanserna för roboten att träffa målet beroende på att dimman i detta fallet har varit optimerad för hot ovanifrån (se figur 16). Detta kan ses både i känslighetsanalysen och i de dynamiska simuleringarna. Vid attackvinkel 15° och direct fire används inte prediktering av målsökarutvridningen och precis som i det oindimmade fallet resulterar detta oftast i miss i 15° fallet. I direct fire fallet är dock detta förmodligen en fördel och den sämre täckningen av dimman för denna attackvinkel resulterar därför ofta i att roboten träffar målet trots att dimman är tillslagen.

Med skjutavstånd längre än 800 m (dvs 1600 och 2500 m) får dimman en mycket bättre effekt trots att den inte är optimerad för hotriktningen. Målföljaren har mycket svårt att behålla låsning efter det att dimman börjar synas eller åtminstone då den täcker större delen av stridsfordonet. Detta beror på att när dimman är i gång kommer det att vara svårt för målföljaren att låsa på stridsfordonet utan att dimman kommer in och stör korrelationskärnan (se figur 17 och 18 för exempel på hur dimman utvecklas vid längre pålåsningsavstånd). För kortare avstånd är det däremot lättare att hitta ej indimmade områden på stridsfordonet som korrelationskärnan ryms inom. I framifrån aspekter där dimman aldrig lyckas täcka stridsfordonet helt går det dock även vid ett avstånd på 1600 m (även om det inte är lätt) att hitta pålåsningspunkter där dimmans inflytande inte blir så stort (i de nedre partierna av målet) och det finns därför chans att hålla låsningen ända till träff, speciellt om attackvinkeln är liten.



Figur 13 Känslighetsanalys av målföljning från avstånd 800 m utan (u) och med (m) vattendimma med yawvinkel 0° (överst), 45°, 90°, 135° och 180° (nederst). Bilderna visar den första bilden i sekvensen i vilken pålåsningspunkter väljs. Varje färgat bildelement visar positionen av en pålåsningspunkt. Färgkodningen röd visar vilka pålåsningspunkter som resulterar i att målföljning sker inom ett projicerat avstånd på 5 m från centrum av målet under hela sekvensen och blå visar att målföljningen i minst en bild i sekvensen har legat utanför denna radie. Det gröna +-tecknet visar centrum av målet. (a) Referensbild utan markerade pålåsningspunkter, (b) Resultat med stillastående stridsfordon och "top attack 30°" utan dimma, (c) samma som (b) men med dimma, (d) Resultat med stillastående stridsfordon och "top attack 15°" utan dimma, (e) samma som (d) men med dimma, (f) Resultat med stillastående stridsfordon och "direct fire" utan dimma, (g) samma som (f) men med dimma. Observera att för aspektvinkeln 90° är träffsannolikheten ibland mycket större än vad som framgår av figuren eftersom målföljarna ofta växlar mellan de tre fordonen och den automatiska analysen tolkar detta som att den tappar låsning.



Figur 14 Känslighetsanalys av målföljning från avstånd 1600 m utan (u) och med (m) vattendimma med yawvinkel 0° (överst), 45°, 90°, 135° och 180° (nederst). Bilderna visar den första bilden i sekvensen i vilken pålåsningspunkter väljs. Varje färgat bildelement visar positionen av en pålåsningspunkt. Färgkodningen röd visar vilka pålåsningspunkter som resulterar i att målföljning sker inom ett projicerat avstånd på 5 m från centrum av målet under hela sekvensen och blå visar att målföljningen i minst en bild i sekvensen har legat utanför denna radie. Det gröna +-tecknet visar centrum av målet. (a) Referensbild utan markerade pålåsningspunkter, (b) Resultat med stillastående stridsfordon och "top attack 30°" utan dimma, (c) samma som (b) men med dimma, (d) Resultat med stillastående stridsfordon och "top attack 15°" utan dimma, (e) samma som (d) men med dimma, (f) Resultat med stillastående stridsfordon och "direct fire" utan dimma, (g) samma som (f) men med dimma. Observera att för aspektvinkeln 90° är träffsannolikheten ibland mycket större än vad som framgår av figuren eftersom målföljarna ofta växlar mellan de tre fordonen och den automatiska analysen tolkar detta som att den tappar låsning.



Figur 15 Känslighetsanalys av målföljning från avstånd 2500 m utan (u) och med (m) vattendimma med yawvinkel 0° (överst), 45°, 90°, 135° och 180° (nederst). Bilderna visar den första bilden i sekvensen i vilken pålåsningspunkter väljs. Varje färgat bildelement visar positionen av en pålåsningspunkt. Färgkodningen röd visar vilka pålåsningspunkter som resulterar i att målföljning sker inom ett projicerat avstånd på 5 m från centrum av målet under hela sekvensen och blå visar att målföljningen i minst en bild i sekvensen har legat utanför denna radie. Det gröna +-tecknet visar centrum av målet. (a) Referensbild utan markerade pålåsningspunkter, (b) Resultat med stillastående stridsfordon och "top attack 30°" utan dimma, (c) samma som (b) men med dimma, (d) Resultat med stillastående stridsfordon och "top attack 15°" utan dimma, (e) samma som (d) men med dimma, (f) Resultat med stillastående stridsfordon och "direct fire" utan dimma, (g) samma som (f) men med dimma. Observera att för aspektvinkeln 90° är träffsannolikheten ibland mycket större än vad som framgår av figuren eftersom målföljarna ofta växlar mellan de tre fordonen och den automatiska analysen tolkar detta som att den tappar låsning.



Figur 16 Bilder vid olika aspekt vinklar (horisontellt och vertikalt) från närmande förloppet där pålåsningsavståndet varit 800 m. Roboten befinner sig på 300 meters avstånd från målet. (a) "Top attack 30°", (b) "Top attack 15°", (c) "Direct fire"



Figur 17 Bilder från närmande förlopp med "Top attack 15°" från olika avstånd och horisontella aspektvinklar där pålåsningsavståndet varit 1600 m.



Figur 18 Bilder från närmande förlopp med "Top attack 15°" från olika avstånd och horisontella aspektvinklar där pålåsningsavståndet varit 2500 m.

4.3 Vattendimma med olika kontrast (negativ, svagt negativ, svagt positiv) Simuleringar med olika kontraster har bara gjorts med en höjdprofil på roboten som svarar mot *top attack 15°* (se figur 19). Resultaten (figur 20 - 22) visar att när dimmans kontrast mot målet minskar är sannolikheten betydligt större att roboten kan hålla kvar låsning till dimmolnet och därmed också till ett område som ligger i närheten av stridsfordonet. I detta fallet ökar också risken för att roboten skall träffa målet betydligt. Detta resultat är tämligen generellt och gäller även om avståndet är stort. Ett avvikande resultat erhålles dock när den multispektrala vattendimman lyckas täcka hela fordonet. Simuleringsresultaten visar i dessa fall att roboten visserligen håller låsning till dimmolnet men att den har svårt att hålla kvar låsningen till en bestämd punkt på stridsfordonet och därmed minskar sannolikheten för träff ganska avsevärt. I de simuleringar som gjorts har dock dimman inte haft full täckning annat än i fallet då roboten kommer rakt bakifrån. Det skulle därför vara av värde att i fortsätta simuleringar optimera den multispektrala dimman efter vilken aspektvinkel som roboten kommer in mot målet.



Figur 19 Exempel på sekvenser från närmande förlopp ("top attack 15°) där MSD med olika kontrast använts i simuleringarna. (u) utan MSD, (--) negativ kontrast, (-) svagt negativ kontrast, (+) svagt positiv kontrast. Intensitetsskalan är konstant i de olika bilderna.



Figur 20 Känslighetsanalys av målföljning från avstånd 800 m utan (u), med vattendimma negativ kontrast (--), med vattendimma svagt negativ kontrast (-) och med vattendimma svagt positiv kontrast (+) med yawvinkel 0° (överst), 45°, 90°, 135° och 180° (nederst). Bilderna visar den första bilden i sekvensen i vilken pålåsningspunkter väljs. Varje färgat bildelement visar positionen av en pålåsningspunkt. Färgkodningen röd visar vilka pålåsningspunkter som resulterar i att målföljning sker inom ett projicerat avstånd på 5 m från centrum av målet under hela sekvensen och blå visar att målföljningen i minst en bild i sekvensen har legat utanför denna radie. Det gröna +-tecknet visar centrum av målet. (a) Referensbild utan markerade pålåsningspunkter, (b) Resultat med stillastående stridsfordon och "top attack 15°" utan dimma, (c) med dimma (--), (d) med dimma (-) och (e) med dimma (+). Observera att för aspektvinkeln 90° är träffsannolikheten ibland mycket större än vad som framgår av figuren eftersom målföljarna ofta växlar mellan de tre fordonen och den automatiska analysen tolkar detta som att den tappar låsning.



Figur 21 Känslighetsanalys av målföljning från avstånd 1600 m utan (u), med vattendimma negativ kontrast (--), med vattendimma svagt negativ kontrast (-) och med vattendimma svagt positiv kontrast (+) med yawvinkel 0° (överst), 45°, 90°, 135° och 180° (nederst). Bilderna visar den första bilden i sekvensen i vilken pålåsningspunkter väljs. Varje färgat bildelement visar positionen av en pålåsningspunkt. Färgkodningen röd visar vilka pålåsningspunkter som resulterar i att målföljning sker inom ett projicerat avstånd på 5 m från centrum av målet under hela sekvensen och blå visar att målföljningen i minst en bild i sekvensen har legat utanför denna radie. Det gröna +-tecknet visar centrum av målet. (a) Referensbild utan markerade pålåsningspunkter, (b) Resultat med stillastående stridsfordon och "top attack 15°" utan dimma, (c) med dimma (--), (d) med dimma (-) och (e) med dimma (+). Observera att för aspektvinkeln 90° är träffsannolikheten ibland mycket större än vad som framgår av figuren eftersom målföljarna ofta växlar mellan de tre fordonen och den automatiska analysen tolkar detta som att den tappar låsning.



Figur 22 Känslighetsanalys av målföljning från avstånd 2500 m utan (u), med vattendimma negativ kontrast (--), med vattendimma svagt negativ kontrast (-) och med vattendimma svagt positiv kontrast (+) med yawvinkel 0° (överst), 45°, 90°, 135° och 180° (nederst). Bilderna visar den första bilden i sekvensen i vilken pålåsningspunkter väljs. Varje färgat bildelement visar positionen av en pålåsningspunkt. Färgkodningen röd visar vilka pålåsningspunkter som resulterar i att målföljning sker inom ett projicerat avstånd på 5 m från centrum av målet under hela sekvensen och blå visar att målföljningen i minst en bild i sekvensen har legat utanför denna radie. Det gröna +-tecknet visar centrum av målet. (a) Referensbild utan markerade pålåsningspunkter, (b) Resultat med stillastående stridsfordon och "top attack 15°" utan dimma, (c) med dimma (--), (d) med dimma (-) och (e) med dimma (+). Observera att för aspektvinkeln 90° är träffsannolikheten ibland mycket större än vad som framgår av figuren eftersom målföljarna ofta växlar mellan de tre fordonen och den automatiska analysen tolkar detta som att den tappar låsning.

4.4 Stridsfordon i rörelse (v = 10 m/s) med vattendimma

Simuleringar med stridsfordon i rörelse har bara gjorts med en höjdprofil på roboten som svarar mot *top attack 15°* och med en negativ kontrast på vattendimman. Fordonets hastighet bidrar till den effektiva vindhastigheten kring fordonet och gör att dimmans transmission blir mindre än om fordonet står stilla. Motmedelsmodellen (MUSS) tar inte automatiskt hänsyn till detta utan detta simuleras genom att öka vindstyrkan från 5 m/s till 15 m/s. Detta blir dock inte helt rätt eftersom MUSS använder sig av en vindprofil som har den ansatta vindhastigheten på höjden 10 m över marken men som sedan tar hänsyn till att vindhastigheten minskar närmare marken. Ett bättre sätt att simulera effekten av fordonets rörelse skulle vara att använda ett offset på vindstyrkan men detta är för närvarande inte implementerat i modellen. Den effektiva vindhastigheten blir, med den implementerade metoden, något låg vid fordonet och transmissionen blir därmed något mindre än den skulle bli i verkligheten.

Resultatet visade sig inte påverkas nämnvärt av om stridsfordonen rör sig eller inte för korta avstånd (800 m) och riktigt långa avstånd (2500 m). Den icke optimerade dimman hade på korta avstånd redan utan att fordonet rörde sig problem med att hindra målföljning och det blir inte bättre av att dimmans transmission försämras. Ett undantag observerades dock för horisontalaspekten rakt bakifrån (180°) där en ganska låg anfallsvinkel i pitch-led gör att målföljaren måste penetrera nästan lika mycket dimma som för det stillastående fordonet och därmed påverkas transmissionen endast i ringa grad, däremot gör fordonets hastighet att det kommer in i dimmolnet fortare och robotmålföljaren tappar därmed också låsning snabbare. På det största avståndet (2500 m) är det som nämnts tidigare inte lika viktigt med en heltäckande dimma utan den kan genom sin blotta närvaro göra att målföljning störs, detta visade sig gälla även med ett fordon i rörelse. Den största avvikelsen i resultat mellan fordon utan och med rörelse noterades för mellanavståndet (1600 m) där möjligheterna att följa målet hela vägen ökade och målföljning blev möjlig med lågt hållna pålåsningspunkter. Eventuellt skulle denna möjlighet kunna tas bort om en dimma som var optimerad för hotriktningen används.



Figur 23 Känslighetsanalys av målföljning med "top attack 15°" från avstånd 800 m utan (u), med vattendimma negativ kontrast (m), samt med stridsfordonen stillastående (0 m/s) eller i rörelse (10 m/s) med yawvinkel 0° (överst), 45°, 90°, 135° och 180° (nederst). Bilderna visar den första bilden i sekvensen i vilken pålåsningspunkter väljs. Varje färgat bildelement visar positionen av en pålåsningspunkt. Färgkodningen röd visar vilka pålåsningspunkter som resulterar i att målföljning sker inom ett projicerat avstånd på 5 m från centrum av målet under hela sekvensen och blå visar att målföljningen i minst en bild i sekvensen har legat utanför denna radie. Det gröna +-tecknet visar centrum av målet. (a) Referensbild utan markerade pålåsningspunkter, (b) Resultat med stillastående stridsfordon och "top attack 15°" utan dimma, (c) med dimma (m), (d) med stridsfordon i rörelse (10 m/s) utan dimma och (e) med dimma. Observera att för aspektvinkeln 90° är träffsannolikheten ibland mycket större än vad som framgår av figuren eftersom målföljarna ofta växlar mellan de tre fordonen och den automatiska analysen tolkar detta som att den tappar låsning.



Figur 24 Känslighetsanalys av målföljning med "top attack 15°" från avstånd 1600 m utan (u), med vattendimma negativ kontrast (m), samt med stridsfordonen stillastående (0 m/s) eller i rörelse (10 m/s) med yawvinkel 0° (överst), 45°, 90°, 135° och 180° (nederst). Bilderna visar den första bilden i sekvensen i vilken pålåsningspunkter väljs. Varje färgat bildelement visar positionen av en pålåsningspunkt. Färgkodningen röd visar vilka pålåsningspunkter som resulterar i att målföljning sker inom ett projicerat avstånd på 5 m från centrum av målet under hela sekvensen och blå visar att målföljningen i minst en bild i sekvensen har legat utanför denna radie. Det gröna +-tecknet visar centrum av målet. (a) Referensbild utan markerade pålåsningspunkter, (b) Resultat med stillastående stridsfordon och "top attack 15°" utan dimma, (c) med dimma (m), (d) med stridsfordon i rörelse (10 m/s) utan dimma och (e) med dimma. Observera att för aspektvinkeln 90° är träffsannolikheten ibland mycket större än vad som framgår av figuren eftersom målföljarna ofta växlar mellan de tre fordonen och den automatiska analysen tolkar detta som att den tappar låsning.



Figur 25 Känslighetsanalys av målföljning med "top attack 15°" från avstånd 2500 m utan (u), med vattendimma negativ kontrast (m), samt med stridsfordonen stillastående (0 m/s) eller i rörelse (10 m/s) med yawvinkel 0° (överst), 45°, 90°, 135° och 180° (nederst). Bilderna visar den första bilden i sekvensen i vilken pålåsningspunkter väljs. Varje färgat bildelement visar positionen av en pålåsningspunkt. Färgkodningen röd visar vilka pålåsningspunkter som resulterar i att målföljning sker inom ett projicerat avstånd på 5 m från centrum av målet under hela sekvensen och blå visar att målföljningen i minst en bild i sekvensen har legat utanför denna radie. Det gröna +-tecknet visar centrum av målet. (a) Referensbild utan markerade pålåsningspunkter, (b) Resultat med stillastående stridsfordon och "top attack 15°" utan dimma, (c) med dimma (m), (d) med stridsfordon i rörelse (10 m/s) utan dimma och (e) med dimma. Observera att för aspektvinkeln 90° är träffsannolikheten ibland mycket större än vad som framgår av figuren eftersom målföljarna ofta växlar mellan de tre fordonen och den automatiska analysen tolkar detta som att den tappar låsning.

4.5 GLCM TM beräkningar

För att beräkna målföljbarheten med en målföljaroberoende princip har GLCM TM (se avsnitt 3.3 och referens [20] och [21]) använts i sekvenser i *top aspect 15°* och två olika aspektvinklar (yaw - rakt framifrån och rakt bakifrån) med de tre olika kontraster för dimman negativ, svagt negativ och svagt positiv (figur 26b-d). Som referens har motsvarande beräkningar också gjorts för ett oindimmat stridsfordon (figur 26a). Beräkningarna är gjorda för närmandeförlopp från 2500 meter.

GLCM TM beräkningarna bekräftar robotsimuleringarnas resultat som visade att om MSD används är det svårare att följa målet i bakifrånaspekt än i framifrånaspekt. Detta beror, som diskuteras tidigare, på att dimman inte täcker målet så bra i framifrånaspekt. Vidare tyder resultaten på att det är ganska lätt att följa målet när dimmans kontrast är negativ medan målföljbarheten går ner ganska kraftigt vid en kontrast på dimman som är svagt negativ eller positiv. Detta svarar inte mot de resultat som erhållits i robotsimuleringarna som gjorts ovan. För att erhålla en förklaring till varför målsökarsimuleringarna inte motsvarar resultatet av GLCM TM beräkningarna har kontrastberäkningar enlig ekvation 5 också utförts för de olika sekvenserna (figur 27). Dessa visar att, för sekvensen med negativ kontrast på dimman, ändrar sig kontrasten för målregionen relativt bakgrundsregionen radikalt när dimman går igång vilket gör att målföljaren, i robotmodellen som beskrivs ovan, tappar låsning direkt. Om pålåsning istället hade skett efter det att dimman utvecklats över fordonen tyder GLCM TM beräkningarna på att det finns goda möjligheter att erhålla fortsatt låsning på ett område i närheten av stridsfordonet. Dimma eller rök är dock inte statisk utan förändrar sig över tiden och det behövs därför fortsatta målföljarsimuleringar för att se om en konkret målföljare klarar att följa målet när dimman är igång om pålåsning sker efter att dimman startat.

$$C(n) = \frac{\left\langle I_{t \operatorname{arg} et}(n) \right\rangle - \left\langle I_{backgrou}(n) \right\rangle}{I_{\max}(n) - I_{\min}(n)}$$

Ekvation 5

där

| C(n) | = | kontrasten i bild n av sekvensen |
|--------------|---|--|
| $$ | = | medelintensiteten i målregionen i bild n av sekvensen |
| $$ | = | medelintensiteten i bakgrundsregionen i bild n av sekvensen |
| $I_{max}(n)$ | = | maximal intensitet i den kombinerade bakgrunds och målregionen |
| | | för bild n av sekvensen |
| $I_{min}(n)$ | = | minimal intensitet i den kombinerade bakgrunds och målregionen |
| | | för bild n av sekvensen |



Figur 26 GLCM TM resultat för top aspect 15° och aspektvinkeln (yaw) rakt framifrån och rakt bakifrån (a) ett oindimmat stridsfordon, (b) multispektral vattendimma med negativ kontrast, (c) multispektral vattendimma med svagt negativ kontrast, (d) multispektral vattendimma med svagt positiv kontrast.



Figur 27 Kontrastberäkningar för top aspect 15° och aspektvinkeln (yaw) rakt framifrån och rakt bakifrån (a) ett oindimmat stridsfordon, (b) multispektral vattendimma med negativ kontrast, (c) multispektral vattendimma med svagt negativ kontrast, (d) multispektral vattendimma med svagt positiv kontrast. Kontrasten har beräknats enligt ekvation 5.

Resultaten från simuleringar med svagt positiv kontrast visar att robotmålföljaren klarar att bibehålla låsning till ett område i närheten av målet trots att GLCM beräkningar visar att målföljbarheten går ner något. För att studera detta fenomen har en GLCM TM beräkning utförts som funktion av position i bilden i stället för som i figur 26 som funktion av bild i sekvensen. I detta fall jämförs målregionens GLCM med en bakgrundsregion som har samma storlek och form som målregionen och som nu flyttas till olika positioner i bilden för att hitta de områden i bakgrunden som är mest mållika (se referens [22] för mer detaljer om hur en beräkning går till). GLCM för målet beräknas för motsvarande bild i en sekvens utan vattendimma medan GLCM för bakgrunden beräknats för den aktuella sekvensen. I figur 28 visas resultatet av en sådan beräkning från framifrånaspekt med negativ och svagt positiv kontrast på dimman. Beräkningen visar att det mest mållika området i bilden där dimman har svagt positiv kontrast ligger nära målets verkliga position medan resultatet för bilden med negativ kontrast visar att området kring målet är betydligt mindre mållikt och det finns områden en bit från målet som är bättre målkandidater. Detta förklarar resultaten från robotsimuleringarna där roboten tappar följning på mål där dimman har negativ kontrast men håller kvar låsning till området kring målet när kontrasten är svagt positiv.



Figur 28 GLCM TM som funktion av position i bilden. (a) visar en simulerad IR-bild utan vattendimma och med målet markerad med en röd kant, (b) visar motsvarande IR-bild med dimma med negativ kontrast mot bakgrunden, (c) visar GLCM TM resultat för bild (b), (d) visar IR-bild med dimma med svagt positiv kontrast mot bakgrunden och (e) visar motsvarande GLCM TM resultat. Resultaten i (c) och (e) har erhållits genom att använda GLCM för det oindimmade målet i bild (a). Dessa resultat har beräknats med en ganska grov steglängd i bilden (10 bildelement både i vertikal- och horisontalled) förutom i ett område kring målet där steglängden varit 2 bildelement i båda riktningarna. Ett ljusare parti i resultatbilderna motsvarar ett mer mållikt område än ett mörkt.

5 Validering av simuleringsresultat

För att värdera giltigheten av de slutsatser som dras i denna rapport är det viktigt att kunna jämföra de simulerade sekvenserna med verkliga sekvenser. Problemet är att de registreringar som gjorts med multispektral vattendimma inte är gjorda i en terrängbakgrund som är modellerad och därmed användbar i simuleringssammanhang. I detta fallet är simuleringar gjorda i en modellerad terrängbakgrund inom ett 1x2 km² stort område kring FOI i Linköping medan registreringar är gjorda på ett helt annat område i Umeå. Det går därför inte att titta på detaljer i bilden och genom direkt observation säga att de simulerade sekvenserna överensstämmer med de registrerade. Vad som däremot går att göra är att jämföra GLCM TM resultat från simulerade sekvenser med motsvarande resultat från registrerade sekvenser. Beräkningar har tidigare gjorts på sekvenser uppmätta från en helikopter som närmat sig stridsfordon stående på marken både med och utan vattendimma [22]. Dessa resultat visas i figur 29. Dimman täckte i detta fallet stridsfordonet helt och det är därför med simuleringar i närmandeförlopp från baksidan av stridsfordonet som dessa data skall jämföras i första hand. Sekvenserna är inte helt jämförbara eftersom anfallsvinkel, avstånd, starttid för vattendimman och synfält skiljer något mellan de två fallen men jämförelsen ger ändå en bra indikation om hur tillförlitliga simuleringsresultaten är. Jämförelsen visar att GLCM TM resultaten från de simulerade sekvenserna ligger en liten bit över resultaten från de registrerade sekvenserna. Detta betyder att resultaten från simuleringarna kan ses som värsta fall scenarier, dvs. klarar den simulerade dimman att skyla fordonen kan detta resultat även förväntas i ett verkligt fall.



Figur 29 Till vänster är GLCM TM resultat från uppmätta IR-sekvenser. Röd kurva visar resultat där stridsfordonent använt dimma från och med bildindex ~900. Medan blå kurva visar motsvarande resultat där stridsfordonet inte använt MSD. Till höger är samma kurvor som i figuren till vänster men nu är också data från figur 26 (bakifrånaspekt) inritade (utan dimma - tjock blå, och med dimma - tjock röd) (data från både de simulerade och registrerade sekvenserna är filtrerade för att ge jämnare kurvor).

6 Sammanfattning och slutsatser

En simuleringsstudie har utförts med syfte att utvärdera effekten av multispektral vattendimma som skylande motmedel i en duell mellan en pv-robot och ett stridsfordon. Robotmodellen har utgått från kända data från den amerikanska pv-roboten Javelin. Dessa öppna data har kompletterats med uppskattningar om vad som kan vara rimligt för en robot med Javelinrobotens prestanda. Simuleringar har utförts både med ideala robotbanor och helt dynamiska scenarier där, i det senare fallet, målsökaren och robotdynamiken avgör robotens bana och hur bildsekvenser genereras. De dynamiska scenarierna har använts för analys av framförallt slutskedet av händelseförloppet. Ideala robotbanor innebär att robotens målsökare hela tiden får information om målet verkliga position men att den i övrigt styr som i den helt dynamiska simuleringen. Sekvenser genererade med ideala robotbanor kommer därmed nästan alltid att ha målet centrerat i målsökaren och sekvenserna lämpar sig därmed till känslighetsanalyser där pålåsningspunkter väljs systematiskt inom ett område kring stridsfordonen. Förutom dessa känslighetsanalyser har några av sekvenserna med de ideala robotbanorna analyserats med en modell för bildanalys som ger ett kvalitativt mått på hur lätt det är att följa målet under sekvensen (GLCM TM).

Ett antal olika simuleringar har gjorts utan vattendimma för att verifiera att roboten kan träffa i det ostörda fallet. Simuleringar har gjorts med olika inställningar för roboten vad avser bl.a. höjdprofil. För de olika höjdprofilerna har sedan fem olika horisontella aspektvinklar använts i simuleringarna. Samma scenarier fast nu med multispektral vattendimma för att skyla stridsfordonen har sedan utförts för att värdera effekten av dimman. En av höjdprofilerna har också använts i simuleringar för att testa effekten av dimmans kontrast samt effekten av att stridsfordon befinner sig i rörelse.

I denna inledande simuleringsstudie har dimman inte varit optimerad för den aktuella hotriktningen utan har i stället varit optimerad för en hotriktning som motsvarar en attack från en slutfasstyrd granat med en ganska brant infallsvinkel mot stridsfordonen. Resultatet visar att detta kan ge ett tillräckligt skydd även mot en pv-robot, som har en flackare bana, under vissa förutsättningar. Dessa förutsättningar är att dimman har en kontrast som markant avviker från stridsfordonet samt att pålåsning sker från ett ganska stort avstånd innan dimman aktiverats. När pålåsningsavståndet minskar till 800 meter har dimman fortfarande ganska goda möjligheter att skydda fordonet om roboten kommer in med en ganska brant anfallsvinkel (storleksordningen 30°). I de flacka robotbanorna < 15-20° ökar dock risken för att roboten skall träffa. När kontrasten av dimman mot målet är (negativt) stor kommer roboten, speciellt vid stora pålåsningsavstånd, att påverkas starkt och söka sig till oindimmade delar av terrängen vilket därmed kan resultera i ganska stora bomavstånd. Vid minskade kontraster mot målet (varm dimma) tappar visserligen målsökaren ofta låsning till en viss punkt på målet men håller sig och andra sidan inom dimmolnet vilket om det inte resulterar i träff åtminstone minskar bomavståndet. Slutsatserna i detta fallet är att den varma dimman ger ganska gott skydd mot roboten om dimman helt täcker målet och inte lämnar stora delar av stridsfordonet oindimmat.

Ett fordon i rörelse ökar transmissionen genom dimman, åtminstone i vissa aspektvinklar, och ökar därmed också sannolikheten för att roboten skall träffa målet. Redan utan att fordonen rör sig har roboten en god möjlighet att träffa fordonet för korta skjutavstånd (speciellt om en flack robotbana används). Simuleringar visar att detta kritiska avstånd ökar om fordonet rör sig. Fordonets rörelse är dock inte alltid till nackdel eftersom det också innebär att det kommer snabbare in i dimmolnet och med en anfallsvinkel rakt bakifrån visar det sig att roboten tappar låsning snabbare än om fordonet står still.

Resultat av en målföljbarhetsberäkning med en metod som inte är beroende av typen av målföljare bekräftar vid en noggrann inspektion resultaten från robotsimuleringarna. Dessa beräkningar tyder dock på att om dimman uppvisar en stor kontrast mot bakgrunden blir det lätt att följa dimman under förutsättning att pålåsning sker efter det att dimman är fullt utvecklad.

Målföljbarhetsberäkningar ger förutom en värdering av multispektral vattendimma som motmedel också en möjlighet att jämföra de beräknade resultaten med resultat från registrerade sekvenser av stridsfordon med och utan multispektral vattendimma som skyl. Denna jämförelse pekar på att det är något lättare för en målföljare att följa stridsfordonen i de simulerade sekvenserna än sekvenserna registrerade vid fältförsök och visar att resultaten från simuleringarna kan tolkas som *värsta fall scenarier*.

I fortsatta simuleringar bör arbetet koncentreras till att utröna huruvida en mer optimerad konfiguration av munstycken för generering av multispektral vattendimma kan ge ökad skyddseffekt vid korta pålåsningsavstånd och/eller liten kontrast mellan dimman och stridsfordonen. Andra detaljer som skulle behöva studeras närmre är t ex effekten av en ökad bildfrekvens i simuleringarna. Den bildfrekvens som använts vid dessa simuleringar (25 Hz) är förmodligen något låg och det kan därför även vara av intresse att öka den för att se hur det påverkar utgången av simuleringarna. En detalj som inte alls beaktats i denna studie är effekten av hur snabbt ett varnar- och motverkanssystem (VMS) på stridsfordonet kan starta systemet för multispektral vattendimma. Redan denna studie, där systemet startat omedelbart efter att roboten avfyrats, visar att sannolikheten för träff är större på korta avstånd (800 m) mycket beroende på att roboten befinner sig ganska nära fordonet när dimman är fullt utvecklad. På större avfyringsavstånd (1600 och 2500 m) har detta inte varit något hinder, men om varningstiden förlängs kan detta naturligtvis leda till problem även vid dessa avstånd. Den begränsade vattenmängden som kan medföras på ett stridsfordon gör användning av multispektral vattendimma i förebyggande syfte mindre sannolik men det kan likväl vara av intresse att studera möjligheten att låsa på stridsfordonen när dimman redan är utvecklad. Detta fall kan exempelvis inträffa då en pv-robot skjuts iväg efter att stridsfordonet har fått varning från en tidigare robotavfyring och därmed redan startat dimsystemet.

Förutom resultat avseende den multispektrala vattendimmans verkningsgrad mot den specifika roboten som simulerats har en utvärderingsmetodik för värdering av döljande eller maskerande åtgärder på en plattform utkristalliserats i detta arbete. Den optimala formen hos denna metodik har inte använts fullt ut under detta arbetet men vid liknande studier i framtiden bör följande schema användas.

- 1. Trimma robotmodell i ostörda robotsimuleringar både vad avser styrning och målföljning.
- 2. Ta fram bildsekvenser med ideala robotbanor.
- 3. Genomför GLCM TM beräkningar på bildsekvenser med ideala robotbanor.
- 4. Om tillgång finns till registrerade bildsekvenser under närmandeförlopp, jämför GLCM TM resultat för de verkliga sekvenserna med resultat från simulerade sekvenser. Om avvikelsen är oacceptabel förbättra scenariogenerering i simuleringar.
- 5. Genomför en känslighetsanalys med multipla pålåsningspunkter i sekvenser framtagna med ideala robotbanor.
- 6. Om det visar sig att någon mållåsningspunkt ger träff välj en eller ett par av dessa och använd dessa i dynamiska scenarier för att se hur roboten beter sig i slutskedet av närmandeförloppet och hur den träffar målet.
- 7. Om resultat från GLCM TM och robotsimuleringar avviker från varandra analysera GLCM TM resultat noggrannare för att se om logisk förklaring kan erhållas till avvikelsen. I annat fall gå tillbaka till punkt 1 och inkludera eventuellt också störda robotsimuleringar.
- 8. Genomför punkt 2-7 för både ostört och stört fall för att erhålla en värdering av motmedlets eller maskeringens effekt.

Appendix A - ingångsparametrar till modeller i OPTSIM simuleringar

Följande tabeller anger de inställningar som har använts i respektive program vid simuleringarna. För mer ingående information om de olika parametrarna hänvisas till referenser om respektive modell.

| Parameter | Värde | Enhet |
|-------------------------|-------|-----------------|
| Vertikalt synfält | 1 | 0 |
| Horisontalt synfält | 1 | 0 |
| Bildelement vertikalt | 64 | st |
| Bildelement horisontalt | 64 | st |
| λ | 8-12 | μm |
| Frequency | 25 | s ⁻¹ |

Tabell 2 Parametrar i OPTSIM som inte ändras mellan simuleringar.

Tabell 3 Parametrar i MUSS för plymer. Gemensamt för alla munstycken.

| Parameter | Värde | Enhet |
|------------------------|--------------------------------------|--------------------|
| Material | Rent vatten | - |
| Partikelradie | 20 | μm |
| Densitet | 1 | g cm ⁻³ |
| Extinctionskoefficient | 82.5 | $m^2 kg^{-1}$ |
| Single scatter albedo | 0.670275 | - |
| Starttid | 0 | σ |
| Dimmans temperatur | 12 (t=0s), 11 (t=5 s), 10 (t=10s) | °C |

| Position X | Position V | Position Z | Mass- emission | Sigma X | Sigma Y | Theta ^[°] | Phi [º] |
|---------------|---------------|---------------|-------------------|---------|---------|-------------------------|------------|
| [m] | [m] | [m] | [Kg/s] | | | LJ | LJ |
| -3.6 | -48.4 | -2.2 | 0.1 | 0.9 | 0.9 | 220 | -60 |
| -3.7 | -49.5 | -2.1 | 0.5 | 0.6 | 0.6 | 220 | 0 |
| -4.2 | -50 | -2.1 | 0.2 | 0.6 | 0.6 | 220 | 0 |
| -3.7 | -50.5 | -2.1 | 0.5 | 0.6 | 0.6 | 220 | 0 |
| -3.6 | -51.6 | -2.1 | 0.1 | 0.9 | 0.9 | 220 | 60 |
| -0.1 | -48.2 | -1.8 | 0.07 | 0.9 | 0.9 | 220 | -60 |
| 0 | -49.5 | -2.1 | 0.3 | 0.6 | 0.6 | 220 | 0 |
| -0.2 | -50 | -2.1 | 0.2 | 0.6 | 0.6 | 220 | 0 |
| 0.1 | -50.5 | -2.1 | 0.3 | 0.6 | 0.6 | 220 | 0 |
| -0.1 | -51.8 | -1.8 | 0.07 | 0.9 | 0.9 | 220 | 60 |
| -3.6 | 1.6 | -2.2 | 0.1 | 0.9 | 0.9 | 220 | -60 |
| -3.7 | 0.5 | -2.1 | 0.5 | 0.6 | 0.6 | 220 | 0 |
| -4.2 | 0 | -2.1 | 0.2 | 0.6 | 0.6 | 220 | 0 |
| -3.7 | -0.5 | -2.1 | 0.5 | 0.6 | 0.6 | 220 | 0 |
| -3.6 | -1.6 | -2.1 | 0.1 | 0.9 | 0.9 | 220 | 60 |
| -0.1 | 1.8 | -1.8 | 0.07 | 0.9 | 0.9 | 220 | -60 |
| 0 | 0.5 | -2.1 | 0.3 | 0.6 | 0.6 | 220 | 0 |
| -0.2 | 0 | -2.1 | 0.2 | 0.6 | 0.6 | 220 | 0 |
| 0.1 | -0.5 | -2.1 | 0.3 | 0.6 | 0.6 | 220 | 0 |
| -0.1 | -1.8 | -1.8 | 0.07 | 0.9 | 0.9 | 220 | 60 |
| -3.6 | 51.6 | -2.2 | 0.1 | 0.9 | 0.9 | 220 | -60 |
| -3.7 | 50.5 | -2.1 | 0.5 | 0.6 | 0.6 | 220 | 0 |
| -4.2 | 50 | -2.1 | 0.2 | 0.6 | 0.6 | 220 | 0 |
| -3.7 | 49.5 | -2.1 | 0.5 | 0.6 | 0.6 | 220 | 0 |
| -3.6 | 48.4 | -2.1 | 0.1 | 0.9 | 0.9 | 220 | 60 |
| -0.1 | 51.8 | -1.8 | 0.07 | 0.9 | 0.9 | 220 | -60 |
| 0 | 50.5 | -2.1 | 0.3 | 0.6 | 0.6 | 220 | 0 |
| -0.2 | 50 | -2.1 | 0.2 | 0.6 | 0.6 | 220 | 0 |
| 0.1 | 49.5 | -2.1 | 0.3 | 0.6 | 0.6 | 220 | 0 |
| -0.1 | 48.2 | -1.8 | 0.07 | 0.9 | 0.9 | 220 | 60 |

Tabell 4 Positioner av munstycken, samt data som varierar mellan munstyckena. Koordinaterna har valts med antagandet att stridsfordonen är parallella med x-axeln med fronten pekande i positiv riktning.

Tabell 5 Meteorologiska parametrar använda vid simuleringar med MUSS.

| Parameter | Värde | Enhet |
|------------------|------------------------------------|-------------------|
| Azimutvinkel | 0 | 0 |
| Col. Vinkel | 0 | 0 |
| Temperatur, luft | 10 (18 vid svagt positiv kontrast) | °C |
| Temperatur, mark | 9 (18 vid svagt positiv kontrast) | °C |
| Ojämnhet | 0,03 | М |
| Vindhastighet | 5 | m s ⁻¹ |
| Vindklass | D | - |

Tabell 6 Ingångsdata till IGOSS.

| Parameter | | Värde | Enhet |
|-----------|---|--------------------------------------|---------------------|
| System | Moduler | Optics Detector Noise and nonuni. | - |
| | Typ av transmission | Unity | - |
| | Typ av MTF | Gaussian Aberration | |
| | Diameter på apertur | 0.05 | m |
| | Måltemperatur | 321 | К |
| | Våglängd, start | 8 | μm |
| | Våglängd, slut (saknar betydelse i detta fallet men måste vara större än våglängd start) | 12 | μm |
| | Antal våglängdskanaler | 10 | Stycken |
| | Diameter på aberrationsfläck | 0 | Rad |
| Optik | Transmissions och emmisionsfiler | - | - |
| | MTF Type | Staring CCD | - |
| ~ | Bandwidth | 25 | Hz |
| mity | Frame rate | 50 | Hz |
| ifor | Interlace | 1 | - |
| unu | Element size, X, Y | 50 | μm |
| Ň | Element pitch X,Y | 50.9 | μm |
| and | Detectivity, peak | 1x10 ⁸ | $m Hz^{1/2} W^{-1}$ |
| oise | Detectivity, F/# | 1 | - |
| ır No | Target temperature | 321 | К |
| ecto | F/# OF COLD SHIELD | 1 | - |
| Dete | NEI (not used when equal to 0.0) | 0 | Wm ⁻² |
| | Non uniformity | 0 | - |

Tabell 7 Ingångsdata till SeekCorr.

| Parameter | Värde | Enhet |
|---|------------|-------------|
| Kernel size | 5 | bildelement |
| Region of interest | 128 | Bildelement |
| Images between referens image update | 1 | - |
| Correlation mode | 5 Abs(I-R) | - |
| λ | 0,7 | - |

Tabell 8 Ingångsdata till JavelinDynamics

| Parameter | Värde | Enhet |
|---------------------------|-------|-----------|
| Max g | 40 | 9.8 m/s^2 |
| Syftbäringskonstanten, K1 | 4 | - |
| Initial pitch | 18 | 0 |

7 Referenser

- [1] Rupert Pengelley och Mark Hewish, *Missiles put dismounted infatry back on the field*, Jane's International Defence Review **32**, sid. 26-32 (1999), och <u>http://www.army-technology.com/projects/javelin/index.html</u>.
- [2] Gustaf Olsson, *Multispectral Water Fog as an Obscurant Countermeasure*, IXth European AFV Attack and Surviability Symposium, Shrivenham, UK, 15-16 June 2000. (Proceedings on CD-ROM).
- [3] G. Olsson, Å. Blomberg, G. Dygéus, S-O. Lönneborg, *Electronic Warfare an essential component in the future battlefield*, 3rd International EW Conference and Exposition, Zurich, Switzerland, 22-24 May 2000. Unnumbered proceedings.
- [4] http://www.aircav.com/cobra/towlife.html (Hastighetsprofil för TOW 2)
- [5] Christer Wigren, Lars Tydén och Carl Hedberg, Simulering av störning mot passiva elektro-optiska målföljare, FOA-rapport FOA-R--99-01164-616--SE, Juni 1999.
- [6] Carl Hedberg och Christer Wigren, *Simulering av störning mot centroidmålföljare*, FOA-rapport FOA-R--00-01500-616--SE, April 2000
- [7] Ulrika Andersson och Annelie Tonnvik, Simulering av störning mot slutfasstyrd granat, FOI-rapport FOI-R--0133--SE, April 2001
- [8] Christer Wigren, A Generic IRST Detection Performance Model, FOA-rapport FOA-R--00-01464-616--SE, Mars 2000.
- [9] Carl Hedberg, Lars Tydén och Christer Wigren, Generell metod för simulering av elektro-optiska telekrigdueller, FOA-rapport FOA-R--99-01160-616--SE, Juni 1999.
- [10] Christer Wigren, *MAIS, an Atmosphere and Background Model for Electro-Optical Simulations*, FOA-rapport FOA-R--00-01677-616--SE, November 2000.
- [11] Lars Tydén, MUSS, Multi Spectral Smoke Model, FOA-rapport FOA-R--97-00576-616--SE, November 1997.
- [12] Christer Wigren, *IGOSS, Model of Image Generation in Optronic Sensor Systems*, FOA-rapport FOA-R--97-00582-616--SE, November 1997.
- [13] Lars Tydén och Lars Berglund, Laborationshandledning Korrelationsmålföljare, FOA-rapport FOA-D--97-00335-616--SE, Augusti 1997
- [14] Kommersiell programvara från MultiGen-Paradigm Inc.
- [15] <u>http://www.opengl.org</u>
- [16] Osborn Conning & Andreas Schön, Landscape Models Based on Laser Radar Elevation Data, LITH-ISY-EX-3037.
- [17] A. Berk, G.P. Anderson, P.K. Acharya, L.S. Bernstein, J.H. Chetwynd, M.W. Matthew, E.P. Shettle and S.M. Adler-Golden, *MODTRAN4 User's Manual*, Air Force Research Laboratory Report, June 1999.
- [18] Torbjörn Andersson, Integration ACSL OPTSIM, FOA-rapport FOA-R--00-01689-616--SE, December 2000.
- [19] John H. Blakelock, Automatic Control of Aircraft and Missiles. 2nd ed. Kapitel 8, Ekvation 8-7, 1991: John Wiley & Sons, Inc.
- [20] B.A. Brackney, M.K. Helton och R.K. Hammon, Development of the Gray-Level Co-occurrence Matrix Target Trackability Metric for Infrared Missile Systems, Proceedings of SPIE, vol. 3377, pp 240-254 (1998)
- [21] R.L. Hall, R.K. Hammon, B.A. Brackney, och B.J. Schmid, Design Modification to the Gray-Level Cooccurrence Matrix (GLCM) Based Trackability Metric and the Resulting Performance, Proceedings of SPIE, vol. 4030, pp 172-183.
- [22] Christer Wigren, Implementation of Target Trackability Metric based on Gray-Level Co-occurrence Matrix (GLCM), FOI rapport FOI-R--0251--SE