

RAMIN FARID, JOAKIM AGNARSSON,
PETER ALVÅ, DAVID BERGSTRÖM,
PER BRÄMMING, EKATERINA FEDINA,
ANDREAS HELTE, JOHAN PELO,
JOUNI RANTAKOKKO, DAVID YANG



Ramin Farid, Joakim Agnarsson, Peter Alvå,
David Bergström, Per Brämning, Ekaterina
Fedina, Andreas Helte, Johan Pelo, Jouni
Rantakokko, David Yang

Koncept för framtida patrullrobot

Titel	Koncept för framtida patrullrobot
Title	Concept for future loitering munition
Rapportnr/Report no	FOI-R--5253--SE
Månad/Month	Oktober
Utgivningsår/Year	2022
Antal sidor/Pages	31
ISSN	1650-1942
Kund/Customer	FM
Forskningsområde	Vapen, Skydd och säkerhet
FoT-område	Vapen och skydd
Projektnr/Project no	E85018
Godkänd av/Approved by	Cecilia Dahlgren
Ansvarig avdelning	Försvarsteknik
Exportkontroll	Innehållet är granskat och omfattar ingen information som är underställd exportkontrollagstiftningen.

Bild/Cover: Ramin Farid / jantsarik (Shutterstock)

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

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

Sammanfattning

Ett patrullrobotkoncept har tagits fram enligt given kravställning. En simuleringsmodell av konceptet har utvecklats för att på ett övergripande sätt kunna värdera konceptets förmåga till att avsöka ett tilldelat område, upptäcka samt nedkämpa utpekade mål. Ett inledande värderingsarbete har skett, enligt en tidigare utvecklad värderingsmetod, i två stridssituationer.

Nyckelord: patrullrobot, värdering, simulering, stridseffekt

Summary

A loitering munition system concept has been developed from given a set of requirements. A dynamic simulation model of the concept has been implemented in order to facilitate a general assessment of the system's ability to search an assigned target area, detect and strike against assigned targets. This work was conducted according to a previously developed system assessment method. A preliminary assessment of the concept was done in two combat situations.

Keywords: loitering munition, assessment methods, simulation, combat modelling, combat effectiveness

Innehåll

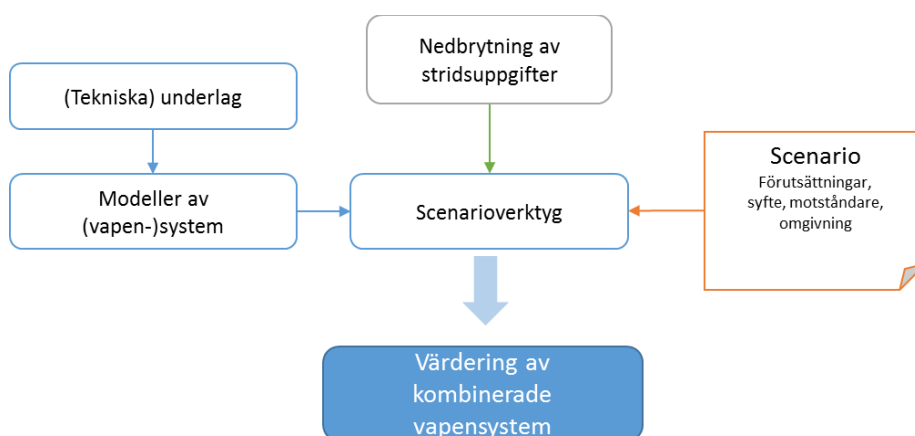
1	Inledning	6
1.1	Bakgrund.....	6
1.2	Syfte	7
1.3	Mål.....	7
1.4	Avgränsningar	7
1.5	Läsanvisningar	7
2	Patrullrobotkonceptet.....	8
2.1	Kravställning	8
2.2	Uppskattning av nyttolast	9
2.3	Preliminär utformning av flygkropp	9
2.4	Uppskattning av tomvikt och energiberäkningar	9
2.5	Prestandaberäkningar och framdrivning	10
2.6	Färdigt koncept	11
2.7	Simuleringsmodell	12
2.8	Nyttolastkomponenter.....	13
2.8.1	Stridsdel och pansarvärnsrobotar.....	13
2.8.2	Sensorsystem	15
2.8.3	Kommunikationssystem	16
2.9	Metod för prestandaberäkningar	18
3	Värderingsmetod.....	20
3.1	Problemformulering	20
3.2	Effektmått.....	21
4	Inledande värdering av patrullrobotkoncept	22
4.1	Framryckning med sammanstöt	22
4.1.1	Lösande av uppgift.....	22
4.2	Anfall i bebyggelse.....	24
4.2.1	Lösande av uppgift.....	24
4.3	Sammanställning av resultat	26
4.4	Diskussion.....	27
5	Sammanfattning och fortsatt arbete	28
5.1	Vidare värderingsarbeten	28
5.2	Vidare utveckling av simuleringsmodellen	28
6	Referenser.....	30

1 Inledning

Denna rapport beskriver ett arbete för att ta fram ett patrullrobotkoncept med tillhörande prestanda i syfte att värdera detta system på stridsteknisk nivå i olika stridssituationer. En inledande värdering av konceptet redovisas. Arbetet har skett inom ramen för projektet *Värdering av kombinerade vapensystem* i FoT Vapen och skydd och är en del av metodutvecklingen och kunskapsupbyggnaden kring värdering av kombinerade vapensystem.

1.1 Bakgrund

Inom projektet utvecklas metoder och verktyg för att värdera hur olika vapensystem bidrar till markstridsförbandens stridseffekt, framför allt på stridsteknisk nivå. Med stridseffekt menas här hur väl förbanden löser sina stridsuppgifter. Projektets uppgift är att med kvantitativa mått mäta hur olika vapensystem och kombinationer av vapensystem bidrar till förbandets förmåga att lösa sina uppgifter. I Figur 1 visas den metod för värdering av vapensystem och kombinerade vapen som projektet arbetar efter [1, 2].



Figur 1. Stridseffektsvärdering och de ingående delmomenten, [1, 2].

Patrullrobotar (eng. *loitering munitions*) är en typ av vapensystem som kombinerar förmågor från obemannade flygfarkoster (eng. *Unmanned Aerial Vehicles*, UAV) och markmålsrobotar för att tillåta en snabb aktionsförmåga mot olika typer av mål. Patrullroboten kan styras till en angiven plats för att övervaka ett område och söka efter potentiella mål. Om beslut fattas om bekämpning, som därefter initieras, flyger roboten in i målet, varefter den inbyggda verkansdelen detonerar. Dessa system kan ha förmågan att återvända till operatören för att användas vid ett senare tillfälle om operatören väljer att inte initiera ett angrepp.

Kombinationen av förmågan att avpatrullera stora områden och verka med hög precision ger patrullrobotar många potentiella användningsområden. Patrullrobotar återfinns i olika skepnader och storlekar. Från små eldrörsutskjutna system i samma storlek som hobbydrönare till system med totalvikt över hundra kilogram där verkansdelen utgör tiotals kilogram.¹ Både helikopter- och flygplansvarianter förekommer.

¹ Det israeliska systemet Harop har en totalvikt på 135 kg och en verkansdel på cirka 23 kg.

1.2 Syfte

Syftet med arbetet är att fortsätta utveckla värderingsmetoder för vapensystemens bidrag till stridseffekt, i detta fall tillämpat på en patrullrobot, vars förmåga att lösa givna uppgifter värderas i olika stridssituationer. För detta ändamål utvecklas ett patrullrobotkoncept och en modell för att beräkna vapensystemets prestanda. Därmed bidrar detta arbete även till en ökad domänkunskap om patrullrobotsystem.

1.3 Mål

Målet med arbetet är att ta fram ett koncept för ett patrullrobotsystem och inleda värdering av ett patrullrobotkoncept i olika stridssituationer. Rapporten bygger vidare på det arbete om patrullrobotar som påbörjades i studien *Litteraturstudie om patrullrobotar* [3]. Värderingsmetoden visas i Figur 1 och innefattar att en patrullrobotmodell utvecklas från tekniska underlag samt att scenarier tas fram, där modellens förmåga att lösa uppgifter ska värderas. Dessa uppgifter fås genom stridsuppgiftsnedbrytning till mindre stridssituationer, som sedan simuleras i scenarioverktyg. Från identifierade frågor i de nedbrutna stridssituationerna värderas genom simulering huruvida patrullroboten kan lösa dessa.

1.4 Avgränsningar

Detta arbete fokuserar på metoden för att värdera ett vapensystems förmåga att lösa uppgifter. Den framtagna patrullrobotmodellen är därför på en konceptuell nivå, där många funktioner har modellerats på en övergripande nivå.

1.5 Läsanvisningar

Kapitel 2 beskriver arbetet med framtagningen av patrullrobotkonceptet. Här beskrivs också de modeller som tagits fram för att nyttjas i värderingen av systemkonceptet och konceptets prestanda. I kapitel 3 beskrivs värderingsmetoden som används i rapporten.

En inledande värdering i två stridssituationer beskrivs i kapitel 4 och slutligen sammanfattas arbetet i kapitel 5. Här listas också några värderingsfrågor som är intressanta för fortsatt arbete.

2 Patrullrobotkonceptet

Patrullrobotkonceptet utformades enligt processen som illustreras i Figur 2. Detta kapitel kommer att gå igenom denna process stegvis.



Figur 2. Schema över designprocessen för patrullrobotkonceptet.

2.1 Kravställning

En kravställning togs fram i början av arbetet, där det bestämdes att patrullrobotkonceptet skulle uppfylla ett antal krav för bland annat räckvidd, uthållighet och storlek på hårdmålsstridsdelen. Dessa krav baserades dels på vad som ansågs rimligt för ett antal tänkta stridsuppgifter (vilka formuleras i två stridssituationer i kapitel 4), och dels på bakgrundsarbetet som redovisas i *Litteraturstudie om patrullrobotar* [3]. Patrullroboten krävdes att även bära ett sensor- och kommunikationssystem, utan att ange krav på storlek och vikt för dessa. Dock bestämdes det att den visuella delen av sensorsystemet skulle kunna urskilja en ambulanssymbol (på fordonstak eller i sida) från arbetshöjden. Det bestämdes att arbetshöjden skulle ligga på 3000 m och att roboten minst skulle ha en maximal lastfaktor på 2 g. Syftet med kravställningen var att ha en grund varifrån konceptet kunde byggas vidare. De krav som fastställdes kan ses i Tabell 1.

Tabell 1. Designkrav för patrullrobotkonceptet.

Räckvidd	30 km
Uthållighet	12 h
Stridsdel	10 kg
Arbets höjd	3000 m
Max. lastfaktor	2 g

2.2 Uppskattning av nyttolast

Vid utformningen av ett flygsystem är vikten en av de mest avgörande faktorerna att överväga. Vikten inkluderar alla delar av systemet såsom flygkropp, framdrivningssystem, bränsle, avionik, nyttolast etc. Utifrån de krav som sattes på patrullrobotkonceptet och dess prestanda är nyttolasten den styrande vikt-komponenten. Nyttolasten inkluderar en hårdmålsstridsdel med riktad sprängverkan (RSV), sensor- och kommunikationssystem samt kringliggande system såsom batteri, gimbalsystem, avionik etc. Av denna anledning inleddes arbetet med att utveckla patrullrobotkonceptet med att storlek på nyttolasten bestämdes för att möta de uppställda kraven. Därefter utformades flygkropp och framdrivningssystem för att möta kraven på uthållighet och räckvidd.

Detaljerad beskrivning av de tilltänkta nyttolasterna återfinns i avsnitt 2.8. Den sammanlagda vikten för nyttolasten uppskattades till cirka 18 kg, där stridsdelen utgjorde 10 kg, sensor-/kommunikationssystem 3 kg och kringliggande system såsom batteri, gimbalsystem och avionik uppskattades till 5 kg. Batterivikten uppskattades till 1,2 kg utifrån den batterikapacitet som krävdes, $17,5 \text{ W} \cdot 12 \text{ h} = 210 \text{ Wh}$ och en energidensitet på 180 Wh/kg (litium-jon-batteri).

2.3 Preliminär utformning av flygkropp

Inom ramen för detta arbete och dess omfång baserades patrullrobotkonceptets utformning på enklare redan existerande modeller, såsom Switchblade-serien från AeroVironment och Samad 2 och 3 som bland annat använts av Huthi-rebellerna i Yemen [4]. För att avgränsa och underlätta arbetet utformades patrullrobotkonceptet med en enkel cylinderformad flygkropp och rektangulära vingar utan svep. Flygkroppen antogs bestå av ett skal av kolfiber med en tjocklek på 5 mm och vingarna av ett skal av kolfiber med en tjocklek på 3 mm och en frigolitkärna, där den totala tjockleken på vingen är 40 mm.

De preliminära dimensionerna för flygkroppen och vingarna baserades på de ovan nämnda patrullrobotarna och har liknande proportioner mellan exempelvis flygkroppens längd och vingspann etc. Flygkroppens diameter baserades på pansarvärnsrobotar (PV-robot) med RSV-stridsdelar i jämförbar storlek som beskrivs i avsnitt 2.8. För detta koncept antogs en stridsdel i storlek 150 mm i diameter och en flygkropp på 200 mm i diameter för att inrymma stridsdelen och resterande komponenter med marginal.

2.4 Uppskattning av tomvikt och energiberäkningar

När en preliminär utformning av flygkroppen och vingarna var upprättad kunde tomvikten (totala vikten utan bränsle och nyttolast) beräknas och preliminära energiberäkningar genomföras. Beräkningarna utfördes med uppskattade vikter och densiteter för drivmedel, motor och avionik. Vikten för övriga komponenter tillfördes sedan direkt som indata. Resulterande utdata gav information om hur mycket energi som krävdes för att driva konceptroboten. Energiberäkningarna kunde sedan itereras genom att justera indataparametrarna, såsom vingstorlek, bränslevikt, etc., tills resultaten uppfyllde de krav som fastställdes i början av arbetet.

Slutligen kunde prestandaberäkningarna slutföras när utformning av flygkropp, energiberäkningar och val av framdrivningssystem utförts. Om prestandan inte ansågs rimlig eller avvek från de krav som ställts återupprepades processen från steget att uppskatta tomvikten.

2.5 Prestandaberäkningar och framdrivning

I detta arbete är utformningen av patrullrobotkonceptet relativt enkel. Den är baserad på redan existerande patrullrobotar av serierna Switchblade och Samad, som båda är propellerdrivna flygplan med skjutande propeller, det vill säga att propellern är placerad baktill i flygplanet. Denna konfiguration är fördelaktig för patrullrobotkonceptet, då vingar och flygkropp får ett bättre luftflöde och sensorer kan placeras vid nosen utan att deras vy blockeras av propellern. En nackdel är dock att den eventuellt tunga motorn bör placeras längst bak, vilket skiftar masscentrum bakåt och påverkar den laterala stabiliteten. I detta fall är motorn relativt lätt, och RSV-delen är dessutom placerad längst fram i patrullroboten, vilket motverkar denna effekt. Detta patrullrobotkoncept är således ett propellerflygplan med skjutande propeller.

Vingkonfigurationen på patrullrobotkonceptet valdes likt Samad-serien som en högvinge-konfiguration. Den största fördelen med denna konfiguration är att den är mer stabil i lateral roll. En högvinge-konfiguration tenderar således att rulla tillbaka flygplanet till sitt jämviktsläge. Detta ger lägre energikrav för styrsystemet då farkosten återvänder till jämviktsläget naturligt. För enkelhetens skull antas planformen på vingarna vara raka rektangulära vingar utan svep. Det antas även att vingprofilerna är samma som för Samad-serien med en NACA 23018-profil i roten och en NACA 23012 i vingspetsen.

För patrullrobotkonceptet antas en V-stjärt precis som hos Samad-serien. Denna konfiguration har färre ytor än andra konventionella konfigurationer (två istället för tre) vilket ger en lägre totalvikt och mindre luftmotstånd genom reduktion av flödesinterferens [5].

Resultaten för patrullrobotkonceptets vingkonfiguration kan ses i Tabell 2.

Tabell 2. Patrullrobotkonceptets konfiguration.

Vingkonfiguration	Hög vinge
Vingprofil (rot)	NACA 23018
Vingprofil (spets)	NACA 23012
Stjärtkonfiguration	V-stjärt

För att tillfredsställa de krav som sattes på patrullrobotkonceptet krävdes en motor med cirka 4 kW effekt. Det antogs dock att motorn inte kommer att köras på full effekt vid normaldrift utan på cirka 80 % av sin effektförmåga, vilket resulterar i ett effektkrav på cirka 5 kW. En kommersiell motor som uppfyller dessa krav är DLE 65, en mindre modell av den motor som används i Samad-serien av patrullrobotar. En propeller på cirka 50 cm i diameter antogs vara lämplig för denna motor [6]. Bränsleförbrukningen för en motor i denna storlek uppskattades även utifrån dess specifikationer. Fullständiga motorspecifikationer kan ses i Tabell 3.

Tabell 3. Motorspecifikationer.

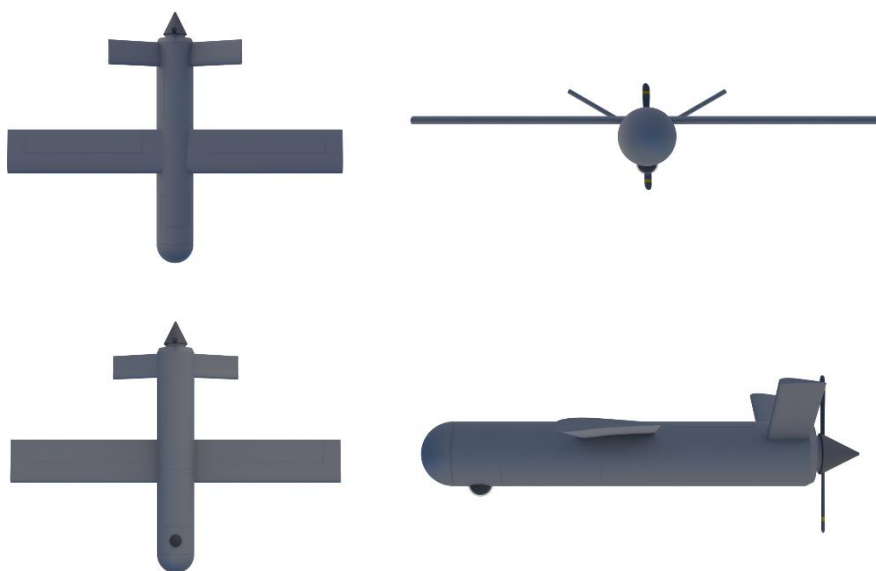
Range	Skjutande propeller
Motor	DLE 65
Effekt	4,85 kW (7500 RPM)
Bränsleförbrukning	511 g/kWh
Propellerdiameter	50 cm

2.6 Färdigt koncept

Den slutgiltiga utformningen av patrullrobotkonceptet och dess dimensioner definieras i Tabell 4, och en framställning i 3D kan ses i Figur 3. Prestandaresultaten kan ses i Tabell 5.

Tabell 4. Dimensioner för patrullrobotkonceptet

Längd	1,2 m
Diameter	0,20 m
Vingspann (huvudvinge)	1,8 m
Korda (huvudvinge)	0,22 m
Vingspann (stjärt)	0,80 m
Korda (stjärt)	0,13 m
Totalvikt	35 kg
- flygkropp	9 kg
- stridsdel	10 kg
- drivmedel	6 kg
- motor	2 kg
- sensorer/kommunikation	3 kg
- övrigt	5 kg



Figur 3. En 3D-framställning av patrullrobotkonceptet från olika perspektiv.

Tabell 5. Prestanda på 3000 m.

Stallhastighet	36 m/s
Marschhastighet	45 m/s
Uthållighet	12 h
Räckvidd	2120 km
Max. höjd	7300 m
Min. stigtid (till 3 km)	13 min
Max. lastfaktor	2 g
Svängradie	147 m (2 g)

2.7 Simuleringsmodell

Patrullrobotkonceptets funktion under ett uppdrag kan beskrivas för var och en av de olika faserna transport, patrullering och bekämpning.

En modell togs fram i MATLAB för att simulera patrullrobotkonceptet. Modellen består av flera delar för de olika uppdragsfaserna. Patrullrobotens rörelse beskrivs av en flygkropp modellerad som en punktmassmodell med tre frihetsgrader. Modellen hanterar i dagsläget idealiserade manövrer för planflykt, svängar i horisontalplanet, stigning och nedgång samt fartändring (acceleration och retardation) vid planflykt. Patrullbanan definieras innan simulering genom en lista över alla manövrer patrullroboten ska utföra i scenariot. Flygegenskaperna är baserade på prestandaparametrar presenterade i avsnitt 2.5.

Patrulleringsfasen innefattar flygning över ett målområde med förbestämd rutt eller flygmönster. För patrulleringsfasen behöver sensorfunktionen modelleras. För att modellera sensorprestanda antas det att sensorn pekar rakt ner och att patrullhöjden är 3 km. Med ett fast cirkulärt synfält om $\pm 10^\circ$ (totalt 20°) ger detta en cirkulär sensortäckning på marken med en radie på cirka 530 m ($3000 \text{ m} \cdot \tan 10^\circ \approx 530 \text{ m}$) eller en momentan sensortäckning på knappt $0,9 \text{ km}^2$. Mål är modellerade som enkla punkter med en fast sannolikhet för upptäckt som definieras av användaren före simulering. Om ett mål befinner sig innanför synfältet utförs en upptäcktskontroll en gång per sekund med ett slumpmässigt genererat tal, och baserat på målets upptäcktssannolikhet avgörs huruvida sensorn upptäcker målet eller ej. Varje upptäcktskontroll utförs med ett uniformt fördelat slumpstal och är oberoende, d.v.s. utslag från föregående upptäcktskontroller påverkar ej efterföljande kontroller. Om patrullroboten flyger i rak bana med en marschhastighet på 45 m/s kan ett stationärt mål hållas synligt i upp till 23 s, givet att anflygningen är optimal och placerar målet i centrum av sensorns synfält. Om målet exempelvis har en upptäcktssannolikhet på 10 % vid en oberoende kontroll ($P_1 = 0,1$), så är upptäckts-sannolikheten vid 23 stycken oberoende kontroller $P_{\text{upptäckt}} = 1 - (1 - P_1)^{23} \approx 0,91$.

Målets upptäcktssannolikhet beror på såväl målets som sensorns egenskaper. Utöver målets och sensorns egenskaper kommer upptäcktssannolikheten bero på om målet är maskerat, står i skyl under vegetation eller i en byggnad. En överlagrad karta representerar hur terräng, byggnader och dylikt kan påverka målets synlighet och därigenom sannolikheten för upptäckt. Se Figur 4 för exempel på en sådan beskrivning över ett industriområde. Om ett mål som följs eventuellt tappas utförs kontroller för återupptäckt med samma metod som för ordinarie målupptäckt. Målens position och hastigheter genereras på förhand och matas in i simuleringen av patrullroboten.



Figur 4. Exempel på sannolikhetsraster över ett industriområde (upplösning 5 m/pixel). De svarta silhuetterna är byggnader. Eventuella mål som befinner sig inom sådana områden får en modifierad upptäcktsannolikhet lika med noll.

Bekämpningsfasen består av två moder: målföljningsmod och anfallsmod. Under målföljningsmoden överger patrullroboten den fördefinierade patrullbanan och försöker hålla sig i närhet av målet. Vid anfallsmod påbörjar patrullroboten dykning mot målet för bekämpning. När ett mål har upptäckts går patrullroboten in i bekämpningsfasen, och då först till målföljningsmod. I detta läge kommer patrullroboten att bibehålla höjd men följa målet med syftbäringsstyrning (eng. *proportional navigation*) i horisontalplanet och en begränsad lastfaktor satt till 70 % av maximalt tillåtna lastfaktorn för patrullroboten. I målföljningsmoden antas sensorns upphängningsanordning tillåta rotation för att kunna följa målet. När patrullroboten går över till anfallsmod styr den mot målet med syftbäringsstyrning. Den begärda accelerationen begränsas så att maximal tillåten lastfaktor för patrullroboten ej överskrids.

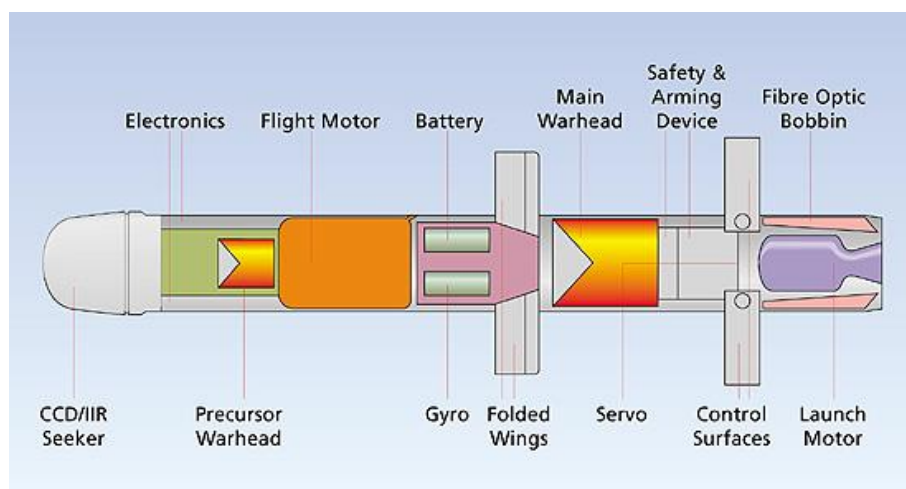
2.8 Nyttolastkomponenter

Följande delavsnitt redogör för de nyttolastkomponenter som patrullrobotkonceptet är tänkt att bära. För detta patrullrobotkoncept finns tre huvudsakliga komponenter i nyttolasten: en RSV-stridsdel, ett sensorsystem och ett kommunikationssystem.

2.8.1 Stridsdel och pansarvärnsrobotar

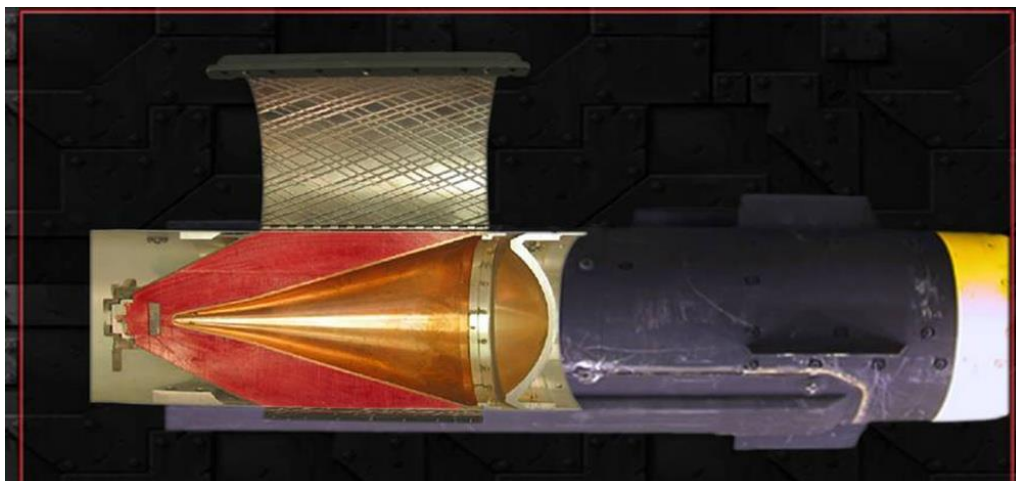
Den RSV-stridsdel som patrullrobotkonceptet antas vara utrustad med är baserad på moderna pansarvärnsrobotar (PV-robotar) som finns tillgängliga idag. Dagens PV-robotar innehåller med få undantag tandemladdningar, som består av en främre RSV-laddning (förpenetrator) och en bakre huvudladdning. Förpenetratorn har till uppgift att röja eventuellt reaktivt pansar, som finns i huvudladdningens strålgång. RSV-strålen från huvudladdningen kan sedan penetrera grundskyddet på målet och därefter orsaka skada på känsliga komponenter inuti målet. Vanligtvis sitter förpenetratorn i samma utrymme som

målsökaren i nosen på roboten, medan huvudladdningen sitter placerad en bit bakom, bakom en barriär eller bakom motorn som ska skydda mot detonationslasten från förladdningen, se Figur 5. Förpenetratorn är oftast betydligt mindre än huvudladdningen, typiskt halva kalibern eller mindre, och behöver inte ha någon större penetrationsförmåga. Majoriteten av alla PV-robotar har en stridsdel som är riktad i robotens längsriktning. Några undantag finns där robotarna är tänkta att flyga över målet och skjuta en nedåtriktad stråle/projektil mot fordonets tak som är mindre skyddad än frontalsektorn. Exempel på sådana så kallade *overflying-top-attack* (OTA) robotar är NLAW (Rb 57), Bill (Rb 56) och TOW-2B (Rb 55E). Fortsättningsvis kommer dock endast axiellt orienterade stridsdelar att diskuteras.



Figur 5. Principskiss på SPIKE som visar placeringen av de olika komponenterna. I detta fall sitter huvudladdningen bakom motorn. Källa: Dave1185 – Wikipedia (CC3).

Storleken på en PV-robot begränsas av hur den är tänkt att transporteras. Robotar som ska kunna bäras av soldater har vanligtvis en diameter på 110 – 150 mm. Ett exempel på en modern lätt PV-robot är Spike LR2, som har en diameter på 117 mm och väger 10,4 kg. Ett exempel på en tyngre bärbar robot är TOW-2A (benämnd Rbs55d av Försvarsmakten), som har en diameter på 152 mm och väger 22,6 kg. Robotar som monteras på fordon är ofta större, med en diameter som överstiger 150 mm. Ett typexempel på ett flygburet system är AGM-114 Hellfire II, som ursprungligen utvecklades för att användas på helikoptrar, därav namnet Hellfire (*Heliborne laser, fire-and-forget missile*). Hellfire II-robotarna har en diameter på 180 mm och väger knappt 50 kg. Den senaste varianten av Hellfire II har beteckningen AGM-114R och innehåller en *multi-purpose*-stridsdel. Denna version är tänkt att ersätta alla tidigare varianter av Hellfire II. Exakt hur denna stridsdel är utformad är inte allmänt känt men påstås enligt [7] vara baserad på en högpenetrerande RSV-stridsdel (*K-charge*) som försetts med ett stålsplitterhölje. En tidigare variant av Hellfire II, AGM-114K-2A, använder en liknande teknik, se Figur 6. Huvudstridsdelen i AGM-114R väger knappt 10 kg. Hellfire IIR representerar en modern flygburen pansarvärnsrobot med flermålskapacitet som kan utgöra en lämplig förlaga för en konceptuell patrullrobot i viktclassen 50 kg.



Figur 6. Bild på Hellfire II K-2A med splitterhölje runt RSV-stridsdelen. Källa: Defence Visual Information Distribution Service (public domain)

2.8.2 Sensorsystem

Utformning av patrullrobotens sensorsystem utgår från spaningsbehovet, att kunna upptäcka och klassificera fordon från 3 km flyghöjd med tittvinklar från 0° till 45° i förhållande till lodlinjen. För att uppfylla behovet såväl dagtid som nattetid föreslås ett sensorsystem med en visuell kanal och en IR-kanal. En internationell standard för bildtolkare som används för att ange bildkvalitet, *NIIRS* (*National Imagery Interpretability Rating Scale*), används ofta i kravställningen av spaningssystem och spaningsuppdrag. *NIIRS* utgörs av en subjektiv skala från 0 (sämst) till 9 (bäst), där varje steg på skalan anger svårighetsgraden i de tolkningsuppgifter som bilden kan användas till. Tabeller finns utformade för både det visuella och det infraröda våglängdsområdet, för militära såväl som civila tillämpningar [8]. Enligt *NIIRS* skulle upptäckt av fordon motsvara *NIIRS* 4 i båda våglängdsbanden, medan fordonsklassificering bör kunna genomföras med *NIIRS* 5 i det visuella och med *NIIRS* 6 i det infraröda området. För den visuella kanalen av sensorsystemet ställdes ett krav att kunna känna igen en ambulanssymbol (på ett fordonstak eller i sida), vilket här estimerats till att kräva *NIIRS* mellan 6 och 7 (här ansatt till 6,5).

Utifrån ovan uppställda *NIIRS*-krav kan sedan erforderlig upplösningsförmåga hos sensorsystemet bestämmas med hjälp av den så kallade *GIQE* (*General Image Quality Equation*) som beskriver sambandet mellan *NIIRS* och egenskaper hos sensorn som skala (avstånd), upplösning och brus (se exempelvis [9] och [10]):

$$NIIRS = C + a \log_{10} GSD + b \log_{10} RER + 0.656H - 0.344 \frac{G}{SNR}, \quad (1)$$

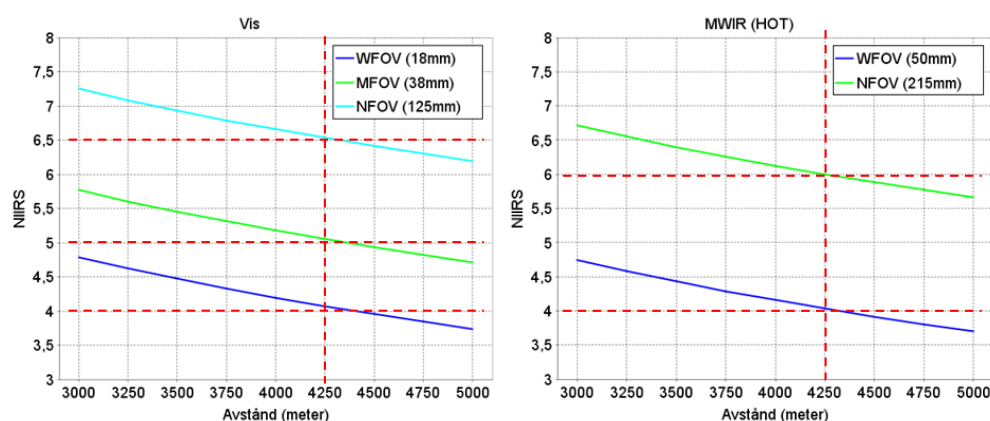
där C är en konstant (10,25 för visuella området och 10,75 för IR), GSD (*Ground Sampling Distance*) är markupplösningen i fot och där RED (*Relative Edge Response*) och H (*overshoot*) beskriver den optiska upplösningsförmågan via systemets kantrespons (eller impulssvar). De två konstanterna a och b beror på värdet hos RED (där $a = 3,32$ och $b = 1,559$ om $RED \geq 0,9$ samt där $a = 3,16$ och $b = 2,817$ om $RED < 0,9$). Sista termen innehåller SNR (signal-till-brus-kvoten) samt en brusförstärkningsfaktor G som uppstår vid eventuell pålagd kantskärpning (G är annars lika med ett). Vid antagande om god kontrast kan denna term försummas och erforderlig GSD , RED och H kan därför estimeras ur angivet *NIIRS*. Notera att flera kombinationer av dessa här är möjliga, och en angiven *NIIRS*-nivå kan därför uppfyllas av flera olika typer av system optimerade för olika egenskaper.

För att hålla nere storlek, vikt och effektförbrukning (och kostnad) ansätts här ett system med specifikationer enligt Tabell 6. Den visuella kanalen utgörs här av en färgavbildande

CMOS-sensor med drygt sex megapixel, med en optisk zoom med sju gångers förstöringsförmåga. Zoom-optiken medför att upplösningen flexibelt kan justeras kontinuerligt efter *NIIRS*-krav för aktuell uppgift. För förbättring av mörkerförmåga kan sensorn ersättas med pixelmatris med större (men färre) pixlar, men detta driver upp storlek och vikt på använd optik. IR-kanalen föreslås här använda MWIR-området (*Medium-Wave Infrared*), vilket möjliggör kylda sensorer med lägre kylkrav (s.k. HOT-teknik). Här ansätts en VGA-upplöst XBn-sensor i området 3,6 till 4,2 μm , med två oberoende synfält avpassade efter kravställda *NIIRS*-nivåer. För ökad yttäckning kan sensorn ersättas av en pixelmatris med 1280×1024 pixlar, men detta driver upp storlek och vikt på optik. IR-kanalen skulle även i likhet med visuell kanal besättas med kontinuerlig optisk zoom, men detta gör systemet sannolikt också större och tyngre. Som alternativ till MWIR skulle IR-kanalen även kunna operera i LWIR-området (8 till 12 μm), men detta kräver (sannolikt) användning av okyld IR-teknik, vilket återigen driver upp både storlek och vikt hos använd optik för erhållande av tillräcklig räckvidd. Figur 7 visar predikterad *NIIRS* i de tillgängliga synfälten i respektive kanal, vilket visar att föreslaget system uppfyller uppställda *NIIRS*-krav på kravställt avstånd (streckade linjer).

Tabell 6. Specifikationer för systemförslag

	Visuell kanal	MWIR-kanal
Optik	18 – 125 mm (kontinuerlig zoom)	50 resp. 215 mm (två synfält)
Synfält (FOV)	3,4° × 2,3° (NFOV) → 23,3° × 15,8° (WFOV)	1,7° × 1,4° (NFOV) & 7,3° × 5,9° (WFOV)
MTF	> 0,55 (@ Nyquist)	Diffraktionsbegränsad
Fokalplansmatris	RGB CMOS (1/1,8")	HOT XBn (3,6 – 4,2 μm)
Antal pixlar	3096 × 2080 pixlar	640 × 512 pixlar
Pixelstorlek	2,4 μm	10 μm
Bildtakt	30 Hz	60 Hz
Storlek (L×B×H)	125 × 50 × 50 mm	125 × 100 × 100 mm
Vikt	< 1 kg	< 1,5 kg
Effekt	< 2,5 W	< 5 W



Figur 7. Predikterad *NIIRS*-prestanda för systemförslag specificerat i Tabell 6. Streckade horisontella linjer anger *NIIRS*-krav för upptäckt och klassificering av fordon samt igenkänning av ambulanssymbol (endast aktuell för visuell kanal). Streckade vertikala linjer motsvarar räckviddskravet vid 45° tittvinkel från 3 km flyghöjd. Notera att den optiska zoomen i den visuella kanalen kontinuerligt kan justeras mellan NFOV (*Narrow Field Of View*) och WFOV (*Wide Field Of View*).

2.8.3 Kommunikationssystem

Kommunikationsbehovet för en patrullrobot är asymmetriskt, där behovet av datatakt är avsevärt högre från patrullroboten till markstationen (nedlänken, NL) än från markkontrollstationen upp till patrullroboten (upplänken, UL). Patrullrobotarna skickar

typiskt en realtidsvideo från sina elektrooptiska sensorer till en operatör, som utifrån denna videoström väljer ett mål som ska bekämpas. Existerande datalänkar för stridstekniska och små taktiska UAV:er, som även används på vissa patrullrobotar, som AeroVironments *Digital Data Link* (DDL) och Elbit StarLite *Short Range* (SR) stödjer datatakt på fyra till åtta Mbit/s [11] [12] [13]. Till patrullroboten behöver endast korta kommandon skickas, exempelvis för att välja mål eller avbryta bekämpning, vart den ska flyga (operationsområdet) och hur den ska flyga under patrullfasen. Även vid direkt fjärrstyrning är datataktbehovet i upplänken åtminstone en faktor hundra lägre än vad som krävs i nedlänken. Denna asymmetri har stor betydelse då patrullroboten normalt löper större risk att bli utsatt för fientlig störning än markstationen.

2.8.3.1 Exempel på möjligt systemkoncept baserat på prestanda för existerande datalänkar

För att nå de önskade datatakterna för nedlänken krävs en relativt stor bandbredd, vilket medför att datalänkarna typiskt använder frekvenser över 1 GHz. Eftersom länkdämpningen ökar med frekvensen, samtidigt som väderberoendet ökar för högre frekvenser, används normalt frekvenser mellan 1 – 10 GHz för dessa datalänkar [11]. Radiosignaler på frekvenser mellan 1 – 10 GHz dämpas kraftigt av vegetation, vilket innebär att frisiktsförhållanden är en förutsättning för att realisera en datalänk för en patrullrobot. UAV:er kan även använda frekvenser strax under 1 GHz för upplänken, vilket reducerar länkdämpningen och ger en ökad robusthet mot störning.

Frisiktsantagandet utgör en grundförutsättning för att kommunikationen ska vara möjlig på dessa frekvenser. Flera faktorer begränsar möjligheten till fri sikt mellan sändare och mottagare, framförallt jordytans krökning, höjd på terränghinder och vegetation, markkontrollstationens antennhöjd och även patrullrobotens flyghöjd. Valet av plats för markkontrollstationens antenn har därmed en stor betydelse för kommunikationssystemets räckvidd, så att antennen är högre placerad än omgivande terräng och vegetation.

Baserat på existerande kommersiellt tillgängliga system är bedömningen att en handhållen kontrollstation kan ge en räckvidd på 5 – 10 km. Med en avancerad elektriskt styrd parabolantenn, som väger i storleksordningen 25 kg, kan troligen räckvidden på upp till 70 km erhållas. Med ett bärbart antensystem med en vikt av 5 – 10 kg bedöms det vara möjligt att nå räckvidder över 40 km [14] [15]. Som jämförelse kan nämnas att datalänkar avsedda för MALE (*Medium Altitude Long Endurance*) RPAS (*Remotely Piloted Aircraft Systems*) typiskt har räckvidder på 250–300 km [16].

Estimerade parametrar för ett koncept till datalänk för en patrullrobot, baserat på sammanvägd information från existerande datalänkar, beskrivs i Tabell 7. Existerande datalänkar har typiskt kommersiella AES-256-krypton integrerade. Vikten för ett eventuellt nationellt godkänt krypto är inte inräknad i Tabell 7. Vikten för strömförsörjningen av datalänken har inte heller inkluderats. Vissa existerande system har även möjlighet att använda frekvenshoppsteknik för att öka störskyddet. Ovan beskrivna system kan anpassas så att robustheten i telestörda miljöer ökar, men på bekostnad av andra designparametrar.

Tabell 7. Parametrar för ett fiktivt koncept för en datalänk avsedd för en patrullrobot. Angivna värden för vikt, storlek och energiförbrukning avser patrullrobotens sändtagare och är baserade på en sammanställning utifrån motsvarande parametrar för kommersiellt tillgängliga system.

Volym	Vikt	Effektförbrukning	Utsänd effekt	Datatakt (UL)	Datatakt (NL)	Frekvens
100 cm ³	0,5 kg	10 W	3 W	50 kbit/s	5 Mbit/s	L- och S-band

2.8.3.2 Sårbarhet för kommunikationssystem

En patrullrobot behöver designas så att den kan operera även i telestörda miljöer. Moderna störsystem kan ha avsevärt högre uteffekt (kW), högre antennhöjder med hjälp av master och till viss del även större antennvinst än patrullrobotens markkontrollstation har. Det innebär att de effektiva störavstånden mot ett oskyddat radiosystem (på patrullroboten) kan vara avsevärt mycket längre än kommunikationsavstånden (se även [11] [12]). Störavståndet mot markkontrollstationen kan jämförelsevis i många situationer bli avsevärt kortare från ett fordonsburet störsystem på grund av terrängens och vegetationens påverkan (ej fri sikt). Däremot är markkontrollstationen känslig för störning från flygande störsystem, exempelvis UAV-baserade, men dessa har dock typiskt en avsevärt lägre uteffekt och antennvinst än fordonsbaserade störsystem. Störavstånden beror av ett stort antal parametrar, men de kan vara betydande även för en flygande enklare störsändare. Störning påverkar det möjliga kommunikationsavståndet för patrullrobotens datalänk och kan reducera detta avsevärt. Det är därmed av kritisk vikt att utveckla metoder för att förbättra datalänkens robusthet mot störning. Det finns ett flertal olika sätt att uppnå detta, framförallt genom:

- frekvenshoppande radiosystem vilket förutsätter en betydligt större bandbredd än vad datalänken behöver enbart för att överföra informationen, alternativt en reduktion av datatakten för att istället öka störskyddet
- högre utsänd effekt och större antennsystem i markkontrollstationen ökar räckvidden alternativt förbättrar störskyddet
- adaptiva gruppantennar på patrullroboten som har förmågan att undertrycka störssignaler genom att ändra antennsystemets känslighet i riktning mot störare
- reläknoder, exempelvis använda UAV:er eller andra patrullrobotar som befinner sig avsevärt närmare patrullroboten till att reläa trafiken vidare till eller från patrullroboten
- metoanpassning, där exempelvis en soldat med en handhållen kontrollstation befinner sig i operationsområdet, närmare än markkontrollstationens operatör, och tar över kontrollen av patrullroboten i samband med bekämpningsfasen.

2.9 Metod för prestandaberäkningar

För att beräkna prestandan hos patrullrobotkonceptet måste vissa antaganden göras om dess vikt och dimensioner. De antaganden som används som grund utgår från vissa av de patrullrobotar som finns beskrivna i [3], och prestandan beräknas därefter med hjälp av handboksmetoder.

Den första aerodynamiska koefficienten som bör uppskattas är C_{D0} , det vill säga nollmotståndskoefficienten. Denna kan uppskattas i grova drag med hjälp av en metod som på engelska kallas för *equivalent skin friction method* och kan ses i ekvation (2). Koefficienterna C_{fe} är den så kallade *equivalent skin friction coefficient*, S_{wet} är *wetted area*, och S_{ref} referensarean för de aerodynamiska beräkningarna. För patrullrobotkonceptet antas C_{fe} till ett värde av 0,006.

$$C_{D0} = C_{fe} \frac{S_{wet}}{S_{ref}} \quad (2)$$

Med nollmotståndskoefficienten kan nu hastigheten vid vilken flygplanet kan hålla sig i planflykt med lägsta möjliga kraft beräknas, det vill säga marschhastigheten. Denna hastighet betecknas $V_{p,req}$ och kan beräknas med ekvation (3). De parametrar som används är farkostens vikt W , arean på huvudvingen S , luftdensiteten på den aktuella höjden ρ , ellipsfaktorn e och sidoförhållandet för huvudvingen AR .

$$V_{p,req} = \frac{4}{3} \left(\frac{W}{S} \right)^2 \frac{1}{\rho^2 C_{D0}} \left(\frac{1}{\pi e AR} \right)^{1/4} \quad (3)$$

En annan faktor som bör beräknas för flygplanet är den maximala lyftkraftskoefficienten $C_{L,max}$. För en vinge med högt sidoförhållande och litet svep kan denna uppskattas till cirka 90 % av $C_{L,max}$ för dess vingprofil [17]. Många flygplan har dock olika vingprofiler i roten och spetsen, vilket ger olika $C_{L,max}$ längs med vingen. Man kan anta att en linjär interpolation mellan rot och spets definierar det lokala $C_{L,max}$ -värdet. Det resulterade $C_{L,max}$ kan då skattas som medelvärdet mellan roten och spetsen [17]. I detta fall antas vingprofilen vara en NACA 23018 i roten och NACA 23012 i spetsen, likt vingprofilerna för vingen hos en Samad-2/3-patrullrobot [4]. Detta ger $C_{L,max}$ ett medelvärde på 1,7 och $C_{L,max}$ ett slutgiltigt värde på 1,53 för patrullrobotkonceptet. Med $C_{L,max}$ kan nu även stallhastigheten beräknas med hjälp av ekvation (4).

$$V_{stall} = \sqrt{\frac{2W}{\rho_{\infty} C_{L,max} S}} \quad (4)$$

Uthållighet och räckvidd kan beräknas med hjälp av Breguets ekvationer för propellerdrivna flygplan. Dessa beräknas med ekvationer (5) och (6). De parametrar som används är verkningsgraden η , den specifika bränsleförbrukningen c' , tyngdaccelerationen g , lyftkoefficienten C_L , luftmotståndskoefficienten C_D , farkostens tyngd med och utan bränsle W_0 respektive W_1 .

$$E = \frac{\eta}{c'} \left(\frac{C_L^{3/2}}{C_D} \right)_{max} \sqrt{2\rho S} \left[\frac{1}{\sqrt{W_1}} - \frac{1}{\sqrt{W_0}} \right] \quad (5)$$

$$R = \frac{\eta}{c'} \left(\frac{L}{D} \right)_{max} \ln \frac{W_0}{W_1} \quad (6)$$

Stighastigheten bör även beräknas för att få fram den maxhöjd som flygplanet kan nå. När den maximala stighastigheten är lika med noll anses det att flygplanet nått sin absoluta topphöjd. Den maximala stighastigheten kan beräknas med ekvation (7) och (8). En parameter som används här är $(L/D)_{max}$ som är det maximala glidtalet.

$$V_{(R/C)_{max}} = \left[\frac{2}{\rho_{\infty}} \left(\frac{K}{3C_{D0}} \right)^{1/2} \frac{W}{S} \right]^{1/2} \quad (7)$$

$$R/C_{max} = \frac{\eta_{pr} P}{W} - \frac{2}{\sqrt{3}} V_{(R/C)_{max}} \frac{1}{(L/D)_{max}} \quad (8)$$

Svängprestandan för farkosten beräknas med ekvation (9) och (10), där R är svängradien, n lastfaktorn och ϕ bankningsvinkeln.

$$R = \frac{V^2}{g\sqrt{n^2 - 1}} \quad (9)$$

$$\cos(\phi) = \frac{1}{n} \quad (10)$$

Att approximera form och storleken på stjärtvingen för en delvis okänd flygfarkost är en utmanande aspekt i processen att utforma ett flygplan. Det finns dock en metod för att få ett uppskattat värde. Ekvation (11) beskriver denna metod, där S_{HV} och V_{HT} är arean respektive volymförhållandet för stjärtvingen, c den aerodynamiska medelkordan, S arean på huvudvingen och l_{HV} avståndet mellan masscentrum för flygplanet och neutralpunkten för stjärtvingen. Här kan man uppskatta värdet för V_{HT} till 0,7 [5].

$$S_{HV} = \frac{V_{HV} c S}{l_{HV}} \quad (11)$$

3 Värderingsmetod

Arbetet följer en värderingsmetod som togs fram i ett tidigare projekt för att värdera stridseffekt [1, 2]. Metoden syftar till att tillföra spårbarhet i hur enskilda tekniska lösningar påverkar vapensystemets bidrag till förbands lösande av en stridsuppgift. Lösandet av stridsuppgiften resulterar i en stridseffekt som kan värderas beroende på syftet med stridsuppgiften.

Genom att använda systemmodeller och scenariosimuleringsverktyg kan kopplingen mellan teknikalternativ och stridseffekt spåras genom flera systemnivåer (se även Figur 1 på sidan 6). Detta genom att tekniska parametrar (från delsystemmodeller) bygger upp systemmodeller som i sin tur används i scenariosimuleringar på förbandsnivå. På så sätt möjliggörs jämförande analyser av stridsteknik med kombinationer av vapensystem samt studier av enskilda delsystems inverkan på stridseffekt.

Värderingsmetoden beskrivs mer utförligt i [2] och kan kortfattat sammanfattas i följande steg:

1. Problemformulering: redovisas i avsnitt 3.1
2. Val av effektmått: redovisas i avsnitt 3.2
3. Modellframtagning: redovisas i avsnitten 2.1 – 2.4
4. Resultatframtagning: redovisas i avsnitten 2.5 – 2.6
5. Värdering: redovisas i kapitel 4

3.1 Problemformulering

I detta arbete har ett generiskt koncept för en patrullrobot simulerats och värderats. Syftet med värderingen är att undersöka patrullrobotsystemets förmåga att lösa givna uppgifter i två stridssituationer: *framryckning med sammanstöt* och *anfall i bebyggelse*. Systemets uppgifter i situationerna kan sammanfattas som att:

- patrullera över yta eller sträcka
- upptäcka, klassificera och identifiera mål
- med precision bekämpa hårda och rörliga mål
- bekämpa tidskritiska mål.

Med hårda och rörliga mål avses här band- och hjulfordon med hög skyddsnivå, exempelvis stridsvagnar, stridsfordon och andra typer av splitterskyddade fordon.

Förmågan att upptäcka, klassificera och identifiera mål innebär att en operatör, med hjälp av patrullrobotens sensor, skall kunna:

- upptäcka ett mål i terrängen
- klassificera typ av mål exempelvis avsutten trupp, splitterskyddat eller oskyddat fordon
- identifiera om målet tillhör eget förband eller motståndaren
- avgöra roll, exempelvis stridsfordon, ledningsvagn, etc.

Tidskritiska mål innebär att målet antingen är nåbart för bekämpning under en mycket begränsad tid eller att målet har förmågan att tillfoga egna förband skada om det inte bekämpas inom en viss tid. Dessa typer av mål anges ofta som prioriterade mål.

Avslutningsvis åsyftar förmågan till precisionsbekämpning att patrullroboten ska kunna bekämpa punktmål med låg risk för sidoskador. Ur ett folkrättsligt perspektiv är det av stor vikt att systemet med tillräcklig säkerhet kan säkerställa att ett legitimt mål bekämpas, och denna aspekt har avhandlats i detalj i ett memo, "Användning av patrullrobotsystem ur ett folkrättsligt perspektiv", som är under utgivning.

Den inledande värderingen av patrullrobotkonceptet i detta arbete har fokuserat på systemets förmåga att patrullera över en yta eller sträcka.

3.2 Effektmått

I Tabell 8 beskrivs den hierarki av mätetal som i detta arbete används för värdering av patrullrobotsystemet bidrag till stridseffekt baserat på den metod som beskrivs i [2] [18]. Måtten bidrar till en spårbarhet för hur olika delsystem och system påverkar utfallet i en given stridssituation, och de ska även reflektera syftet med värderingen, som angavs i problemformuleringen.

Tabell 8. Definitioner och exempel på mått för värdering av patrullrobotsystem.

Mätetal	Definition	Exempel
Designparametrar (DP)	Beskriver systemets uppbyggnad och dess parametrar. Är oberoende av användning och uppgift. Försvarsmaktens systemnivå 6-7. Värden är giltiga även då systemet inte används.	- Flygparametrar: - Marschhastighet - Manövrerbarhet - Signatur, kan uttryckas som radarmålarea - Vapenparametrar, typ av verkansdel och massa - Sensorparametrar: - typ - upplösning - siktbredd
Prestandamått (eng. <i>Measure of Performance</i>)	Mått på systemets prestanda som mäter funktionen hos ett eller flera samverkande delsystem. Försvarsmaktens systemnivå 5.	- Sannolikhet för målupptäckt - Sannolikhet för klassificering givet målupptäckt - Sannolikhet för identifiering givet klassificering - Sannolikhet för träff, givet att måluttag genomförts - Sannolikhet för att målet nedkämpas, givet träff - Tidsspannet från upptäckt till insats - Operationsområde, yta där patrullroboten kan verka - Uthållighet över tid
Effektmått (eng. <i>Measure of Effectiveness</i>)	Systemets bidrag till lösandet av ett förbands uppgift. Måttet anger hur mycket systemets funktioner bidrar i sin stridstekniska kontext.	- Avsökt område - Antal/andel genomförda måluttag (antal mål som upptäckts, klassificerats och identifierats samt beslutats om insats) - Antal/andel nedkämpade mål - Antal plattformar som nyttjats för uppgiften - Antal plattformar förbrukade (använda för insats alt bekämpade av fienden)

4 Inledande värdering av patrullrobotkoncept

I detta kapitel beskrivs ett exempel på värdering av patrullrobotkonceptet. För att kunna göra en fullständig värdering enligt problemformuleringen i avsnitt 3.1 krävs bland annat utvärdering av konceptets bidrag till stridseffekt i många olika tänkbara stridssituationer, värderade mot givna mål med lösandet av stridsuppgifter i dessa situationer. Här ligger fokus på att demonstrera värderingsmetoden, och därmed ska stridssituationerna *framryckning med sammanstöt* och *anfall i bebyggelse* ses som exempel syftande till att pröva metoden och modellerna som utvecklats i arbetet, inte som förslag till användning eller ”skarp” värdering av ett faktiskt system eller användning av system.

Stridssituationerna är valda för att värdera förmågor, uppgifter och syften för systemets användning, som finns beskrivna i kapitel 2.8. Situationerna är framtagna för att spegla ett generiskt användande av systemen med inspiration från Försvarmaktens nuvarande handböcker och reglementen.

4.1 Framryckning med sammanstöt

I denna stridssituation sker en sammanstötning mellan eget framryckande kompani och en fientlig spaningspluton med tre stridsfordon med eldledningsförmåga.

Kompaniet framrycker norrut mot linjen markerad i kartan som CA40.

Patrullrobotplutonen har till uppgift att upptäcka och nedkämpa mål cirka 5 km framför främre plutonen under hela bataljonens framryckningsväg. Spaningsområdet är 1×3 km stort, storleksordningen på området är markerat i Figur 8. Framryckningshastighet är i genomsnitt 60 km/h, och spaningsområdet förflyttas med samma hastighet.



Figur 8. En representation av stridssituationen *framryckning med sammanstöt*.

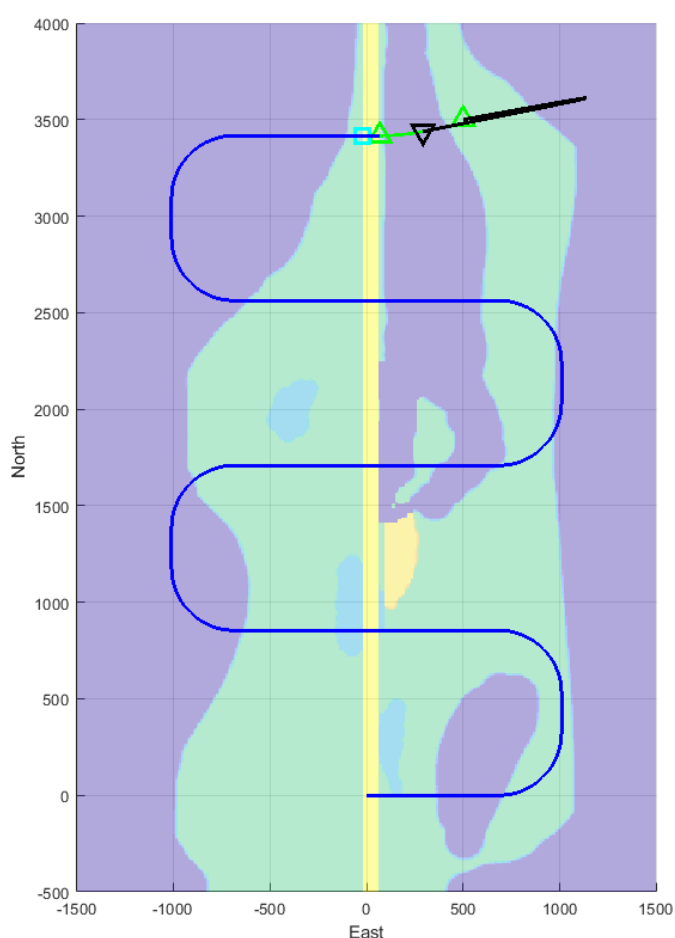
Syftet med uppgiften är att nedkämpa motståndaren innan egna förband upptäcks för att minimera risken att egna förbandet bekämpas med indirekt eld.

4.1.1 Lösande av uppgift

För denna stridssituation väljs ett sökmönster med flygbanor som går vinkelrätt mot framryckningsriktningen, där patrullroboten utför 180° vänster- och högersvängar växelvis för att avancera i framryckningsriktningen, se Figur 9. Avståndet mellan parallellspåren väljs till cirka 850 m, med motiveringen att det är väl inom patrullrobotens svängprestanda, samt att spåren får ett bra överlapp gällande sensortäckning. För att hålla takt med de egna trupperna bakom, som rör sig med en hastighet på 60 km/h längs vägen,

blir således patrullrobotens avsökningskorridor cirka 2 km bred med detta sökmönster. Detta anses med god marginal kunna täcka det givna spaningsområdet.

Med ovan valda parametrar blir den kortaste tiden som ett stationärt mål befinner sig inom sensorns täckningsområde 18 s, vilket är fallet då målet befinner sig cirka 300 m i sidled från patrullrobotens markspår, eftersom målet då inte skär hela sensorcirkelns bredd samt överhuvudtaget inte täcks av nästkommande sensorsvep. Om ett mål befinner sig precis mitt emellan två parallellspår kommer sensortäckningen uppgå till 13 s per svep, alltså har patrullroboten i detta fall totalt cirka 26 s under vilka den kan upptäcka målet. Ökad täckningstid ger fler detektionsmöjligheter, vilket ökar sannolikheten för målupptäckt. Täckningstiden kan ökas antingen genom att patrullroboten flyger långsammare eller genom att minska spårvidden på flygbanan för att ge varje punkt i sökkorridoren täckning i två separata svep. Patrullrobotens ställhastighet begränsar hur långsamt det i praktiken går att flyga. För att bibehålla den genomsnittliga framryckningshastigheten vid ökad täckningstid behöver sökkorridorens bredd smaltas av.

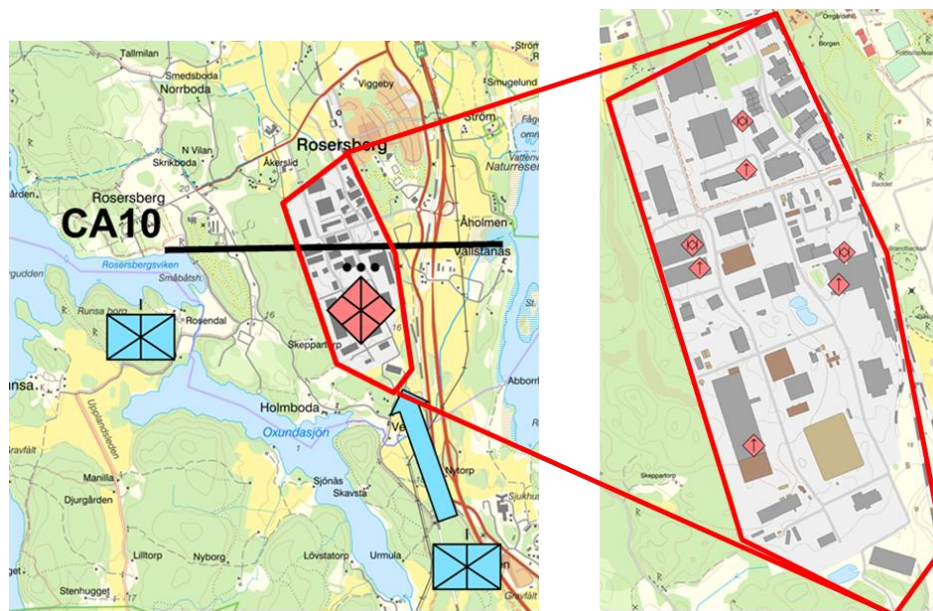


Figur 9. Exempelkörning av stridsituationen *framryckning med sammanstöt*. Den blå flygbanans spårvidd är cirka 850 m. För en genomsnittlig framryckningshastighet på 60 km/h fås en total avsökningsbredd på cirka 2 km för patrullrobotkonceptets bana. De olika färgade ytorna i figuren motsvarar olika nivåer i sannolikhet att patrullroboten upptäcker målet. Här är asfalterad landsväg samt en öppen industriyta markerad gul (hög sannolikhet för upptäckt(klassificering/identifiering), och tät skog är lila (låg sannolikhet). Den cyanfärgade kvadraten är positionen då ett mål kommer innanför patrullrobotens sensortäckning. Den gröna triangeln är position vid målupptäckt/mållåsning. Den svarta triangeln är position för byte till anfallsläge. Den svarta anfallsbanan ser på grund av det tvådimensionella diagrammet ut att göra en "omöjlig" 180°-sväng, men banan går från 3000 m höjd mot målets markposition.

Den svarta kurvan i Figur 9 representerar den del av banan då patrullroboten har gått över till anfallsmod och befinner sig i dykfasen, vilket sker cirka 3,5 km längs med vägen från startpositionen. Dykfasen utan konstant acceleration tar cirka 60 s, men om roboten accelererar under dykningen tar faser cirka 30 s. Detta resulterar i ett totalt tidsspann från upptäckt till insats (ett av effektmått i Tabell 8) på cirka 50 – 90 s, vilket bedöms tillräckligt för att kunna verka mot ett stillastående mål. I exempelkörningen, som illustreras i Figur 9, har roboten kunnat täcka ett sökområde på 2 x 3,5 km innan den upptäckt och nedkämpat målet.

4.2 Anfall i bebyggelse

Bataljonen, förstärkt med patrullrobotar, anfaller mot och upp till linje CA10 enligt Figur 10. Ett kompani anfaller mot industriområde Rosersberg, och patrullrobotsystemets uppgift är att understödja kompaniet genom att lokalisera och nedkämpa mål i ett cirka 2 km² stort industriområde. Syftet är att förvarna kompaniet och bekämpa motståndaren där egna förbands andra verkansmedel inte når dem. Förväntad motståndare är en förstärkt motoriserad spaningspluton.



Figur 10. Principskiss över stridsituation *anfall i bebyggelse* där ett kompani anfaller mot ett industriområde. Motståndaren har stridsfordon och avsutten trupp grupperade i området.

Utmaningarna för patrullroboten i lösandet av uppgiften är följande:

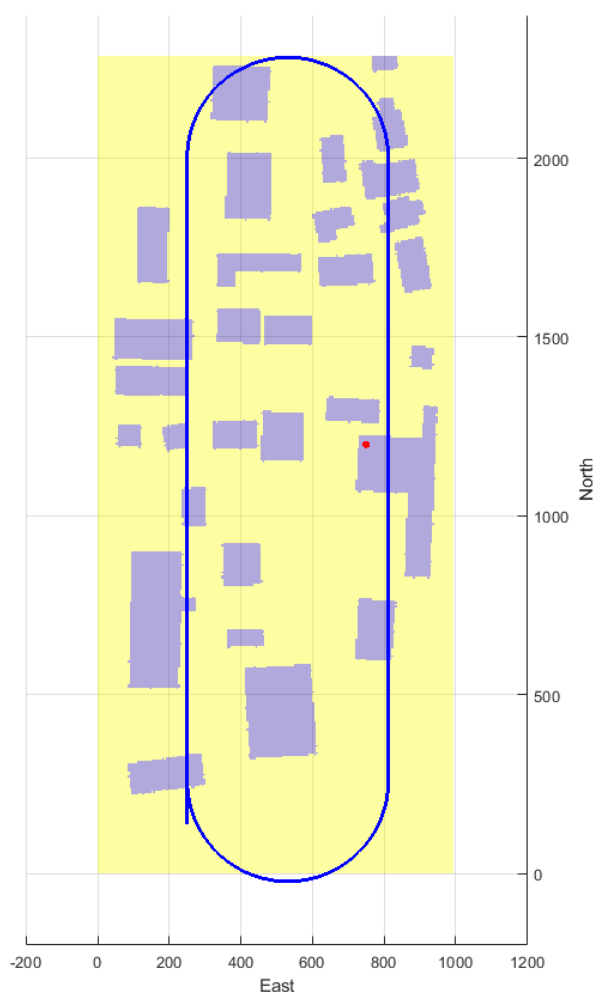
- hastigt uppkomna mål
- mål kan vara grupperade i garage och byggnader, exempelvis växelvis kör in och ut ur skyl, garage eller dylikt
- risk för sidoskador, identifiera civila, samt vän eller fiende
- proportionalitetsprincipen (väga militär nytta mot civil kostnad).
- anflygningsbanor mot mål begränsade av byggnader.

4.2.1 Lösande av uppgift

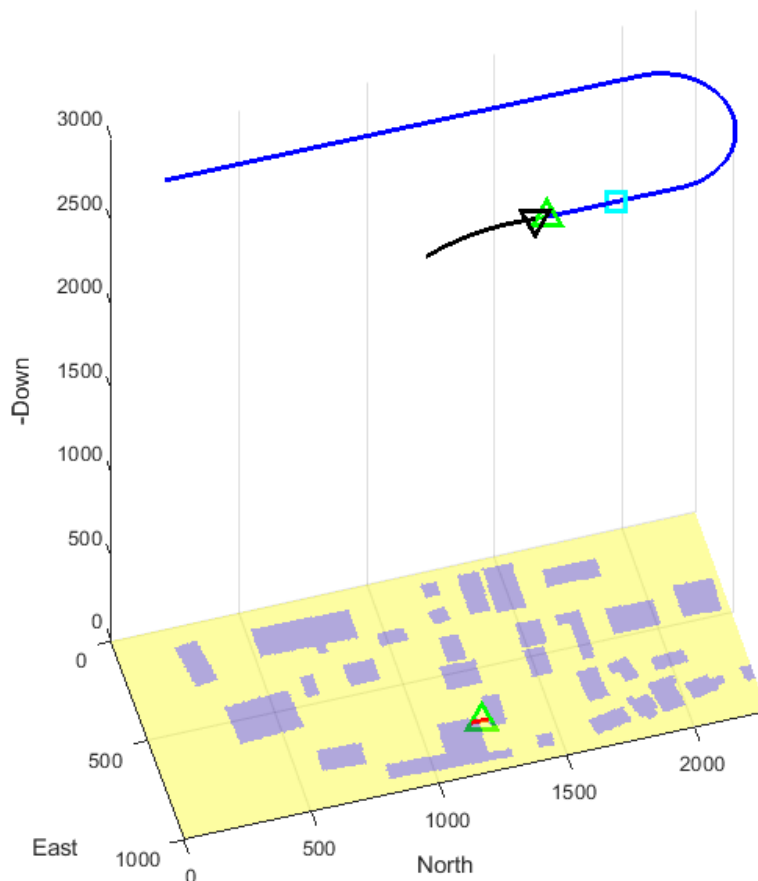
Industriområdet i denna stridsituation har ett approximativt rektangulärt sökområde som är 1 x 2 km. I detta fall väljs en sluten flygbana med två parallella spår i en oval, och ett grovt sannolikhetsraster skapades med inspiration från Rosersbergs industriområde, se Figur 11. Detta förfarande tar inte hänsyn till den faktiska tredimensionella betraktning geometrin.

För att exemplifiera utmaningarna i denna stridsituation provkörs scenariot med ett mål som rör sig från en byggnad till en annan intilliggande byggnad med ett avstånd på cirka 40 m, och därmed endast kan upptäckas av patrullroboten under en mycket begränsad tid om cirka 10 s. Även när fördröjning mellan målföljningsläge och anfallsläge sätts till 0 s är total tid till nedkämpning för lång, eftersom patrullrobotens relativt låga marschhastighet och den tilltagna höjden innebär att det fortfarande tar runt en minut att dyka hela vägen till marknivå, se Figur 12.

Slutsatsen från denna stridsituation är att även om patrullroboten kan täcka spaningsområdet, och därmed upptäcka motståndarfordon och förvarna det egna förbandet, så är det svårt för patrullrobotsystemet att lösa uppgiften med att nedkämpa motståndarfordonet från den angivna operationshöjden.



Figur 11. Sökbana för stridsituation *anfall i bebyggelse*. De gråa ytorna representerar byggnader med upptäcktssannolikhet = 0. Den blå ovalen är patrullrobotens sökbana. Den röda pricken är ett mål som i detta ögonblick befinner sig i en byggnad och därmed ej kan upptäckas.



Figur 12. Stridssituation *anfall i bebyggelse*. Variation där målet hinner gömma sig före bekämpning. Den cyanfärgade kvadraten är position då ett mål kommer inom sensortäckning. Den gröna triangeln är position för målupptäckt/mållåsning. Den svarta triangeln är position för byte till anfallsläge.

4.3 Sammanställning av resultat

Värderingsmetoden bygger på att resultatet av värderingen redovisas som definierade effektmått för patrullrobotsystemets förmåga att lösa sin uppgift. Spårbarhet säkerställs genom den hierarki av mätetal som definierades i avsnitt 2.2. Tillämpat på de två exempelsimuleringarna ovan får vi de resultat som redovisas i Tabell 9.

Resultaten visar att typsituation 4.1 kunde lösas med det nuvarande patrullrobotkonceptet. Det stillastående målet upptäcks och nedkämpas inom ett tidsspänn på 50 – 90 s. För typsituation 4.2 kan patrullrobotkonceptet dock inte lösa uppgiften med nuvarande prestanda och från den valda operationshöjden. Tidsspannet från upptäckt till nedkämpning av det rörliga målet är längre än tiden målet är synlig (cirka 10 s).

Tabell 9. Exempel på effektmått för patrullrobotsystem baserade på de studerade stridssituationerna.

Mätetal	Beskrivning	Resultat
Designparametrar (DP)	Flygparametrar	- Räckvidd, 2120 km - Uthållighet, 12 h - Marschhastighet, 45 m/s - Max. lastfaktor, 2 g - Svängradie, 147 m (2 g)
	Vapenparametrar	10 kg RSV
	Sensorparametrar	0,88 km ² (momentan täckning, 3000 m höjd)
Prestandamått	Sannolikhet för målupptäckt	Hög, mål inom synfält under 23 s i marschhastighet.

(eng. <i>Measure of Performance</i>)	Tidsspannet från upptäckt till insats	• 90 s (oaccelererad dykning) • 50 s (accelererad dykning)
	Operationsområde, yta där patrullroboten kan verka	Ca 2 x 3,5 km
Effektmått (eng. <i>Measure of Effectiveness</i>)	Antal/andel nedkämpade mål	1 mål i typsituation 4.1 0 mål i typsituation 4.2
	Antal plattformar som nyttjats för uppgiften	1 patrullrobot i respektive typsituation.
	Antal plattformar förbrukade (använda för insats alt bekämpade av fienden).	1 patrullrobot i respektive typsituation.

4.4 Diskussion

I denna inledande värdering har endast två exempel på typsituationer simulerats, vilket inte ger ett tillräckligt underlag för att kunna dra några slutsatser. I ett vidare värderingsarbete bör fler situationer, bekämpningsfall och måltyper analyseras. Osäkerheter i sensor-, verkans-, telekrigsförmåga etc. har inte beaktats i denna sammanställning.

5 Sammanfattning och fortsatt arbete

Ett patrullrobotkoncept har tagits fram enligt en på förhand bestämd kravställning, bland annat med krav att kunna verka mot rörliga hårda mål. En simuleringsmodell av konceptet har utvecklats för att på ett övergripande sätt kunna värdera konceptets förmåga att avsöka ett tilldelat område, upptäcka samt nedkämpa utpekade mål. Ett inledande värderingsarbete har skett enligt en tidigare utvecklad värderingsmetod i två framtagna stridssituationer. Syftet har varit att tillämpa värderingsmetoden på ett nytt vapensystem och visa hur robotens bidrag till stridseffekt kan värderas, samt att lägga grunden för fortsatt utveckling av metoder och modeller för värdering av patrullrobotsystem och andra vapensystem.

Under 2022 har projektet som mål att nyttja vapensystemmodeller, framtagna både under tidigare arbete i projektet och i andra projekt, för en demonstration av värderingsmetoder för kombinerade vapensystem. Modeller och metoder presenterade i denna rapport ingår som en del i detta arbete. Metoder för att värdera patrullrobotkoncept som minsystem i isolation eller i kombination med andra minsystem kommer också att studeras.

5.1 Vidare värderingsarbeten

I arbetet som utförts har förmågan hos en patrullrobot studerats i två exempel på stridssituationer. Stridssituationerna utgör en grund för fortsatt värdering av patrullrobotkonceptet, där förutsättningar i stridssituationerna kan varieras för att undersöka inverkan på utfallet av exempelvis varierande uppträdande hos motståndaren, terrängtyper, väderförhållanden eller tid på dygnet.

En värderingsfråga som är intressant att undersöka är patrullrobotssystemets uthållighet. Tiden i stridssituationerna där systemet används kan vara längre än enskilda patrullrobotars operationstid, och robotarna behöver då ersättas med jämna mellanrum. De robotar som inte gjort någon insats bör då ha förmågan att återvända, landas och laddas om. Hur lång tid det tar att klargöra en patrullrobot för ny insats blir då en parameter för systemets uthållighet. Förmågan hos robotar att samverka under sin flygtid kommer också att påverka hur många patrullrobotar som behövs för att lösa en eller flera uppgifter.

För att analysera vilka förmågor patrullrobotsystemet bidrar med i stridssituationer bör konceptet jämföras med alternativa verkanssystem samt värderas i kombination med andra vapensystem. Exempelvis kan följande konceptvärderingar göras:

- patrullrobotsystemet som enda indirekta vapensystem
- patrullrobotsystem i kombination med eldrörsartilleri
- patrullrobotsystem i kombination med andra RPAS för inmätning
- patrullrobotsystem i kombination med spanande RPAS och eldrörsartilleri
- avvägningar mellan fler mindre robotar (med mindre uthållighet och mindre verkansdel) kontra färre, större robotar med bättre verkansförmåga mot hårda mål.

5.2 Vidare utveckling av simuleringsmodellen

För fortsatt värdering av patrullrobotkoncept inom kontexten av kombinerade vapensystem har följande områden identifierats för vidare utveckling och fördjupning:

- Modelleringen av patrullrobot kan utökas genom att
 - punktmassmodellen utökas med fler frihetsgrader för att kunna ta hänsyn till aerodata och framdrivningsmöjligheter
 - styrautomat införs
 - logik för beteende införs.
- Modellering av sensorkedja kan utökas genom att
 - sensorsimuleringar görs i eller utanför simuleringsmodellen

- effekter av terräng och skyl tas med i simuleringsmodellen.

En utökning av simuleringsmodellen med fler frihetsgrader (för att även kunna ta hänsyn till robotens orientering) skulle vara värdefullt för att få en mer realistisk modell av systemets praktiska flygprestanda. Designen av patrullrobotens styrautomat behöver utföras i samband med utökningen av antalet frihetsgrader för att i simuleringar kunna anpassa patrullrobotens flygbanor. Även vidare arbete med modelleringen av patrullrobotens beteende under de olika uppdragsfaserna rekommenderas. Dessa förbättringar bedöms tillsammans vara av direkt nytta för att bättre kunna värdera de praktiska egenskaperna hos patrullroboten och för jämförelse av olika flygbanor.

En motståndares förmåga till att verka mot patrullrobotar med luftvärn är också intressant att studera, för att få mer kompletta resultat för systemets bidrag till ett förbands stridseffekt. Detta behövs sannolikt för att mer rättvisande jämföra patrullrobotsystem mot andra vapensystem.

6 Referenser

- [1] T. Beran och E. Fedina, "Formalisering av stridseffekt", FOI-R--4666--SE, FOI, Stockholm, 2018.
- [2] E. Fedina, N. Stensbäck, J. Stenberg och J. Agnarsson, "Stridseffekt för mekaniserad strid", FOI-R--5098--SE, FOI, Stockholm, 2020.
- [3] R. Farid, E. Fedina och N. Stensbäck, "Litteraturstudie om patrullrobotar", FOI-D-1036--SE, FOI, Stockholm, 2021.
- [4] M. Voskuijl, T. Dekkers och R. Savelsberg, "Flight Performance Analysis of the Samad Attack Drones Operated by Houthi Armed Forces", *Science & Global Security - The Technical Basis for Arms Control, Disarmament, and Nonproliferation Initiatives*, vol. 28, nr 3, pp. 113-134, 2020.
- [5] D. P. Raymer, *Aircraft Design: A Conceptual Approach*, Washington DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1992.
- [6] "Sizing RC Airplane Propellers", [Online]. Tillgänglig: <https://www.hooked-on-rc-airplanes.com/sizing-rc-airplane-propellers.html>. [Använd 1 Oktober 2021].
- [7] "Multi-purpose shaped charge warheads", [Online]. Tillgänglig: <https://www.gd-ots.com/missiles-and-rockets/warheads-and-payloads/multi-purpose-shaped-charge-warheads>. [Använd 3 Juni 2021].
- [8] J. Irvine, "National imagery interpretability rating scales (NIIRS): overview and methodology", *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 1997.
- [9] J. C. Leachtenauer, W. Malila, J. Irvine, L. Colburn och N. Salvaggio, "General Image-Quality Equation: GIQE", *Applied Optics*, vol. 36, nr 32, pp. 8322-8328, 1997.
- [10] J. C. Leachtenauer, W. Malila, J. Irvine, L. Colburn och N. Salvaggio, "General image-quality equation for infrared imagery", *Applied Optics*, vol. 39, nr 26, pp. 4826-4828, 2000.
- [11] "AeroVironment", [Online]. Tillgänglig: www.avinc.com/images/uploads/product_docs/DDL_Datasheet_2017_Web_v1.pdf. [Använd 27 September 2021].
- [12] "Elbit Systems", [Online]. Tillgänglig: http://www.elbitsystems.com/media/Starlite_short_range.pdf. [Använd 27 September 2021].
- [13] "Tualcom", [Online]. Tillgänglig: www.tualcom.com.tr/en/data-link. [Använd 27 September 2021].
- [14] "Elbit Systems", [Online]. Tillgänglig: http://elbitsystems.com/media/Starlite_family-1.pdf. [Använd 27 September 2021].
- [15] "AeroVironment", [Online]. Tillgänglig: http://www.avinc.com/images/uploads/product_docs/DDL_FutureState_Datasheet_02012021.pdf. [Använd 27 September 2021].

- [16] "Elbit Systems", [Online]. Tillgänglig:
<http://www.elbitsystems.com/products/communication-systems/uas-data-link-systems/>. [Använd 27 September 2021].
- [17] J. D. Anderson, "Design of a propeller-driven airplane", i *Aircraft performance and design*, McGraw-Hill, 1998, p. 409.
- [18] M. Nordin, "A Novel Submarine Design Method. Based on technical, economical and operational factors of influence", Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg, 2014.

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



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
164 90 Stockholm

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

www.foi.se