



Gemensamma teknikbehov inom obemannade och autonoma system

Slutrapport

JOUNI RANTAKOKKO, JESSICA APPELGREN,
KRISTOFER BENGTTSSON, MARTIN HAGSTRÖM,
OVE JANSSON, KARIN KRAFT, FREDRIK KULLANDER,
JONAS NYGÅRDS, FREDRIK NÄSSTRÖM,
MAGNUS PETTERSSON, JOAKIM RYDELL,
ROGIER WOLTJER

Jouni Rantakokko, Jessica Appelgren,
Kristofer Bengtsson, Martin Hagström,
Ove Jansson, Karin Kraft, Fredrik Kullander,
Jonas Nygårds, Fredrik Näsström,
Magnus Pettersson, Joakim Rydell,
Rogier Woltjer

Gemensamma teknikbehov inom obemannade och autonoma system

Slutrapport

Titel	Gemensamma teknikbehov inom obemannade och autonoma system – Slutrapport
Title	Common technology needs within unmanned and autonomous systems – Final report
Rapportnr/Report no	FOI-R--5096--SE
Månad/Month	December
Utgivningsår/Year	2020
Antal sidor/Pages	72
ISSN	1650-1942
Kund/Customer	Försvarsmakten
Forskningsområde	Övrigt
FoT-område	Samverkansprogrammet
Projektnr/Project no	E72876
Godkänd av/Approved by	Christian Jönsson
Ansvarig avdelning	Ledningssystem

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

Den tekniska utvecklingen inom området obemannade farkoster går i en allt raskare takt och antalet länder som inför obemannade system ökar snabbt. En grundläggande förståelse för dessa systems inverkan på den framtida striden inom mark-, sjö- och luftarenorna är av vikt för att kunna stödja Försvarmaktens förmågeutveckling inom området. Förståelsen krävs även för att kunna bedriva taktikutveckling i syfte att effektivt kunna möta hotet från en motståndare som nyttjar obemannade farkoster.

Rapporten ger en övergripande bild av de aktiviteter som genomförts inom projektet *Gemensamma teknikbehov inom autonomi/obemannat* under perioden 2017 till 2020. En bred tekniköversikt har genomförts som beskriver nuläget för obemannade farkoster, den internationella utvecklingen samt kvarvarande utmaningar som behöver adresseras för att obemannade farkoster ska nå sin fulla potential. De forskningsområden som adresserats är samverkan mellan bemannade och obemannade system och användargränssnitt, robusta navigeringstekniker, behov och utmaningar med att realisera kommunikationssystem för obemannade farkoster samt feldetektion och felhantering. Juridiska och etiska frågeställningar rörande användningen av autonomi, och framförallt obemannade system med bekämpningsförmåga, inom Försvarmakten har även analyserats. Slutligen sammanfattas även nationella och internationella samarbetsaktiviteter.

Nyckelord: obemannade farkoster, autonomi, UAV, UGV, USV, AUV, navigering, kommunikation, juridik, etik, feldetektion, felhantering, MUMT, användargränssnitt

Summary

The development within the area of unmanned vehicles is vigorous and the technology is proliferating rapidly. A basic knowledge and understanding about how these systems can affect the future warfare in the ground, sea, and air domains is essential in order to support the Swedish Armed Forces future capability development efforts. This knowledge is also critical in order to understand how technical weaknesses can be exploited in order to hinder the opponent from effectively using unmanned systems.

The report provides an overview of the activities that have been performed within the project *Common technology needs for unmanned and autonomous systems* during 2017 to 2020. A broad technology overview has been performed, which describes the state-of-the-art for current unmanned vehicles, the main international development efforts and remaining research challenges that need to be targeted in order to obtain operationally efficient systems. The main research areas that have been targeted are manned-unmanned teaming and human-machine-interfaces and robust navigation technologies. Pre-studies targeting communication vulnerabilities and possibilities, and methods for fault detection, identification and recovery, have been performed. Legal and ethical considerations concerning the use of autonomy, discussing armed unmanned vehicles in particular, within the Swedish Armed Forces have been addressed. An overview of international and national cooperation activities is also provided.

Keywords: unmanned vehicles, autonomy, UAV, UGV, USV, AUV, navigation, communication, law, ethics, fault detection, recovery, manned-unmanned teaming, MUMT, man-machine-interface

Innehållsförteckning

1	Inledning	9
1.1	Projektets syfte och mål	9
1.2	Projektets frågeställningar	9
1.3	Genomförda aktiviteter	10
1.4	Publikationer	11
1.4.1	FOI-rapporter och Memo	11
1.4.2	Externa publikationer	12
1.4.3	Examensarbeten	13
2	Tekniköversikt	15
2.1	Bakgrund	15
2.1.1	Autonom kontra automatisk	15
2.1.2	Egenskaper hos obemannade farkoster	17
2.2	Historik	18
2.3	Markstrid	18
2.3.1	UGV	18
2.3.2	UAV	20
2.3.3	Uppskattad tidslinjal för utveckling av nya förmågor ..	20
2.3.4	Konceptförslag	21
2.4	Sjöstrid	22
2.4.1	UAV	22
2.4.2	USV	22
2.4.3	AUV	23
2.4.4	Framtida användningsområden	23
2.5	Stridstekniska och taktiska UAV:er	24
2.6	Fortsatt arbete	25
3	Juridiska och etiska aspekter	27
3.1	Syfte och mål	27
3.2	Resultat och överföring	27
3.3	Bakgrund	28
3.4	Definition av autonoma system	29

3.5	Folkrätten	30
3.6	Meningsfull mänsklig kontroll.....	32
3.7	Är det möjligt att ställa krav på mänsklig kontroll av autonoma system?.....	34
3.8	Framtida arbete	36
4	Manned-Unmanned Teaming & MTO-aspekter	37
4.1	Bakgrund.....	37
4.2	Genomförda aktiviteter	38
4.2.1	Behovsanalys.....	38
4.2.2	Funktionsanalys	38
4.2.3	Konceptuella användningsfall och operatörsgränssnitt	39
4.3	Uppbyggnad av simuleringsförmåga	39
4.3.1	Syfte	40
4.3.2	Genomförande	40
4.3.3	Resultat	41
4.4	Diskussion.....	42
4.5	Fortsatt arbete.....	43
5	Robusta navigeringssystem	45
5.1	Bakgrund.....	45
5.2	Automatisk landning	47
5.2.1	Bakgrund.....	47
5.2.2	Genomförande	48
5.2.3	Fortsatt arbete.....	51
5.3	Förbättrad navigering genom dynamisk ruttanpassning	52
5.3.1	Bakgrund.....	52
5.3.2	Genomförande	52
5.3.3	Kvarvarande forskningsutmaningar	53
5.4	Stjärnnavigering.....	54
5.4.1	Bakgrund.....	54
5.4.2	Genomförande	54
5.4.3	Diskussion.....	57

5.4.4	Kvarvarande utmaningar	58
6	Feldetektion och felhantering.....	59
6.1	Syfte och mål	59
6.2	Bakgrund	59
6.3	Genomförande	60
7	Samarbeten.....	61
7.1	Nationella samarbeten.....	61
7.1.1	FoT-verksamhet.....	61
7.1.2	Kunskapsöverföring genom studier och spel	62
7.2	Internationella samarbeten	62
7.2.1	NORDEFCO	62
7.2.2	NATO	63
8	Resultat och rekommendationer.....	67
	Referenser.....	69

1 Inledning

Den tekniska utvecklingen inom området obemannade system går i en allt raskare takt och antalet länder som inför obemannade system ökar snabbt. Användningen av obemannade system är inte begränsad till högteknologiska stater utan tekniken är tillgänglig för samtliga aktörer. Att skapa en förståelse för dessa systems inverkan på den framtida striden är kritiskt för att kunna stödja Försvarmaktens förmågeutveckling inom området. Det är även av vikt för att kunna bedriva taktikutveckling i syfte att effektivt kunna möta hotet från en motståndare som nyttjar obemannade och autonoma farkoster.

Rapporten utgör slutrapporteringen av FoT-projektet *Gemensamma teknikbehov inom autonomi/obemannat*¹ (GT-OAS) som genomförts under perioden 2017 till 2020. Rapporten innehåller i stora delar sammanfattningar av tidigare publikationer som tagits fram i projektet.

1.1 Projektets syfte och mål

Målet med projektet var att utveckla kunskap, metoder och verktyg för att stödja Försvarmaktens förmågeutveckling inom området obemannade och autonoma system för alla arenor. Projektet har även som mål att öka kunskapen hos Försvarmakten och FMV rörande möjligheter och utmaningar med obemannade system, samt hos de olika nödvändiga autonoma funktioner som möjliggör autonoma system. Ambitionen är att detta ska medge en förbättrad kvalitet i samband med Försvarmaktens förmågeutvecklingsarbete samt vid framtida kravställning och anskaffning.

Projektets mål och initialt identifierade förmågor och teknikområden illustreras i figur 1.1. Utöver dessa finns ytterligare områden som är viktiga, främst legala och etiska aspekter rörande framförallt beväpnade obemannade system, frågor rörande hur obemannade system kan samverka effektivt och cyberhot.

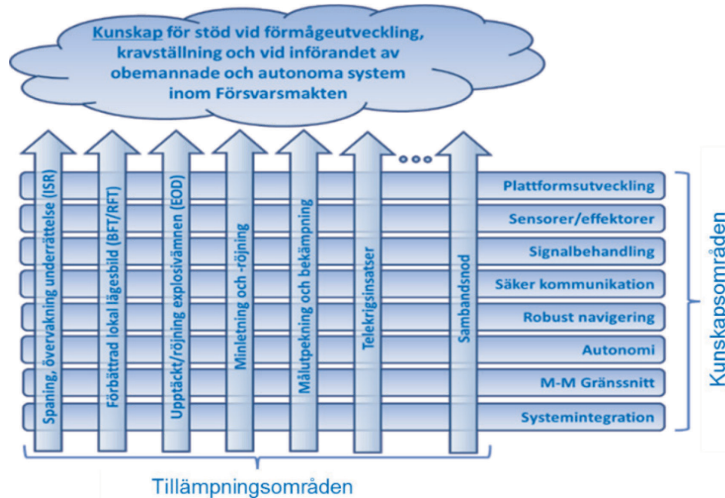
1.2 Projektets frågeställningar

Projektet har studerat följande övergripande frågeställningar:

- Hur ska nödvändiga funktioner² för autonomt uppträdande realiseras?

¹ Projektet har genomförts under FoT-området Samverkansprogrammet. Beställningsnummer och beställningsnamn: AT.9226003 Autonomi/Obemannat FOI 20.

² Exempelvis robust och störtlåg navigering och kommunikation, feldetektion och hantering av nödsituationer samt rutt och uppdragsplanering.



Figur 1.1: Projektets målbild och exempel på initialt identifierade tillämpnings- och teknikområden [1].

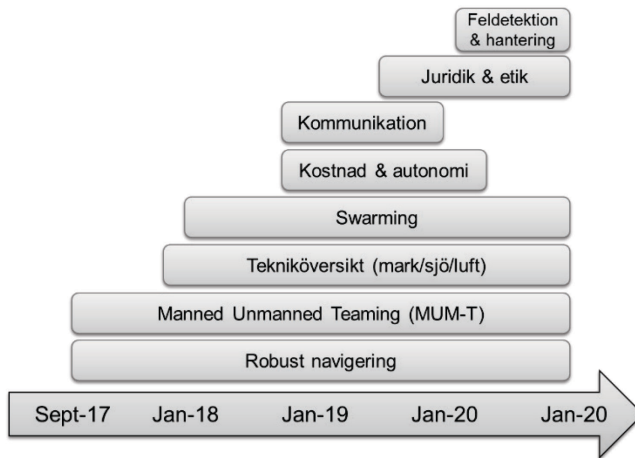
- Hur sker samverkan mellan bemannade och obemannade system och vilka funktioner är lämpliga att automatisera med hänsyn till samverkan med bemannade system?
- Hur ska många enklare obemannade system (flockar) utformas för att lösa komplexa uppgifter?
- Hur kan legala och etiska frågeställningar kopplat till autonoma system analyseras och hur bör analysen omhändertas i Försvarsmakten?

Dessa frågeställningar har styrt inriktningen på de aktiviteter som genomförts.

1.3 Genomförda aktiviteter

I figur 1.2 illustreras när de huvudsakliga aktiviteterna genomförts inom projektet:

- Tekniköversikter (mark, sjö och luft) (kapitel 2)
- Juridiska och etiska frågeställningar kopplade till autonoma system (kapitel 3)
- Manned-Unmanned Teaming, MUM-T (kapitel 4)
- Robust navigering (kapitel 5)
- Fel-detektion och felhantering (kapitel 6)
- Swarming (avsnitt 7.2.1)
- Kostnadsanalyser för autonoma system (avsnitt 7.2.2)



Figur 1.2: Illustration av de huvudsakliga aktiviteter som genomförts inom projektet GT-OAS.

Utöver dessa aktiviteter så har även begränsade insatser genomförts inom områden som är av vikt för området obemannade och autonoma farkoster som helhet. En förstudie rörande forskningsutmaningar för realiserandet av robusta kommunikationssystem för obemannade och autonoma system har genomförts. Projektet har även finansierat deltagande vid NATO-möten och övningar.

1.4 Publikationer

Inom ramen för projektets verksamhet har ett antal publikationer tagits fram.

1.4.1 FOI-rapporter och Memo

J. Rantakokko, J. Rydell, P. Strömbäck, F. Marsten-Eklöf, A. Lennartsson och M. Hagström, *Autonomi och obemannade system - Förslag till inriktning av delområdet Robust navigering*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--4523--SE, december 2017.

K. Bengtsson och R. Woltjer, *Autonomi och obemannade system - Inriktning av forskning inom delområdet Manned-Unmanned Teaming (MUM-T)*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--4522--SE, december 2017.

K. Bengtsson och O. Jansson, *Förutsättningar för human-autonomy-teaming*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-D--0854--SE, 2018.

J. Rantakokko, *Tekniköversikt autonoma och obemannade system - Del 1: Historik*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--4680--SE, december 2018.

J. Rantakokko och J. Rydell, *Robust navigering för obemannade farkoster - statusuppdatering*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI Memo 6593, december 2018.

J. Rantakokko, *Standarder och gemensamma användargränssnitt som möjliggörare för effektiv MUM-T*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI Memo 6594, december 2018.

K. Bengtsson, J. Nordlöf, J. Nygårds och R. Woltjer, *Avrapportering av iakttagelser vid övningsverksamhet*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI Memo H2040, 2019.

J. Rantakokko, F. Näsström och T. Mårtensson, *Nuläge och förväntad utveckling inom området stridstekniska och taktiska RPAS*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI Memo 6685, mars 2019.

J. Rantakokko och J. Nygårds, *Avrapportering från AWE18 Exploitation Conference*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI Memo 6720, maj 2019.

J. Rantakokko, F. Näsström, J. Nygårds, R. Woltjer och K. Bengtsson, *Tekniköversikt autonoma och obemannade system - Del 2: Markstriden*, Totalförsvarets Forskningsinstitut, FOI-R--4901--SE, november 2019.

G. Eriksson, A. Hansson, P. Holm, J. Nilsson och J. Rantakokko, *Robust och störtålig kommunikation för obemannade farkoster - Utmaningar och möjligheter*, Totalförsvarets Forskningsinstitut, FOI-R--4895--SE, december 2019.

J. Rantakokko, *Redovisning av arbetsmöten och seminarier*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI Memo 6959, december 2019.

J. Appelgren, T. Beran, A. Musco Eklund och M. Hagström, *Autonoma vapensystem – tekniska, legala och etiska aspekter*, FOI Memo 6953, 2019.

O. Jansson och K. Bengtsson, *Funktionsgeneralisering MUM-T*, Totalförsvarets forskningsinstitut, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-D--0929--SE, 2020.

A. Musco Eklund, *Meaningful Human Control of Autonomous Weapon Systems - Definitions and Key Elements in the Light of International Humanitarian Law and International Human Rights Law*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--4928--SE, februari 2020.

J. Rantakokko, K. Bengtsson, C. Svensson, R. Lennartsson och M. Skarstind, *Tekniköversikt autonoma och obemannade system - Del 3: Sjöstriden*, Totalförsvarets Forskningsinstitut, FOI-R--5088--SE, december 2020.

1.4.2 Externa publikationer

Följande externa publikationer har projektet bidragit till:

P. Jyrkönen, M. Miettinen, A. Pettersen och M. Hagström, *Study report on unmanning of systems – Swarming technologies*, NORDEF Working Group Swarming, 2018.

J. Rantakokko, J. Nygårds, A. Pettersen, O. K. Hagen och T. Saarelainen, *Study report on unmanning of systems - Robust navigation*, NORDEF Working Group Robust Navigation, april 2019.

Development of Autonomous Medical Systems for Tactical Care Evacuation - Final Report, NATO STO Human Factors and Medicine Panel, HFM ET-167, 2019.

G. Court, M. Parr, J. Murumets, M. Hagström, S. Allik och T. Jefferis, *Understanding the cost related implications of autonomy - A system of systems perspective*, NATO STO Systems Analysis and Studies Panel, SAS ST-146, april 2020.

1.4.3 Examensarbeten

Fem examensarbeten har genomförts:

J. Pettersson, *Exploring interaction with unmanned systems: A case study regarding interaction with an autonomous unmanned vehicle*, Linköping University, LIU-IDA/KOGVET-G--20/011—SE, 2020.

A. Andersson Jagesten och A. Källström, *Autonomous landing of an unmanned aerial vehicle on an unmanned ground vehicle in a GNSS-denied scenario*, Linköping University, LiTH-ISY-EX-20/5327--SE, juni 2020.

A. Musco Eklund, *Meaningful human control of autonomous weapon systems - Institutional definitions in the light of international humanitarian law and international human rights law*, Umeå Universitet, 2020.

D. Sandmark, *Navigation strategies for improved positioning of autonomous vehicles*, Linköping University, LiTH-ISY-EX--19/5255--SE, augusti 2019.

K. Gudmundson, *Ground based attitude determination using a SWIR star tracker*, Linköping University, LiTH-ISY-EX--19/5236--SE, juni 2019.

2 Tekniköversikt

De inom ramen för projektet framtagna tekniköversikterna ger dels en bild av den historiska utvecklingen för obemannade system i alla tre arenorna (sjö, mark och luft) [2] och dels en bild av nuvarande teknikläge inom mark [3] och sjöarenorna [4]. Arbetet med att slutföra tekniköversikten som fokuserar på Luftstriden pågår för närvarande. En bedömning av utvecklingen inom tekniker och förmågor för taktiska och stridstekniska RPAS (*Remotely Piloted Aircraft Systems*) har även tagits fram [5].

Tekniköversikterna för de respektive arenorna ger en ögonblicksbild av teknikläget idag och ger därefter förslag på områden där obemannade system kan komma att införas med god operativ effekt på kort och medellång sikt. Den utveckling som behöver ske för att nå dit beskrivs även, baserat på analyser av teknikläget inom kritiska delområden. Arbetet bedöms vara intressant för såväl egen, inhemsk, förmågeutveckling och även kopplat till en ökad kunskap om hur en motståndare kan tänkas nyttja sådana system. Sammantaget bidrar tekniköversikterna till ett underlag för diskussion mellan Försvarsmakten, FMV, FOI och industrin kopplat till framtida förmågeutveckling och anskaffning. Det gäller både egna obemannade system och system avsedda att försvåra en motståndares nyttjande av sådana system.

2.1 Bakgrund

Obemannade farkoster utgör en uppskattad förmåga som i många insatser ger en ökad operativ effekt. Det dimensionerande scenariot för Försvarsmakten utgörs av förmågan att möta ett väpnat angrepp från en kvalificerad motståndare som förväntas ha avsevärda resurser för telekrig. Dessa förhållanden förväntas få en långtgående påverkan på utvecklingen av framtidens obemannade system. Det finns ett stort behov av att förbättra kritiska deltekniker hos obemannade system, som kommunikations- och navigationssystem men även en ökad grad av autonomi behöver utvecklas.

2.1.1 Autonom kontra automatisk

Inför diskussioner om autonomi och autonoma system är det betydelsefullt att förstå att det saknas nationellt och internationellt vedertagna definitioner [6]. Nationalencyklopedin definierar ordet autonomi som *självständighet* eller *oberoende* men själva innebörden varierar utifrån vilket sammanhang de används i (exempelvis inom teknologi, medicin, etik, folkrätt och politik).

Inom området militär teknik använder olika organisationer egna förslag på definitioner av hur autonominivåer ska delas in. Som exempel kan nämnas att försvarsdepartementet i USA har en definition som de försöker få de olika

försvarsgrenarna att acceptera men de använder sig fortfarande av egna definitioner, samtidigt som även försvarsalliansen Nato har en egen definition.

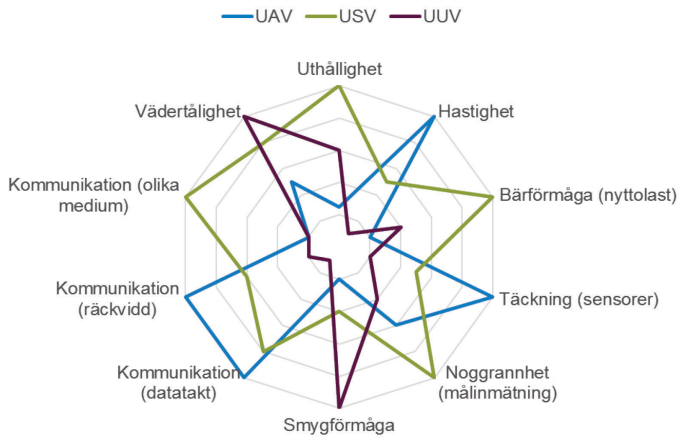
Försvarsmaktens skriver att ”en autonom farkost förs fram utan förare och kan på egen hand manövrera på marken, i luften eller i vattnet. Farkosten kan förses med kameror, sensorer eller annan utrustning som gör att den kan samla data till en markkontroll där bilder eller annan information kan tolkas”.³ Denna beskrivning illustrerar problematiken då den ger en korrekt beskrivning av exempelvis en RPAS som utför spaningsuppdrag men den passar inte särskilt väl in på autonoma undervattensfarkoster som har begränsade kommunikationsmöjligheter. Det kan finnas ett värde i att ta fram en försvarsmaktsgemensam definition men en enhetlig internationell definition kommer oavsett fortsatt att saknas.

Ingen väldefinierad gräns finns heller definierad mellan autonoma och automatiska system, skillnaden är närmast filosofisk. Var gränsen går bedöms ibland utifrån hur intelligent systemet bedöms vara [6]. Ett autonomt system inbegriper ofta vad som beskrivs som artificiell intelligens (AI), men inte heller AI-begreppet har en vedertagen definition som spänner över olika forskningsfält.

Inom filosofin är det en avgörande skillnad mellan automatisk och autonom. Autonom beskriver en människas oberoende, och moraliska rätt att fatta beslut. För ett tekniskt system är däremot skillnaden på ett autonomt och automatiskt system mer en semantisk fråga om komplex automation. Autonom är ett ord som ofta används för komplex automation medan automatisk är ett begrepp som används för mer välkända automatiska funktioner och vad som uppfattas som enkla system. I [7] diskuteras dessa definitioner och där rekommenderas att istället för autonoma system använda uttrycket *system med autonoma funktioner*. För ett tekniskt system med en automatisk, eller autonom, funktion innebär det att den funktionen agerar utan påverkan av en operatör. Ett system kan vara autonomt i en delfunktion eller i alla sina funktioner. Farthållaren i en bil håller bilens hastighet utan mänsklig interaktion. Om föraren vill öka eller reducera hastigheten så interagerar hen med systemet men så länge farthållaren är inkopplad är den autonom. En målsökande robot är autonom efter avfyrning (även om moderna robotar numera ofta har datalänkar och kan erhålla nya måldata efter avfyrning).

Ovanstående kan tyckas vara en diskussion av akademisk art som inte har beröring till Försvarsmaktens verksamhet. Definitionerna kan dock komma att få praktisk betydelse, vilket illustreras av debatten som pågår rörande förbud och regleringar av användningen av AI och autonoma vapensystem (se kapitel 3).

³ www.forsvarsmakten.se/sv/ordlista/



Figur 2.1: Relativ jämförelse mellan viktiga egenskaper hos olika klasser av obemannade farkoster.

2.1.2 Egenskaper hos obemannade farkoster

I figur 2.1 illustreras generella egenskaper hos olika typer av obemannade farkoster (UAV, USV och UUV).⁴ En översiktlig relativ jämförelse har genomförts [4]. En USV har typiskt en avsevärt längre uthållighet och kan bära mer nyttolast jämfört med en UAV eller UUV. Noggrannheten vid målinmätning bedöms även vara högre då de bland annat kan bära tyngre navigationssensorer än en UAV medan en UUV opererar i en svårare miljö utan tillgång till exempelvis satellitbaserade navigationssystem. Den förmåga där en UUV har betydande fördelar i jämförelse med andra farkosttyper är smygegenskaperna. De är även mindre känsliga mot dåligt väder, där framförallt mindre UAV:er har stora problem.

En UAV har sina främsta styrkor när det gäller hastighet och att de upphöjda sensorerna ger god yttäckning, samt när det gäller räckvidd och datatakt i radiokommunikationen. En USV har dock fördelar när det gäller kommunikation då den kan kommunicera med både flygande och ytgående farkoster (radio) och undervattensfarkoster (akustiskt), även om en UAV exempelvis kan kommunicera med UUV:er nära ytan (laser). Utifrån denna genomgång av egenskaper hos olika typer av obemannade system framgår att de har delvis kompletterande styrkor och att de har olika goda förutsättningar att lösa specifika uppgifter. En heterogen sammansättning av obemannade system är även intressant för många framtida uppgifter.

⁴ UAV – Unmanned Aerial Vehicle, USV – Unmanned Surface Vehicle, UUV – Unmanned Underwater Vehicle. UUV delas även in i de två undergrupperna ROV (Remotely Operated Vehicle) och AUV (Autonomous Underwater Vehicle).

2.2 Historik

Den historiska utvecklingen visar på att teknikutvecklingen förvisso har gått framåt i relativt hög takt men att utmaningarna för obemannade system har varit desamma under flera decennier [2]. En aspekt som är högst aktuell idag och som även starkt hämmade utvecklingen av obemannade system i USA redan efter Vietnamkriget, då uppmärksamheten riktades mot att möta hotet från Warszawapakten, var svårigheterna att använda obemannade system (främst UAV:er) i en konflikt mot en motståndare med kvalificerade telekrigs- och luftvärnssystem [2]. Utmaningarna har även berört exempelvis förmågan att självständigt förflytta sig och att takta ambitionerna om nyttjandet med kunskap om hur systemen ska fungera ihop med nyttjande förbands metoder och taktiska uppträdande. Andra frågor som har varit likartade en längre tid är vilken nytta (exempelvis avlastning, förmågeökning och resultat) de obemannade systemen ger kontra kostnad (såväl ekonomiskt som personellt).

2.3 Markstrid

Obemannade farkoster bedöms kunna ge en ökad operativ effekt inom ett antal olika användningsområden [3]. Flygande obemannade farkoster har idag en högre teknisk mognadsgrad än motsvarande markgående farkoster. Utmaningarna med högggradigt automatiserad körning i ostrukturerade okända miljöer och under vinterförhållanden är avsevärt svårare att lösa än att utveckla autonoma UAV:er. Obemannade markfarkoster (*Unmanned Ground Vehicle, UGV*) som är avsedda att operera även i svår terräng bedöms vara teleopererade under det närmaste årtiondet [3].

2.3.1 UGV

Det finns grund för att påstå att det idag pågår en kapprustning internationellt när det gäller utvecklingen av framförallt tyngre UGV:er avsedda för strid [3]. Ryssland genomför en modernisering av sina väpnade styrkor och de har även förbättrat sin telekrigsförmåga de senaste åren. De experimenterar med beväpnade UGV:er för stridsuppgifter under realistiska förhållanden i bland annat Syrien [3]. Utvecklingen av plattformar, beväpning och sensorer har kommit långt och experimentering med nya obemannade markfordon kommer att intensifieras de närmaste fem åren i syfte att utveckla effektiva koncept för hur dessa ska användas och samverka med bemannade system för att lösa olika stridsuppgifter.

UGV:er har använts operativt med stor framgång för neutralisering och röjning av minor och oexploderad ammunition, spaning och övervakning i urbana miljöer samt bas- och gränsövervakning. För andra uppdrag såsom spaning, övervakning och målinmätning, bekämpning och logistik utgör fortsatt begränsningar i framkomlighet, hastighet och navigerings- och kommunikations-systemen utmaningar som behöver lösas.

Tabell 2.1: Bedömd tidslinjal för när olika förmågor kan vara tekniskt realiserbara, samt förväntade egenskaper rörande styrning och autonomi [3].

Tidsperiod	Nya eller förbättrade förmågor
2020 – 2025	Avancerade förar- och operatörsstöd (automatisk bromsning och väjning, undvika vältning, etc), bärhjälp (<i>mule</i>), framförs bemannat (optionellt bemannad UGV) för snabbare körning och i svårare terräng, mindre UGV:er (typ THeMIS) med fjärrstyrda stabiliserade vapenstationer och stöd för målföljning
2025 – 2030	Främre teleopererade logistikfordon med brytpunktsnavigering och möjlighet att väja och köra runt hinder, bakre logistik (konvojer med logistikfordon på väg, delvis obemannade), UGV med effektiv bekämpning av stridsvagnar
2030 – 2035	Automatisk detektion, följning, klassificering & lokalisering av mål (människa fattar insatsbeslut), bakre logistik (vinterväglag och okända miljöer), minskad kognitiv belastning för operatör och ledning av multipla obemannade system
2035 →	Autonoma stridsfordon jämsides med avsutten trupp (<i>loyal wingman</i>) i realistiska miljöer, obemannade markbundna transporter dygnet runt i okänd, svår terräng och okända miljöer

Svårigheterna med att upptäcka, värdera och väja för hinder vid körning i terräng medför att hastigheterna för UGV:er är låga, vilket begränsar möjligheterna att använda dessa i mekaniserade förband. Det är även svårt att i exempelvis mörker fjärrstyra en UGV och dagens system har svårt att effektivt bekämpa rörliga mål under förflyttning [3].

En bedömning av den förväntade utvecklingen av nya förmågor, samt en tidslinjal för utvecklingen av gradvis förbättrad självkörande funktionalitet, ges i tabell 2.1. Utvecklingen av högggradigt automatiserad styrning och navigering, samt beslutsfattande, förväntas kräva stora forsknings- och utvecklingsresurser innan fullt automatiserade beväpnade tunga UGV:er kan nå önskad operativ effekt i strid tillsammans med avsutten trupp.

Exempel på olika möjligheter för styrning av teleopererade UGV:er är även ett forskningsområde som studeras intensivt i bland annat Storbritannien och inom US Army. Två exempel ges i figur 2.2 där en operatör kan styra en UGV med en handkontroll baserat på information som presenteras på en bildskärm eller baserat på en 360-gradersvy som visas i *augmented reality* glasögon (se även [3]).

Ett antal länder bedriver storskalig experimentering med obemannade system, exempelvis genomförde armén i Storbritannien övningen AWE18⁵ där ett stort antal obemannade system utvärderades under övning (figur 2.3).

⁵ Army Warfighting Experimentation 18 (AWE18), Autonomous Warrior.



Figur 2.2: Exempel på användargränssnitt för styrning av UGV:er (illustration: Martin Ek).

Sensorernas prestanda kommer att ha en avgörande betydelse för effektiviteten för framtida UGV:er. De påverkar bland annat navigeringssystemets prestanda, möjligheterna att upptäcka och väja för hinder, operatörens möjlighet att uppnå en god situationsförståelse samt på vilka avstånd mål kan upptäckas och identifieras. Sensorerna utgör därmed även en kritisk sårbarhet.

2.3.2 UAV

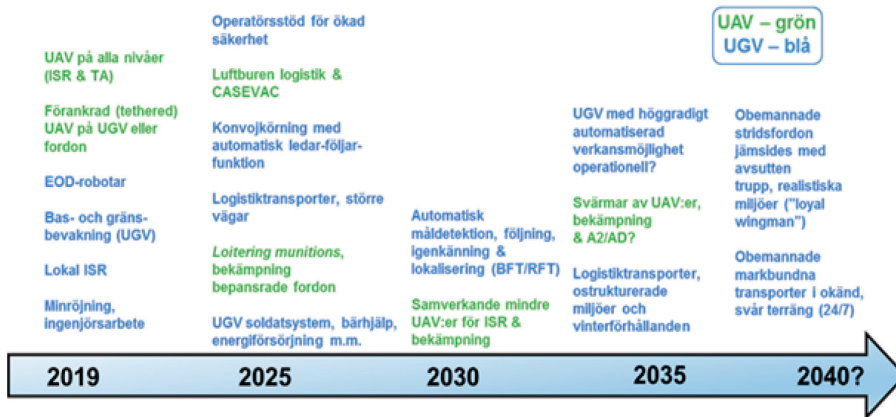
Militära UAV:er utgör idag en viktig förmågehöjare. En potentiellt viktig ny förmåga är utvecklingen av autonoma spaningsfunktioner (automatiserad detektion, identifiering, klassificering, följning och lokalisering av mål). Genom att automatisera alla, eller delar av, deluppgifterna som utförs vid framförallt spaning och målinmätning är det möjligt att reducera personalbehovet och snabba upp bekämpningscykeln. Det kan även möjliggöra en lägesbild med automatisk uppdatering av position för egna och fiendliga enheter.

2.3.3 Uppskattad tidslinjal för utveckling av nya förmågor

I figur 2.4 ges en uppskattning av när teknikutvecklingen förväntas möjliggöra obemannade farkoster som har potential att realisera nya förmågor [3]. Inriktningen är strid mot en kvalificerad motståndare med välutvecklad telekrigförmåga och med beaktande av att systemen ska kunna användas dag och natt över hela landet.



Figur 2.3: THeMIS UGV med bår monterad under AWE18 (foto: FOI).



Figur 2.4: Estimerad tidslinjal för när teknikutvecklingen bedöms möjliggöra realiserandet av nya förmågor med bäring mot markstriden [3].

2.3.4 Konceptförslag

Sju olika konceptförslag för hur obemannade system i framtiden skulle kunna användas inom Försvarsmakten beskrivs i [3]. De sju förslagen är: (i) möjlighet att skapa avreglingszoner med patrullrobotar, (ii) fördröjningsstrid mot mekaniserade förband (figur 2.5), (iii) indirekt eld för bekämpning av mekaniserade förband, (iv) lokal spaning, övervakning och målinmätning, (v) taktisk VTOL RPAS, (vi) bärhjälp och strömförsörjning till soldater och (vii) stridsfordon med förmåga till bekämpning bortom *line-of-sight*.



Figur 2.5: Exempel på möjligt användningskoncept - fördröjningsstrid med UGV utrustad med ATGM (Anti-Tank Guided Missile). Teleopererade UGV:er kan på operatörens kommando bekämpa bepansrade fordon och därefter förflytta sig, operatörsstyrt eller autonomt, till nästa förberedda försvarsställning (illustrationer: FOI).

2.4 Sjöstrid

Utvecklingen av obemannade system som kan stödja olika sjöstridsuppgifter är intensiv och omfattande experimentering genomförs av ett stort antal marinstridskrafter [4]. Obemannade system bedöms under en lång tid framöver effektivt endast kunna utföra en delmängd av de uppdrag som bemannade fartyg normalt är utvecklade att utföra. Det är troligt att obemannade farkoster för vissa uppdrag har potentialen att leverera en högre operativ effekt till en lägre kostnad jämfört med bemannade farkoster.

Obemannade farkoster bedöms ha potentialen att möjliggöra exempelvis:

- operationer i miljöer, väderförhållanden och scenarion där bemannade system av olika orsaker har svårt att verka,
- en snabbare uppskalning av förmågor (exempelvis minröjning och yt- och undervattensstrid),
- ökad säkerhet (ökat *stand-off* avstånd för bemannade enheter),
- ökat risktagande i exempelvis operationer i A2/AD scenarion och
- att personal och fartyg lösgörs från rutinuppgifter och istället kan utföra mer avancerade uppgifter.

2.4.1 UAV

UAV:er används internationellt på flera olika ledningsnivåer i en alltjämt växande omfattning. De har en stor potential inom framförallt spaning, övervakning och långräckviddig målinmätning, samt som kommunikationsrelä och telekrigsnoder. Teknikutvecklingen ser ut att skapa möjligheter för stationering av mindre taktiska VTOL UAV:er, med relativt lång uthållighet, på marinens fartyg. Även landbaserade UAV:er kan utgöra ett alternativ, där ledning av farkosten och analys av sensorinformationen kan utövas direkt från marina plattformar. Ett möjligt användningsområde är även territorialövervakning där en UAV har potential att ge förmåga till uthållig övervakning och möjliggöra tidig upptäckt av små mål och mål på låg höjd.

2.4.2 USV

Endast ett fåtal nationer använder idag obemannade ytfarkoster operativt. De vanligaste operativa användningsområdena utgörs av patrullering och övervakning, minsvepning, målfarkost eller havsövervakning. Det bedöms finnas en stor orealiserad potential med USV:er. Deras uthållighet, räckvidd, hastighet, förmåga att operera under svåra väderförhållanden och möjlighet att bära tung nyttolast möjliggör på sikt ett flertal nya användningsområden (tabell 2.2). Utveckling och operationell experimentering genomförs internationellt med ökande intensitet.

Utvecklingen inom medelstora USV:er är intensiv och de utrustas med stabiliserade vapenstationer och integrerad bekämpningsförmåga mot framförallt ytmål men till viss del även undervattens- och luftmål. Inriktningen är mot generella plattformar med möjlighet att bära modulära, uppdragsanpassade nyttolaster. Ett annat utvecklingsspår internationellt är utvecklingen av stora USV:er som är avsedda främst som sensorbärare eller magasinsfartyg⁶, men som även ska kunna användas för till exempel vilseledning.

2.4.3 AUV

Obemannade undervattensfarkoster har använts operativt i en relativt stor omfattning. De används operativt för att genomföra kartering av havsbotten och mätningar av hydroakustiska förhållanden, för klassificering och neutralisering av sjöminor eller som målfarkost. Energisystemen bedöms begränsa hastighet, räckvidd och lastförmåga på existerande farkostklasser (lätt till tung AUV) även den kommande tioårsperioden. Kritiska deltekniker vidareutvecklas dock kontinuerligt vilket bedöms leda till en kontinuerligt ökad användning av AUV:er.

Möjligheten att operera dolt utgör den största fördelen med AUV:er jämfört med andra typer av obemannade farkoster. Möjligheterna att uppfylla nya förmågor bedöms dock i dagsläget vara mer osäker i ett kort och medellångt perspektiv då det förutsätter en omfattande utveckling inom flera kritiska deltekniker, exempelvis energisystem, navigering, kommunikation och autonomi. Utvecklingen inom stora AUV:er har potentialen att möjliggöra nya förmågor som dold minläggning, framskjuten spaning och målinmätning samt ubåtsjakt. En sådan utveckling förutsätter dock att betydande forsknings- och utvecklingsresurser allokeras främst när det gäller farkostutveckling och autonomt uppdragsutförande. Autonomi för att genomföra dessa uppdrag, i okända miljöer, bedöms inte vara fullt utvecklade förrän om 10 till 20 år.

2.4.4 Framtida användningsområden

I tabell 2.2 beskrivs förmågor som har identifierats som potentiellt intressanta för marinstridskrafterna i utvecklingen av framtidens obemannade system [4]. En heterogen sammansättning av samverkande plattformar bedöms vara en nyckelfaktor för att nå den fulla potentialen med obemannade farkoster.

I figur 2.6 ges en översiktlig bedömning av när tekniken förväntas medge att olika förmågor kan realiseras tekniskt. Stor osäkerhet råder dock fortfarande rörande hur obemannade system ska användas (operativa koncept och taktik och

⁶ US Navy önskar utveckla magasinsfartyg som utrustas med hundratals fjärravfyrate kryssningsmissiler mot sjö- och landmål [4].

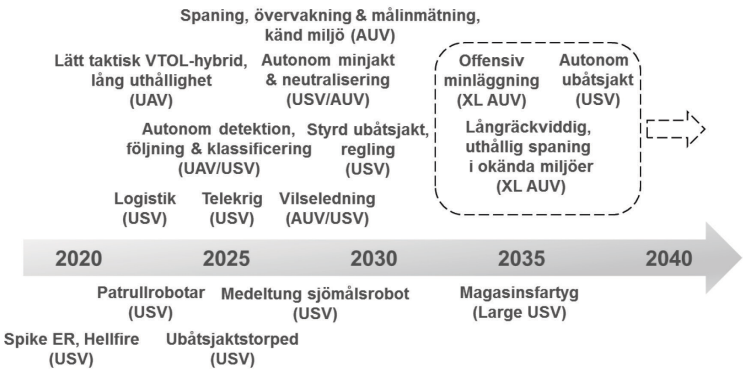
Tabell 2.2: Bedömda framtida förmågor i sjödomänen för obemannade farkoster.

Farkosttyp	Intressanta framtida operativa förmågor
USV	Minjakt, ubåtsjakt, ytstrid, spaning, övervakning och målinmätning, moderplattform, kommunikationsnod, logistik, telekrig, vilseledning
AUV	ISR, minjakt och neutralisering, ubåtsjakt, vilseledning och skydd av hamnar och baser
UAV	Territorialövervakning, fartygsbaserad liten taktisk VTOL UAV och liten stridsteknisk UAV för spaning, övervakning och målinmätning i närområdet

metod) för att nå en god operativ effekt. Omfattande metodutveckling behöver genomföras i syfte att utveckla operativt effektiva användningsområden.

2.5 Stridstekniska och taktiska UAV:er

Obemannade flygande farkoster används i huvudsak för spaning, övervakning och målinmätning, men en relativt ny trend är att de utrustas med en integrerad verkansdel för bekämpning (patrullrobotar). Både stridstekniska och taktiska obemannade flygande farkoster förväntas få en kontinuerligt ökad uthållighet, räckvidd och bärförmåga de närmaste åren [5]. Utvecklingen av framför allt mindre farkoster av multirotortyp är idag snabb tack vare utvecklingen inom den civila marknaden. Hybridfarkoster som har möjlighet att starta och landa vertikalt (VTOL), och flyga som ett traditionellt flygplan (*fixed-wing*), kommer att medföra ökade flygtider. Uthålligheter på fem till sex timmar kan förväntas med nästa generation stridstekniska farkoster och sex till tio timmar kan förväntas för mindre taktiska farkoster.



Figur 2.6: Estimerad tidslinjal för när tekniken bedöms vara tillräckligt mogen för att kunna realisera olika förmågor, baserat på analys av den internationella utvecklingen [4]. Ju längre tidshorisont, desto större är risken att en realisering skjuts framåt i tiden. Nedanför tidslinjalen ges exempel på när olika vapensystem bedöms kunna vara integrerade på USV:er.

En fördel med patrullrobotar är att bekämpningskedjan från upptäckt till bekämpning blir mycket kort. Forskning inom svärmteknologier är ett aktivt forskningsområde där ett av de användningsområden som undersöks är att med svärmar av enklare farkoster mätta fientliga försvarssystem på exempelvis fartyg eller markbaserade luftförsvarssystem. Patrullrobotar utgör ett naturligt alternativ i utvecklingen av samverkande farkoster (mindre svärmar) då de redan har kommunikationsmöjligheter integrerade [3].

Det finns sedan länge en trend att förbättra samarbetet mellan obemannade och bemannade system. Ett exempel som är operativt är attackhelikoptern AH-64 Apache där besättningen kan ta över och styra en MQ-1C Gray Eagle för att genomföra exempelvis framskjuten spaning och målinmätning. Det amerikanska företaget Kratos Defense & Security Solutions utvecklar XQ-58 Valkyrie inom ramen för US Air Force demonstratorprogram *Low-Cost Attritable Strike Demonstrator (LCASD)*. XQ-58 är bland annat tänkt att användas som en extra vapenbärarplattform, med sikte på att angripa kvalificerade luftvärnssystem.⁷ Den är framförallt avsedd att operera i avreglingszoner och där genomföra spaning, målinmätning och bekämpning.⁸

2.6 Fortsatt arbete

Under första kvartalet 2021 är ambitionen att avrapportera arbetet med den pågående tekniköversikten rörande luftstriden. Avsikten är även att under 2021 genomföra användarcentrerade workshops med Försvarsmakten inom de olika domänerna, där tekniköversiktsrapporterna är avsedda att fungera som underlag inför dessa.

Förhoppningen är att med dessa workshops initiera ett fortsatt arbete internt inom Försvarsmakten samt identifiera prioriterade användningsområden som kan användas till att inrikta den fortsatta forskningen. Det kan exempelvis genomföras i form av fördjupade teoretiska analyser och värderingar av obemannade system i dessa scenarion, eller implementeras i simulatorer som kan användas vid kommande försök.

Det finns även ett behov av att i närtid påbörja experimentering med obemannade system för att gemensamt med Försvarsmakten påbörja utvecklingen av teknik, taktik och procedurer (TTP) inom de prioriterade användningsområdena. Även organisations- och metodförsök (OMF) bör initieras omgående inom ett flertal områden.

⁷ www.globalsecurity.org/military/systems/aircraft/lcasd.htm

⁸ fightson.net/222/kratos-xq-58-valkyrie-ucav/

3 Juridiska och etiska aspekter

Juridiska och etiska aspekter blir allt viktigare för forskningen kring autonoma och obemannade system. I obemannade autonoma farkoster måste många funktioner automatiseras. Den tekniska utvecklingen har gjort att allt fler och mer komplicerade problem kan lösas automatiskt med datorer. Artificiell intelligens, AI, är ett samlingsbegrepp för tekniken och i takt med teknikens utveckling ställs frågor kring ansvar för konsekvenser av användningen av sådana system. Det pågår sedan några år en debatt i samhället om användning av AI i vapen-tillämpningar och det finns aktörer som förespråkar att AI inte ska tillåtas i vapen och att användningen av AI ska begränsas i militära system.

3.1 Syfte och mål

Det finns flera skäl till att införa automation i militära tillämpningar. Minskad risk för egen personal förs ofta fram som en drivande kraft men lika viktigt kan vara att öka prestanda i olika avseenden. Tidsprestanda är ett exempel, att snabbt kunna bearbeta mycket information och agera när tiden mellan signaler från sensorer till aktivering av skyddssystem måste vara mycket kort, som vid ett robotanfall. Autonoma system har en naturlig plats i militära system och det är viktigt att förstå hur integrationen av högautomatiserade system ska kunna göras med avseende på de legala ramverk som försvaret lyder under. Folkrätten står i centrum, särskilt krigets lagar, men vid införande av ny teknik finns det anledning att fördjupa analysen till att även inbegripa etiska aspekter.

Syftet med forskningen är att förstå vilka begränsningar de legala ramverken sätter för autonoma system och kunna stödja Försvarmakten vid införandet av sådana system. Målet är att analysera och föreslå hur en kravställnings- och granskningsprocess av framtida autonoma system kan utformas för att uppfylla folkrättsliga principer om granskning av vapenprojekt.

3.2 Resultat och överföring

Arbetet har främst bestått i analys av befintlig litteratur, samt deltagande vid arbetsmöten internationellt och nationellt. Stöd har lämnats till Försvarmakten i utbildning och vid deltagande i arbetsgrupper. En översikt över området ges i [8] och i ett examensarbete [9] sammanställdes resultat från tidigare arbeten och där analyserades även dessa frågeställningar ur ett legalt perspektiv. Underlag och stöd har även lämnats på uppdrag av UD.

3.3 Bakgrund

Debatten om AI i militära tillämpningar förs både av civilsamhällets organisationer och av stater. Den började med det mycket specifika ifrågasättandet av fullt autonoma vapensystem, ofta kallade *Lethal Autonomous Weapon Systems* (LAWS), men debatten och ifrågasättandet har vidgats till att adressera införandet av AI i militära tillämpningar.

I ett av FN:s nedrustningsforum, *Convention on Certain Conventional Weapons* (CCW), togs frågan om LAWS upp 2014 och den har sedan 2017 diskuterats i en särskild grupp (*Group of Governmental Experts*). I forumet deltar ett 80-tal stater och flera organisationer från civilsamhället. Flera av civilsamhällets organisationer samlas under paraplyorganisationen *Stop Killer Robots*. De nationella ställningstagandena varierar, där tre länder formellt föreslagit att arbetet ska inriktas mot ett förbud (Brasilien, Chile och Österrike). Ytterligare 27 stater har ställt sig bakom detta förslag, tillsammans med organisationen *Stop Killer Robots*, medan andra bedömer att någon form av reglering kan vara möjlig att införa men de är inte för ett rättsligt bindande instrument. Slutligen anser även några stater, främst Ryssland, USA, Indien, Japan, Australien, Israel och Storbritannien, att befintlig rättslig reglering omfattar LAWS och redan utgör en tillräcklig styrning.

Forumet har i samförstånd formulerat elva principer som ska vara vägledande i de fortsatta diskussionerna [10]. Expertgruppen har under 2020 endast genomfört ett några dagar långt digitalt möte istället för de planerade tio arbetsdagarna. Det är idag osäkert om målsättningen att nå en överenskommelse till CCW:s översynskonferens kan uppfyllas. Den är planerad att genomföras under 2021.

I debatten ryms framförallt två kärnfrågeställningar. Den ena berör främst de autonoma systemens förmåga, eller bristande förmåga, att särskilja legitima mål från civila och väga oavsiktliga förluster mot militär nytta. Detta handlar om en kvalitativ bedömning som många menar att ett system omöjligtvis kan utföra med tillfredsställande resultat, utan att ha en förmåga som liknar mänskligt omdöme. Autonomi kan finnas i många olika funktioner i ett system och frågan om distinktion och proportionalitet väcks huvudsakligen vad gäller ett systems förmåga att självständigt välja ut och anfälla ett mål.

Den andra frågan har sin grund i etiska resonemang och begreppet *human dignity*, mänsklig värdighet. Tanken att en maskin ska fatta beslut om liv och död är för många oacceptabel och den utgör ett argument mot autonoma vapensystem. Argumentet är sällan tydligt formulerat och det är ofta en svår fråga att diskutera då ett ställningstagande grundar sig i vilket etiskt system en person tar sin utgångspunkt i [11]. Det är sällan ett medvetet och explicit val utan snarare en del av en persons grundläggande värderingar. Ur ett juridiskt

perspektiv har detta framförallt anknytning till mänskliga rättigheter och rätten att inte förnedras.⁹

3.4 Definition av autonoma system

En nyckelfråga i diskussionen om ett möjligt förbud mot, eller annan form av reglering av, autonoma vapensystem är behovet av en definition av begreppet. Flera olika definitioner har föreslagits, allt från futuristiska definitioner som att autonoma system är system med självmedvetenhet och mänsklig förmåga att förstå sin omgivning, till mer konkreta beskrivningar som fokuserar på systemets förmåga att autonomt identifiera och välja mål (*"weapons that identify, select and employ force against targets without meaningful human control"*) [12]. Eftersom det har funnits vapen med automatiska funktioner under lång tid, över hundra år, och tekniken ständigt fortsätter att utvecklas så är det svårt att ur ett tekniskt perspektiv definiera vad som bör vara förbjudet respektive tillåtet. Utvecklingen av det som idag är den dominerande typen av vapensystem med automatiska funktioner, och som är helt autonoma i flera faser av ett anfall, tog fart under och efter andra världskriget. Då utvecklades olika typer av målsökande robotar som togs i bruk och sådana system är idag de vanligaste typerna som kan kallas autonoma vapen.

Ofta hamnar ordet autonom i fokus som en beskrivning på en egenskap som skiljer ett autonomt system från ett automatiskt, en omskriven fråga, se avsnitt 2.1.1. Ordet autonom har ingen entydig mening, betydelsen varierar beroende på sammanhang och i vilket område det används. Inom statsvetenskapen betyder det (en stats) självständighet från yttre kontroll, en beskrivning som är mer relevant för tekniska system än den filosofiska, att själv besluta och styra sina handlingar.

Det är inte bara användningen av ordet autonom om tekniska system i en överförd filosofisk betydelse som kan skapa oklarhet i diskussionen om juridiska aspekter av systemen. Ett antropomorft språkbruk¹⁰ skapar förvirring och otydlighet om systemens faktiska egenskaper. Det finns många exempel på detta inom AI-området, exempelvis "lärande system" och "maskiner som fattar beslut", och andra liknande beskrivningar av tekniska system som leder tankarna till mänskliga egenskaper utan att det för den skull finns några tekniska likheter.

Ett autonomt system är ett system med funktioner som fungerar utan påverkan från en operatör. Om man väljer att kalla funktionerna automatiska, eller autonoma, är en smaksak, det är ingen formell skillnad.

⁹ Europeiska konventionen den 4 november 1950 angående skydd för de mänskliga rättigheterna och de grundläggande friheterna.

¹⁰ Användningen av mänskliga begrepp för att beskriva maskiners egenskaper.

En viktig fråga kring definition av LAWS har varit hur befintliga vapensystem ska betraktas. Flera av de föreslagna definitionerna beskriver även system som finns idag, och har funnits länge i exempelvis målsökande robotar. Att hitta en definition som beskriver tekniska egenskaper på ett sätt som exkluderar befintlig teknik men omfattar möjliga framtida system med oönskade egenskaper har visat sig vara mycket svårt. Vår bedömning är att detta inte är möjligt att genomföra. Många aktörer, såväl civilsamhällets organisationer som stater har därför börjat formulera definitioner ur andra perspektiv med fokus på hur människor kontrollerar tekniken, snarare än tekniken i sig. Oavsett svårigheten att komma överens om en definition av autonoma vapen råder det enighet om att sådana system, oavsett tekniska egenskaper, regleras av folkrätten. Systemen måste alltså kunna användas i enlighet med folkrätten.

3.5 Folkrätten

En fråga som debatteras vad gäller autonomi i vapensystem är om existerande folkrätt är tillräcklig eller om kompletterande reglering i form av begränsningar eller ett förbud är nödvändig. Debatten fokuserar till stor del på militära tillämpningar och systemens förenlighet med krigets lagar som reglerar parter skyldigheter vid väpnad konflikt. Krigets lagar förbjuder helt användningen av vissa vapen och andra stridsmedel, såsom exempelvis kemiska vapen.¹¹ Bakgrunden till förbuden är att vapnen ansetts urskillningslösa i sin verkan, det vill säga att de inte kan riktas mot ett specifikt militärt mål utan slår mot såväl militära mål som civila och civil egendom utan begränsning. Ett annat skäl är att de ansetts orsaka skada som är mer omfattande än motiverat och onödigt lidande med hänsyn till det legitima syftet att försvaga och vinna över sin motståndare. Vissa andra vapen är tillåtna men har specifika begränsningar vad gäller deras användning, vilket är fallet med bland annat automatiska undervattensberöringsminor.¹² Om minorna exempelvis inte är fastgjorda måste de vara konstruerade så att de oskadliggörs inom högst en timme efter att uppsikten över dem förlorats.

För alla vapen och andra stridsmetoder gäller att de måste användas i enlighet med de grundläggande principerna om *distinktion*, *proportionalitet* och *försiktighet*.¹³

- Distinktionsprincipen säger att åtskillnad måste göras mellan militära mål å ena sidan och civila personer och egendom å andra sidan och att anfall bara får riktas mot militära mål.

¹¹ Konvention om förbud mot utveckling, produktion, innehav och användning av kemiska vapen samt deras förstöring, Paris den 13 januari 1993.

¹² Konvention i Haag den 18 oktober 1907 rörande utläggning af automatiska undervattensberöringsminor.

¹³ Tilläggsprotokoll I till Genèvekonventionerna den 12 augusti 1949 rörande skydd för offren i internationella väpnade konflikter, Genève den 8 juni 1977.

- Enligt proportionalitetsprincipen får oavsiktliga förluster, i form av civila som skadas eller dödas och civil egendom som tar skada eller förstörs, inte vara överdrivna i jämförelse med den konkreta och direkta militära fördelen som förväntas med ett anfall.
- Parterna i en väpnad konflikt är vidare enligt försiktighetsprincipen skyldiga att göra allt som är praktiskt möjligt för att kontrollera att anfall riktas mot militära mål och att välja stridsmedel och -metoder i syfte att undvika eller i möjligaste mån minska oavsiktliga förluster.

Av relevans är även de mänskliga rättigheterna, som är gränssättande regelverk i de fall autonoma vapensystem används i fredstida situationer. Några exempel på mänskliga rättigheter som kan bli aktuella vid autonom våldsutövning är rätten till liv och förbudet mot omänsklig eller förnedrande behandling. För att rätten till liv enligt Europakonventionen ska anses uppfylld måste all våldsanvändning vara absolut nödvändig i relation till vissa legitima ändamål. Europadomstolen har fastställt att våldsanvändning måste vara proportionerlig i relation till det legitima ändamålet med den och ställer krav på att planeringen av operationer som innebär våldsanvändning måste hålla en viss standard för att uppfylla kravet på absolut nödvändighet.¹⁴ Rätten till liv innebär också en processuell skyldighet för stater att utreda potentiella kränkningar till följd av våldsanvändning, vilket kan tänkas ställa krav på transparent teknologi vars konsekvenser kan förutses och förklaras.

Alla stater är skyldiga att säkerställa att vapen som används är förenliga med folkrätten. Artikel 36 i tilläggsprotokoll I till Genèvekonventionerna kräver att stater granskar om användningen av ett nytt vapen, under vissa eller alla omständigheter, skulle vara förbjuden enligt statens folkrättsliga förpliktelser. Granskningen kräver en bedömning av all relevant information som rör vapnet och en analys av det sammanhang där det är tänkt att användas. Granskningen måste svara på huruvida vapnet med dess egenskaper vid förväntad användning i vissa förutsägbara situationer och under vissa specifika omständigheter kan användas i enlighet med gällande folkrätt. Komplexiteten i autonoma vapensystem kan göra denna folkrättsliga granskning svår och det finns behov av en särskild vägledning för hur detta ska genomföras.

Folkrätten ställer krav som människor ska uppfylla och en del av debatten kring autonoma vapensystem handlar om vem som bär ansvaret för eventuella oönskade följder av användningen. En rädsla för ett ansvarsvakuum beror inte väsentligen på bristen på straffrättsliga regler utan snarare på utmaningen att tillämpa dem på användningen av autonoma vapensystem. I en väpnad konflikt kan individer hållas straffrättsligt ansvariga för krigsförbrytelser och militära befälhavare kan även hållas ansvariga för underordnades förbrytelser. I debatten

¹⁴ McCann and Others v. the United Kingdom [GC], (18984/91), 1995-09-27, European Court of Human Rights.

kring autonoma vapensystem diskuteras hur komplicerat ansvarsutpekandet kan bli med tanke på vapnets komplexitet. Vad gäller de mänskliga rättigheterna kan endast stater hållas ansvariga för kränkningar. Innan Europadomstolen tar upp ett mål till prövning måste nationella rättsmedel uttömmas och av intresse vore därför att titta på hur olika staters rättssystem skulle hantera ansvarsutpekandet i dessa fall.

Oavsett huruvida existerande folkrätt anses tillräcklig för att reglera autonomi i vapensystem eller om kompletterande reglering anses nödvändig, är det en utmaning att tolka och tillämpa eller utveckla folkrätten i ljuset av ny teknologi. I diskussionen har begreppet *meaningful human control* (meningsfull mänsklig kontroll) formulerats som en möjlig väg till reglering.

3.6 Meningsfull mänsklig kontroll

Meningsfull mänsklig kontroll har blivit ett begrepp som många av aktörerna, som är engagerade i debatten om LAWS, har kunnat enas kring. I viss mån har diskussionen om en definition av LAWS istället förskjutits till en diskussion om en definition av begreppet meningsfull mänsklig kontroll. Det finns många likheter mellan olika aktörers definitioner även om de skiljer i formuleringar. Den mänskliga kontrollen delas ofta upp i några huvudfaktorer såsom *kontroll över situationen*, *kontroll över tekniken* och *kontroll över användningen*. System som kan verka på långa avstånd och vara verksamma under lång tid ökar såväl det kognitiva, geografiska och temporala avståndet mellan beslut om vapeninsats och faktisk verkan. En meningsfull kontroll betyder kontroll över osäkerheter i dessa domäner.

I den internationella debatten förhåller sig aktörerna till dessa huvudfaktorer på olika sätt. En djupare analys av olika synsätt återfinns i [9]. I tabell 3.1 ges en sammanställning av utvalda aktörers (ICRC, iPRAW, Article 36 och USA) hållning när det gäller dessa huvudfaktorer. Dessa aktörer har valts ut då de har presenterat de mest detaljerade beskrivningarna. Sammanställningen ger inte en fullständig bild av alla aspekter men den visar på en viss konvergens i definitionsfrågan även om det finns skillnader i tolkningen av begreppen.

I tabell 3.1 är de tre huvudfaktorer, kontroll över situationen, tekniken och användningen, nedbrutna i delfaktorer. Faktorer kan delas upp på olika sätt beroende på vad som står i fokus för analysen. För att på ett mer precist sätt beskriva hur kontrollen över systemet och användningen bör göras behöver vissa yttre ramar fastställas. Det är relativt okomplicerat att ge exempel på system som är otillåtna enligt krigets lagar, samtidigt som det även existerar system som har flera autonoma funktioner som ändå bedöms kunna användas i enlighet med krigets lagar. För att förstå hur kraven bör preciseras behöver analysen fördjupas för att tydliggöra vilka krav som ställs på såväl tekniska system som på

Tabell 3.1: Sammanställning av ett urval av några av de vanligaste nyckelfaktorerna i meningsfull mänsklig kontroll.¹⁵

	ICRC	iPRAW	Article 36	USA
Att styra situationen	Begränsningar och operationsparametrar		Att kunna styra området, tidsutsträckningen och förutsättningarna i användnings-sammanhanget	
Att förstå vapnets funktioner och begränsningar	Att förstå möjligheter och begränsningar i sammanhanget	Förståelse för vapnet i situationen	Användaren ska förstå tekniken och processen för användning	Förståelse för funktioner, förmågor och begränsningar hos systemet i alla realistiska operativa situationer
Situationsförståelse	Situationsuppfattning	Situationsuppfattning	Användaren ska förstå sammanhanget i vilket tekniken ska användas	Användaren ska vara utbildad och övad i att förstå sammanhanget och tekniken
Tekniska krav på förutsägbarhet och tillförlitlighet	Förutsägbara konsekvenser vid användning och mätbar sannolikhet för fel	Förutsägbarhet och tillförlitlighet bestämmer vilken nivå av mänsklig styrning som behövs	Tekniken förutsätts uppföra sig på ett förväntat sätt och inte vara felbenägen	Ska fungera som förväntat i realistiska operativa miljöer mot adaptiva motståndare
Möjlighet att avbryta	Mänsklig övervakning och möjlighet att ingripa och avbryta	Möjlighet att ingripa om det är nödvändigt	Tid för mänsklig bedömning och agerande, möjlighet till ingripande	Tydliga processer för utbildade operatörer för att aktivera och avbryta systemfunktioner
Utkräva ansvar		Ansvarsskyldighet hos operatörer och befälhavare	Ramverk för ansvarsskyldighet	
Etiska principer och mänsklig värdighet	Bevara mänskligt agerande och upprätthåll det moraliska ansvaret i beslut om våldsinsats	Mänsklig värdighet som ett juridiskt krav för mänsklig kontroll		

¹⁵ Utdrag från [9]. Tabellen är inspirerad av [30]. Några rutor är tomma, men en aktör kan ha gjort en definition som inte har hittats i detta arbete.

organisationers användning av systemen för att de ska anses kunna användas i enlighet med folkrätten.

3.7 Är det möjligt att ställa krav på mänsklig kontroll av autonoma system?

Ett autonomt system är ett system som, i en fas eller i ett helt uppdrag, agerar utan interaktion med en operatör. Det kan vara autonomt i en delfunktion eller i alla sina funktioner. Oavsett i vilka funktioner det agerar utan mänsklig interaktion så finns det yttre gränser för var och hur det agerar. Dessa gränser bestäms både av systemets egenskaper och av de instruktioner som en operatör ger vid start av systemet.

För att kunna ställa krav på systemets uppträdande måste alltså krav ställas såväl på systemets egenskaper som på operatörens förmåga att förstå och använda det. För enkla system, med en enkel automatik, är det ofta enkelt att beskriva de kraven och att testa om de är uppfyllda. Krav på komplexa system måste ställas på hela det sociotekniska systemet, alltså på såväl de tekniska delarna av ett system som på användarna.

För tekniska system är det naturligt att föreskriva hur de ska fungera och vilken tillförlitlighet, säkerhet och noggrannhet de ska uppvisa. Sådana övergripande funktions- och tillförlitlighetskrav kan brytas ner i krav på de underliggande delsystemen.

När komplexa system med många beroenden mellan olika delsystem ska utvecklas blir denna kravhantering likaså komplex, något som är fallet med avancerade datorprogram. När datorprogrammet ska styra fysiska system blir tillförlitlighet och säkerhet helt centrala egenskaper. Det blir för säkerhetskritiska system avgörande att tillse att alla ställda krav är uppfyllda. Det är svårt, och för större system i praktiken omöjligt, att i efterhand testa om ett system uppfyller alla krav. Metoder för systematisk testning under utvecklingen blir därför viktiga. För säkerhetskritiska system har omfattande processer och metoder utvecklats som föreskriver hur systemutvecklingen ska ske, med tydliga regelverk för kontrollstationer och testprocedurer. Specifika procedurer finns för olika branscher, såsom flygfarkoster, processindustrier och även för militära system [13-16].

Kontroll av tekniska system associeras ofta med teknikens möjlighet att styras. Men i kontrollen är den som styr systemet en lika viktig komponent. Begreppet *human factors* har uppmärksamats i debatten och den motsättning som råder mellan människans begränsningar i uppmärksamhet och reaktionstid jämfört med

motsvarande egenskaper i tekniska system.¹⁶ Inom området automation är detta välkända frågeställningar och kravställningen på systemen innebär inte bara funktionskrav på tekniken utan även på möjligheter att använda systemen på avsett sätt. För mer komplexa system, eller system som ska användas i komplexa miljöer, som vapen i strid, ställs krav även på organisationen. Krigets lagar preciserar inte hur en stat ska organisera sin militär men det åligger varje stat att utforma sin organisation och ordregivning så att vapen användning sker i enlighet med gällande rätt. Det innebär att krav måste ställas på utbildning av såväl soldater som befälhavare och att befälsstrukturen tar hänsyn till systemens egenskaper, till exempel att beslut om vapen användning endast kan ske på en viss befälsnivå grundat på ett specifikt underlag. I detta ingår att utforma användningsregler för varje vapensystem.

Användningsregler för vapensystem måste alltid utformas, oavsett vilken grad av automation systemen har. Det finns flera likheter med dagens debatt kring framtidens autonoma vapensystem och den som uppstod vid införandet av artilleriet för länge sedan. Att ”skjuta i blindo” ansågs strida mot dåtidens etiska normer. Vid artilleriskjutning finns ett avstånd i tid och rum, mellan beslut om vapenverkan och effekten därav, som väckte samma typ av frågor vid införandet av artilleriet som de som idag diskuteras om autonoma vapen. Under tiden från avfyring till nedslag, en tid som kan ha en utsträckning på över en minut eller ännu längre med långräckviddigt raketartilleri, finns ingen möjlighet till påverkan. Idag är användningen av artilleri inte lika kontroversiell efter att metoder och regelverk har utvecklats för att säkerställa att artilleriet inte skjuter ”i blindo” utan mot mål vars position och egenskaper är kända. Kontrollen över systemet utövas före avfyring och omfattar många steg, från kontroll av det tekniska systemet till kontroll av situationen och konsekvensanalys av effekterna vid användning. Denna kontroll ställer krav på de tekniska systemen, organisationens uppbyggnad och utbildning av personal samt metoder för användning, det vill säga hur målets position säkerställs och hur bedömningen görs huruvida målet är ett legitimt mål eller inte.

För mer komplexa vapensystem, som målsökande robotar, finns motsvarande metoder som föreskriver hur vapnen ska användas, som begränsar användningen till situationer där det går att förutse effekterna och att de kan användas med låg risk för oönskade effekter. För framtida vapen, med möjligtvis mer komplex automation, kommer kraven på systemen, organisationen och metoderna vara mer omfattande än dagens och även den folkrättsliga granskningen förväntas bli mer komplex för att omfatta alla dessa aspekter. För att kunna genomföra en granskning av framtida vapensystem behöver granskningsprocessen utvecklas.

¹⁶ Under 2020 påbörjades arbetet inom Natogruppen HFM-RTG-330 *Human Systems Integration for Meaningful Human Control over AI-based systems* där ambitionen är att ta fram förslag till riktlinjer för meningsfull mänsklig kontroll inom olika systemutvecklingsfaser.

3.8 Framtida arbete

Ett fortsatt arbete inom detta delområde har flera möjliga vägar. Att studera vad *meningsfull mänsklig kontroll* innebär och hur det kan införas eller beskrivas för olika typer av högautomatiserade system är en fortsatt viktig fråga. En annan fråga, eller mänsklig kontroll men ur ett annat perspektiv, är hur en artikel 36-granskning av ett vapensystem bör utformas. Ett systematiskt arbete bör inledas för att fördjupa kunskapen om och förståelse för utvecklad artikel 36-granskning av komplexa vapensystem.

4 Manned-Unmanned Teaming & MTO-aspekter

MUM-T (*Manned Unmanned Teaming*) behandlar frågeställningar som rör samverkan och beroenden mellan bemannade och obemannade system. Vanliga frågeställningar rör vilka användningsområden dessa system kan komma att ha och vilka utmaningar som behöver adresseras för att dessa typer av system ska kunna ge en ökad operativ, taktisk och strategisk nytta. Forskningens fokus är främst riktat mot perspektivet människa-maskin, eller i bredare bemärkelse människa-teknik-organisation (MTO). Att betrakta nödvändiga förutsättningar för att människor och obemannade system ska bilda effektiva lag (team) är centralt.

4.1 Bakgrund

Försvarsmakten har pekat på vikten av samverkan och beroendet mellan bemannade och obemannade system med följande förväntningar på det militära teknikläget 2035 [17]:

”Obemannade system förekommer i alla arenor och andelen fjärrkontrollerade och autonoma system kommer successivt att öka. Samverkan och beroendet mellan bemannade och obemannade system kommer att öka och på så sätt förstärka befintliga förmågor.”

Försvarsmakten pekar ut teknikområdet obemannade farkoster, tillsammans med bland annat de relaterade områdena strid med system i samverkan och artificiell intelligens, som områden som behöver utvecklas [17]. Teknikområdet automation och styrning kommer att beröras av utvecklingen av obemannade system, samtidigt som ökad automation kommer att påverka exempelvis organisation, beslutsprocesser och doktrin.

Inom det nordiska försvarssamarbetet NORDEFCO har förmågan att bygga effektiva lag av bemannade och obemannade plattformar poängterats som en möjlig *game-changer* [18]. Även utländska framtidsstudier påpekar vikten av denna teamingaspekt, särskilt med påståendet att framtida militära fördelar inte nödvändigtvis kommer att ligga hos den stridande part som har de senaste algoritmerna, utan hos den som har det mest effektiva människa-maskin-teamet [19]. MUM-T aspekter hos obemannade och autonoma system spänner upp ett brett forskningsområde som beskrivs utförligare i [20].

4.2 Genomförda aktiviteter

I detta arbetspaket behandlas frågan om hur samverkan mellan bemannade och obemannade system bör genomföras och vilka funktioner som kan automatiseras. Frågeställningen kan brytas ned i två delområden: (i) samverkan mellan bemannade och obemannade system och (ii) MTO-aspekter av automation. Utöver detta har en omvärldsbevakning genomförts rörande frågor om konceptuell användning av obemannade system för mark-, sjö- och luftarenan, samt när det gäller utvecklingen inom MUM-T för de tre arenorna. De övergripande aktiviteter som har genomförts inom projektet sammanfattas inom områdena behovsanalys, funktionsanalys samt framtagande och utveckling av konceptuella användningsfall och designförslag för operatörsgränssnitt.

4.2.1 Behovsanalys

Utifrån rekommendationerna i [20] har arbete bedrivits i dialog med representanter för olika förband i syfte att identifiera användningsområden och funktionella krav för obemannade system för att stödja mekaniserade förband och lätta förband på markarenan. En första behovsanalys riktad mot mekaniserade förband togs fram baserat på dialog med personal vid P4 och Markstridsskolan (MSS) i Skövde [21]. I studien identifierades behovet av obemannade flygfarkoster (RPAS/UAV) primärt som en framskjuten sensor som identifierar hot innan mänsklig besättning hamnar i riskzonen. Utöver detta identifierades att det var oklart vilka uppgifter obemannade system bör utföra, vem som bör kontrollera dem och vilken grad av automation systemen behöver besitta.

Inom ramen för projektets stöd till Markstridsskolans UGV-studie gavs även deltagare från projektet möjlighet att medverka som observatörer vid *Army Warfighting Experimentation 18* (AWE18) avslutande demonstrationsövning (*Autonomous Warrior*) [22]. Denna medverkan var till stor nytta för projektet i allmänhet och arbetspaketet för MUM-T i synnerhet. Den grad av experimentering med trupp som genomfördes i Storbritannien gav en välbehövlig inriktning för arbetet, särskilt kopplat till mognadsgraden för tekniken, hur olika system kan användas och hur samverkan mellan bemannade och obemannade system kan förväntas se ut de närmaste 10-15 åren.

4.2.2 Funktionsanalys

Resultaten från den inledande behovsanalysen, samt erfarenheterna från AWE18, användes som underlag för att genomföra en funktionsanalys kopplat till användningen av obemannade farkoster hos lätta förband med främst avsutten strid och avsutten verksamhet som huvudtjänst. Funktionsanalysen genomfördes genom aktiva diskussioner med representanter från Rikshemvärnsavdelningen och Hemvärnets stridsskola, K3 (31.bataljon och UAV-enheten) samt personal

och kadetter vid MSS Kvarn [23]. Från dessa diskussioner identifierades funktioner som lång- och kortdistansspaning, lokalisering, identifiering och bekämpning samt funktioner för att stödja logistikfunktioner. Utöver dessa funktioner identifierades egenskaper som de autonoma farkosterna måste besitta (t.ex. robusthet för olika väderförhållanden). Flertalet av dessa funktioner identifierades vara gemensamma med civila myndigheters behov, exempelvis identifierades förmågan att etablera en initial överblick över en situation och den ökade förmågan att hålla lägesbilden uppdaterad som viktigt.¹⁷

4.2.3 Konceptuella användningsfall och operatörsgränssnitt

De sammantagna erfarenheterna från de genomförda studierna och AWE18 medförde att arbetet riktades in mot att ta fram olika användningsfall för simulering och att påbörja framtagningen av designförslagsprototyper för användargränssnitt. *Teaming* kan förstås som lagarbete och utgår i mångt och mycket från hur människor i effektiva team interagerar. Viktiga komponenter i detta är *kommunikation*, *koordinering* och *samarbete* [21]. Obemannade farkoster förväntas ha en begränsad nivå av uppdragsautonomi åtminstone de närmaste tio åren och är då i stor utsträckning operatörsberoende på ett eller annat sätt [3,4]. Detta gör att *teaming* troligen blir svår att uppnå i närtid utan obemannade farkoster kommer sannolikt istället utgöra mer eller mindre lättanvända redskap snarare än att upplevas som en medlem av gruppen. Därför har begreppet *teaming* under projektets gång huvudsakligen hanterats genom en strävan att förenkla och tillgängliggöra nyttjandet av obemannade system för att öka effekten, dels genom att undersöka relevanta användningsfall och dels genom kunskapsbyggande om operatörsgränssnitt. De från AWE18 dragna erfarenheterna om vikten av operatörsgränssnitt och att pröva olika koncept för att identifiera var obemannade system gör nytta i olika sammanhang var tongivande i dessa beslut. Som stöd för prototyparbetet genomfördes litteratursammanställningar, exempelvis en översikt över interaktionsprinciper inom MUM-T [24].

4.3 Uppbyggnad av simuleringsförmåga

I syfte att möjliggöra simulering av olika användningsfall och även möjliggöra framtida utvärdering av prototyper för operatörsgränssnitt inleddes ett samarbete med projektet *Ledning av Autonoma Sammansatta System med Intelligentia Enheter* (LASSIE).¹⁸ LASSIE genomförde experiment rörande ledningsfrågor

¹⁷ De senare resultaten kom genom att det parallellt med det pågående arbetet även genomfördes en studie av en grupp studenter vid Linköpings universitet med stöd av personal från FOI. Studien syftade till att jämföra Försvarmaktens behov vid en skadeplats med räddningstjänstens behov.

¹⁸ Projektet genomförs inom ramen för FoT-område Ledning & MSI.

kopplat till obemannade system inom ramen för mekaniserad strid på stridsteknisk och lägre stridsteknisk nivå. Gemensamt utvecklades en utökad simuleringsförmåga i ledningslabbet vid FOI i den virtuella simuleringsmiljön *Virtual Battle Space 3* (VBS3) [25].

4.3.1 Syfte

Syftet med simuleringen var att genomföra försök med konceptuellt nyttjande av UGV:er inom ramen för mekaniserad strid där styrningen av UGV:erna utfördes manuellt med ett styrdon alternativt medelst röststyrning kompletterat med en enklare grafisk karta för att kunna ange exempelvis brytpunkter. Den UGV som implementerades var att betrakta som semi-autonom (exempelvis självständig förflyttning punkt till punkt och självständig spaning).

4.3.2 Genomförande

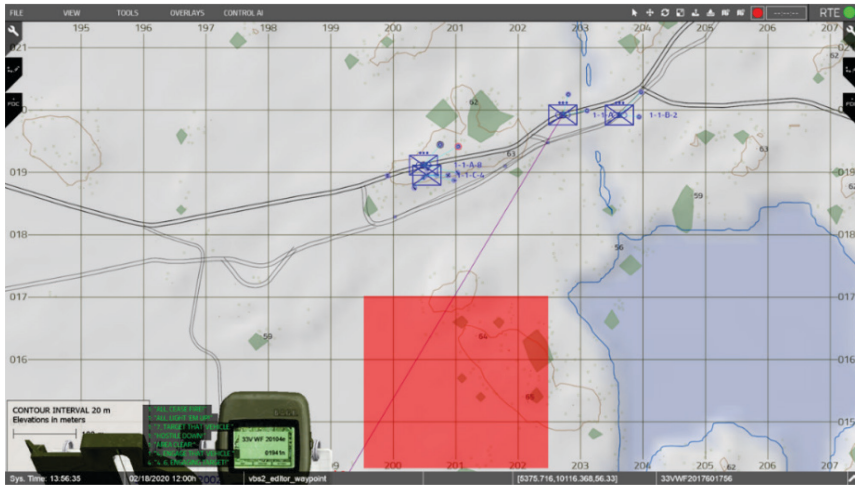
Flera förförsök genomfördes med personal från FOI med relevant militär erfarenhet¹⁹, vilket resulterade i en iterativt utvecklad simuleringsinfrastruktur samtidigt som tidiga lärdomar om användargränssnitt kunde dras genom den iterativa utvecklingen.

Försöksupplägget byggde på scenarion som hade tagits fram av Markstridsskolan (MSS) och omfattade uppgifterna ”ta” och ”försvara” för bataljon, nedbrutet till kompaninivå för att slutligen simuleras på plutonsnivå. När formen för försöket var färdig omfattade försöken utöver försöksledning och motspel (tre personer) en kompanichef, en plutonchef med vagnsbesättning samt plutonens två sidoordnade vagnsbesättningar. För mer detaljerade redogörelser hänvisas läsaren till [25] och [26].

Under hösten 2020 genomfördes ett försök²⁰ där personal från Markstridsskolan medverkade och då gick i rollerna som kompanichef, plutonchef, och vagnchefer (tillika skyttar) för plutonens två andra vagnar vid försök med UGV inom ramen för mekaniserad strid i VBS3. Övrig vagnsbesättning på plutonen (tre förare och en skytt) bemannades av FOI-personal. Interaktionen med UGV:n skedde medelst (simulerad) röststyrning i första hand kompletterat med en förenklad kartbild i vilken plutonchefen kunde beordra enheten till olika punkter eller tilldela sökområden (se figur 4.1). Den UGV vars funktionalitet studerades simulerades av FOI:s motspel genom *Wizard of Oz*-försöksmetodik (som beskrivs närmare i [25]) där framtida AI-funktionalitet simuleras av motspelspersonal. Syftet är att försökspersonen ska uppleva att interaktionen görs

¹⁹ Erfarna reservofficerare och hemvärnssoldater.

²⁰ Fler försök var inplanerade men den pågående pandemin omöjliggjorde de första planerade försöken.

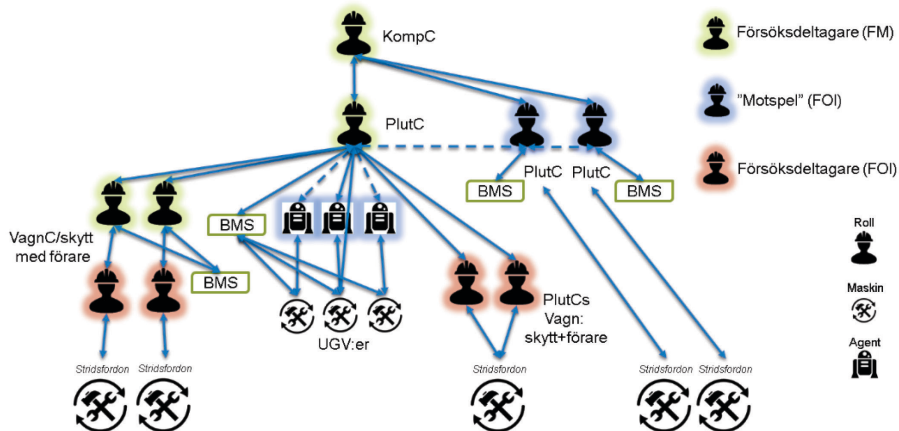


Figur 4.1: Bild av kartvy i VBS3 med spaningsområde för UGV.

med förväntad styrningsfunktionalitet som ännu inte finns implementerad. I figur 4.2 presenteras en grafisk beskrivning av bemanning och försöksupplägg.

4.3.3 Resultat

Resultaten från försöket pekade på att det finns potential för obemannade system (i föreliggande fall UGV) inom ramen för den mekaniserade striden, men att vissa faktorer behöver beaktas för att erhålla fullgod effekt med systemen.



Figur 4.2: Hierarkisk ledningsstruktur som användes under försöket under hösten 2020 med personal från Försvarsmakten (FM) och personal från FOI som motspel och försöksdeltagare. BMS: Battle Management System. Grafiken är inspirerad av notationen som föreslås i [27].

Exempelvis får inte de obemannade systemen vara hämmande för nyttjande förbands uppträdande i stort, något som uppmärksammades i tidigare rapporter ([21] och [22]). UGV:n bedömdes vara för långsam för att kunna nyttjas fullt ut, sett till att förbandet hade behov av att kunna röra sig ansatsvis (i hög hastighet). Denna begränsning avhjälpes genom att i stor utsträckning förplanera insatsen med UGV:n, vilket gav en viss positiv effekt, men effekten skulle kunna ökas med högre hastigheter enligt försöksdeltagarna.

Försöksdeltagarna menade att röststyrningen inte var fullt ut förenlig med hur de skulle vilja nyttja UGV:n utan förordade istället att det kompletteras, eller ersätts, med ett grafiskt gränssnitt ([26]).

Tyvärr var antalet individer som kunde ge återkoppling om interaktionssättet begränsat varför resultaten behöver kompletteras med fler försök och försöksdeltagare. Resultaten indikerar att grafiska gränssnitt är att föredra för att styra obemannade system i detta försöks specifika militära kontext. Framtida spel bör även innehålla andra typer av obemannade farkoster, och utspelas i andra scenarion, i syfte att öka förståelsen rörande huruvida de specifika obemannade systemen kan öka förbandens operativa effekt.

4.4 Diskussion

Arbetet har syftat till att bygga förståelse och förädla kunskap om nyttjandet av obemannade system i närtid samt bygga förutsättningar för fortsatta försök och potentiell förmågeuppbyggnad fram till 2030. Viktiga lärdomar kan erhållas genom spel och simuleringar i syfte att utveckla och pröva koncept för hur olika förband kan använda obemannade farkoster. En levande dialog med berörda parter inom Försvarsmakten kommer att vidmakthållas och simuleringsbaserade försök kommer fortsatt att genomföras där militär personal utvärderar de prototyper (designförslag till operatörsgränssnitt) som nu är under utveckling. Prototyperna utvecklas baserat på resultatet från genomförda dialoger med potentiella användargrupper.

Erfarenhets- och kunskapsuppbyggande insatser inom området bedöms kunna få än större effekt vid fysiska försök med trupp. Sett till internationella erfarenheter är experimentering med prototyper och skarpa system att betrakta som ett framgångsrikt koncept för att vänja trupp vid obemannade system samt även för att utvärdera nyttan med sådana system under fältmässiga förhållanden. Genomförandet av dylika försök föreslås vara en ambition att åstadkomma inom en femårsperiod och de bör bygga på erfarenheter dragna ur de koncept för nyttjande som beskrivs ovan.

4.5 Fortsatt arbete

Under nästkommande år kommer forskning fortsatt att bedrivas riktat mot frågeställningar som rör hur samverkan kan ske mellan operatörer och obemannade system, samt vilka faktorer och typlösningar som bör beaktas vid utveckling och införande av obemannade och autonoma system.

Utifrån de preliminära koncept för nyttjande som beskrevs i [3] är ambitionen att utveckla konkreta användningsfall och utvärdera dessa genom virtuella försök parallellt med att enklare gränssnittsprototyper tas fram. Inom ramen för ett pågående examensarbete genomförs även intervjuer, observationer och fältstudier med representanter från bland annat Hemvärnet. Denna datainsamling har i skrivande stund mynnat ut i funktioner och egenskaper med anknytning till fysisk utformning av kontrollsystem för UGV på lägre stridsteknisk nivå (grupp/pluton). Dessa erfarenheter kommer att omhändertas i kommande arbeten med prototypframtagning.

Utvecklingen av användningsfall och gränssnittsprototyper, samt genomförandet av seminarieövningar och workshops, är avsedda att ytterligare driva kunskapsuppbyggnaden framåt rörande aspekter av MUM-T ur ett svenskt perspektiv. Försvarmaktens deltagande i dessa planerade aktiviteter är central för att nå en hög kvalitet i forskningen och säkerställa att forskningen genomförs för relevanta och prioriterade användningsfall.

5 Robusta navigeringssystem

Ett robust PNT-system (Position, Navigation, Tid) som kan ge en godtagbar positions- och orienteringsnoggrannhet under operativt relevanta förhållanden utgör en grundläggande förutsättning för att realisera autonoma farkoster [1]. Om ett autonomt system inte vet var den är kan den i de allra flesta fall inte längre utföra sitt uppdrag. Även teleopererade system som styrs direkt på distans av en operatör har behov av störsäkra PNT-system, då det är en förutsättning för operatörsstöd i form av brytpunktsnavigering samtidigt som de utgör en viktig del i realiserandet av automatiserade system för målinmätning. PNT-systemet ska ge *tillräcklig* noggrannhet i position och orientering under typiska väderförhållanden, i alla operativt relevanta miljöer och i högkonfliktsscenario mot en kvalificerad motståndare. Detta innebär att PNT-systemet måste kunna fungera även i situationer då noggrannheten för GNSS-mottagare²¹ är degraderad (exempelvis i urbana miljöer) och i telestörda miljöer.

I sensorfusionstillämpningar där rå sensordata behöver utbytas mellan farkoster krävs en mycket hög tidsnoggrannhet, men för de flesta tillämpningar räcker sannolikt en mindre noggrann tidsreferens. Det gäller exempelvis vid tidsstämpling av observationer, synkronisering av radiosystem osv. En noggrann tidshållning, exempelvis i form av en *chip-scale atomic clock* (CSAC), förväntas kunna uppfylla de flesta behoven men i operationer som varar under längre tider kan en högre noggrannhet krävas. En noggrann tidsreferens ger även möjlighet att förbättra noggrannheten för vissa positioneringstekniker (såsom GNSS-mottagare).

5.1 Bakgrund

GNSS-mottagare är känsliga för störning och de civila öppna signalerna kan med enkla medel även vilseledas [28]. Det är därför angeläget att utveckla och införa förbättrade GNSS-mottagare som har möjlighet att detektera, och i möjligaste mån även undertrycka, stör- och vilseledningssignaler. Kompletterande sensorer och multisensorfusionsalgoritmer behöver dessutom införas som medger estimering av farkostens position, hastighet och orientering under perioder utan information från GNSS-mottagaren.

Förutsättningarna för att realisera ett PNT-system varierar även för olika typer av farkoster. Undervattensfarkoster utgör ett tydligt exempel då de sensorer och tekniker som används skiljer sig avsevärt åt jämfört med de som typiskt utvecklas för obemannade yt- och markfarkoster. Små UAV:er kan även ha stringenta krav när det gäller storlek, vikt, effektförbrukning och kostnad vilket

²¹ Global Navigation Satellite System, innefattar GPS, Galileo, GLONASS och Beidou-2.

kraftigt begränsar valet av sensorer som kan användas jämfört med vad som är möjligt för exempelvis taktiska UAV:er.

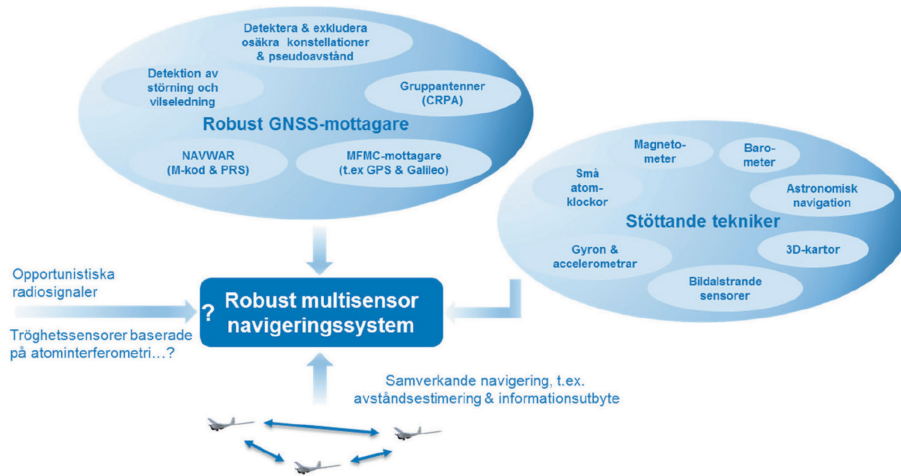
Ett multisensorsystem som integrerar olika tekniker med komplementära felmodeller utgör den dominerande forskningsinriktningen för att lösa denna utmaning. Vilka sensorer som kan användas beror på plattformen, men ett robust PNT-system för autonoma system förväntas i de flesta konfigurationer bestå av (se [3]): (i) tröghetssensorer, (ii) en robust GNSS-mottagare som använder signaler från multipla frekvenser och satellitkonstellationer och vid behov även kompletteras med en adaptiv gruppantenn, (iii) magnetometer, (iv) barometer och (v) en stabil klocka. I många system integreras även olika typer av hastighetsmätningar (t.ex. odometri för markfordon eller dopplerhastighetsloggar, DVL, för yt- och undervattensfarkoster) och bildalstrande sensorer (EO/IR, LiDAR, etc). Digitala kartdatabaser, allt från noggranna digitala 3D-kartor till databaser med information om glest utspridda landmärken, ger ökade möjligheter till noggrann positionering och möjlighet att låsa positionen till globala koordinater. Samverkande navigeringstekniker bedöms även utgöra ett viktigt komplement för främst mindre farkoster.

Robusta PNT-system är ett prioriterat forsknings- och utvecklingsområde internationellt. US Army har exempelvis i sin moderniseringsstrategi identifierat sex prioriterade materielområden.²² Utöver dessa materielområden pekas även två tekniker ut som kritiska för att möjliggöra den planerade moderniseringen, syntetiska träningsmiljöer och robusta PNT-system.

Eftersom ett stort antal plattformar, med olika behov och förutsättningar, har behov av PNT-system med en ökad robusthet så är området brett i sin karaktär. Delvis unika lösningar kan behöva appliceras på specifika plattformar. Ett stort antal tekniker är intressanta för framtida PNT-system, se figur 5.1. Basen förväntas utgöras av ett multisensorsystem som utrustas med en robust GNSS-mottagare som kompletteras med olika stöttande sensorer. Forskningen inom området har på FOI varit uppdelad i ett flertal olika projekt. De senaste åren har en ökad samordning och synkronisering genomförts vilket har varit nödvändigt för att maximera effekten av forskningsinsatserna.

Inom ramen för projektet har olika tekniker studerats som utgör ett komplement till forskning som genomförs inom andra projekt. De tekniker som studerats har, med undantag av astronomisk navigering, även valts ut specifikt för att de har en tydlig koppling till obemannade farkoster.

²² www.army.mil/e2/downloads/rv7/2019_army_modernization_strategy_final.pdf



Figur 5.1: Översikt över tekniker som är aktuella för införande i militära PNT-system [1].

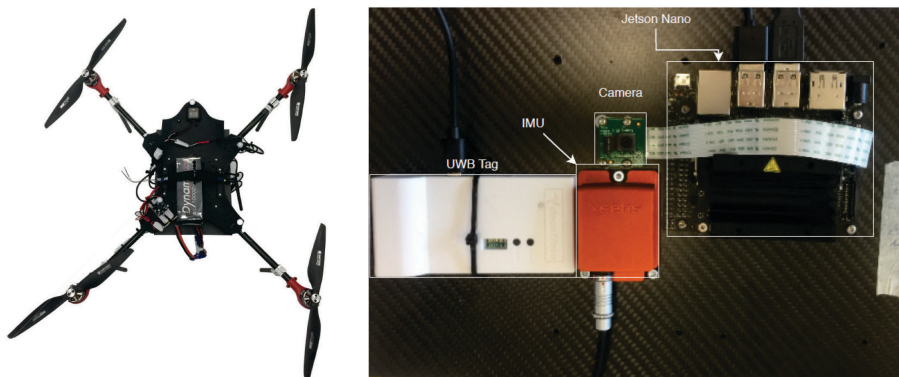
5.2 Automatisk landning

Obemannade flygande farkoster (UAV) är användbara för spaning och kan snabbt täcka stora ytor, men framför allt mindre multirotorfarkoster begränsas av kort flygtid. Obemannade markgående fordon (UGV) har betydligt längre uthållighet och större förmåga att bära sensorer, vapen och annan last. UAV:er kan istället snabbt genomföra spaning över ett större område. Det är därför intressant att undersöka möjligheterna att kombinera de båda farkosttyperna.

5.2.1 Bakgrund

En UGV kan agera som moderplattform för en autonom UAV som exempelvis kan skickas upp för att avsöka ett område eller för att spana längs UGV:ns planerade framryckningsväg. UAV:n kan då detektera hot men även stödja UGV:n i dess dynamiska ruttplanering. För att detta ska vara praktiskt möjligt behöver UAV:n kunna starta från UGV:n och även automatiskt landa igen när dess uppdrag är avslutat eller batterierna behöver laddas. För att kunna utföra detta krävs att farkosterna har en god uppfattning om sina positioner relativt varandra.

För att minimera behovet av operatörer som detaljstyr de obemannade farkosterna, är det önskvärt att de kan operera med en hög grad av autonomi. De obemannade farkosterna behöver även kunna användas i teilstörda miljöer vilket medför att autonoma funktioner, inklusive start och landning, behöver fungera utan tillgång till GNSS. Så långt som möjligt ska farkosterna även kunna operera under olika förutsättningar avseende exempelvis väder samt ljus- och siktförhållanden.



Figur 5.2: UAV och dess navigeringssensorer i form av radiobaserad avståndsestimering (Ultra-wideband, UWB), visuell kamera och accelerometrar, gyroskop, magnetometer och barometer (Inertial Measurement Unit, IMU) och dator (Jetson Nano) (foto: FOI).

5.2.2 Genomförande

Ett examensarbete har genomförts för att undersöka möjligheten att autonomt landa en UAV på ett obemannat markfordon (UGV) i rörelse [29]. Varken markfordonet eller UAV:n antas ha tillgång till positionering via GNSS, och det är önskvärt att så långt som möjligt undvika att sända ut röjande radiovågor eller ljus (exempelvis LiDAR). Vidare förutsätts att UAV:n kan navigera till fordonets närområde (inom 50 meter) innan landningsproceduren inleds. Den UAV som används är en så kallad *quadcopter*, dvs en UAV som drivs av fyra nedåtriktade rotoror, se figur 5.2. I figuren visas även en närbild på dess sensorpaket som är monterat under farkosten. UAV:n har en diameter på cirka 70 cm.

Den utvecklade metoden för autonom landning består huvudsakligen av två delar: (i) estimering av UAV:ns position relativt UGV:n och (ii) reglering av UAV:n för att navigera till en landningsplatta som monterats på en UGV.

5.2.2.1 Estimering

Den utvecklade landningsmetoden fusionerar information från flera olika sensorer för att estimerar UAV:ns position relativt markfordonet:

- avståndsmätning mellan UAV och fyra punkter i hörnen av landningsområdet, uppmätt med *ultra-wideband* (UWB) radio,
- observationer av markörer i landningsområdet med en visuell kamera (markörerna är endast synliga i slutet av landningsproceduren när UAV:n befinner sig nära UGV:n),
- acceleration och orientering hos UAV och UGV, mätt med tröghetssensorer (treaxliga accelerometrar och gyroskop) och magnetometer,
- markfordonets accelerationsmätningar överförs till UAV:n,

- UAV:ns höjd estimeras med en barometer.

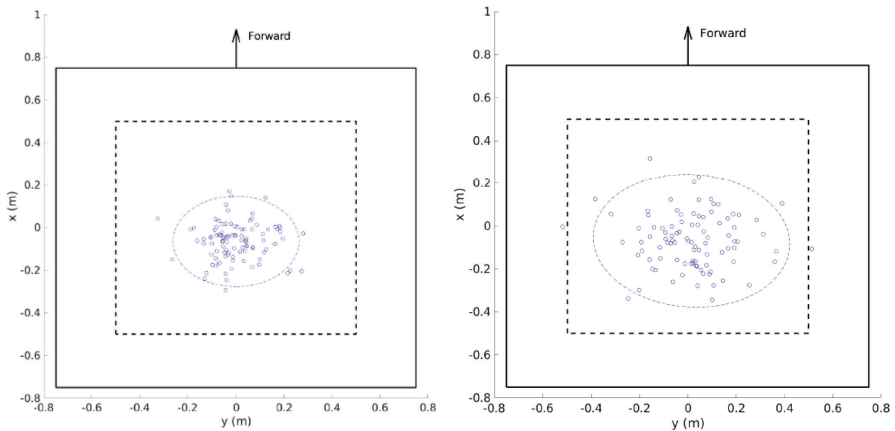
Eftersom UWB är en extremt bredbandig impulsradio som använder en låg uteffekt är den utsända radioeffekten svår att upptäcka, framförallt på längre avstånd eller med traditionella signalspaningsmottagare. Information om UGV:ns acceleration och orientering, som i nuvarande implementation behöver sändas över till UAV:n i realtid, förväntas kunna ersättas med estimat av hastighet och orientering. Detta förväntas reducera behovet av överföringskapacitet till en nivå där data kan överföras direkt av UWB-noderna.

Positionsestimeringen sker i ett *extended Kalman filter* (EKF). Utöver position estimeras även UAV:ns relativa hastighet samt osäkerheten i position och hastighet. Farkostens absoluta position kan inte estimeras med de sensorer som finns ombord, men kunskap om UAV:ns relativa position och orientering gentemot markfordonet är tillräckligt för att den ska kunna navigera till, och landa på, markfordonet.

5.2.2.2 Reglering

Förutom att analysera sensordata och estimerar UAV:ns position, kommunicerar en dator ombord på UAV:n med dess autopilot. Styrkommandon sänds till autopiloten i form av kommenderad orientering och vertikalhastighet. Regleringen bestämmer alltså vilka roll-, pitch och yaw-vinklar UAV:n ska inta, och om den ska stiga eller sjunka. Genom att kommendera roll uppnås acceleration (och i förlängningen hastighet) i sidled, och genom att kommendera pitch uppnås förflyttning framåt eller bakåt. Yaw är i praktiken ointressant eftersom en UAV av denna typ kan förflytta sig i alla riktningar. Autopiloten kan styra orientering och vertikalhastighet även då GNSS är otillgängligt, baserat på data från accelerometrar, gyron och barometer.

Regleringen är uppdelad i olika faser. När UAV:n befinner sig långt från markfordonet används så kallad syftbäringsstyrning, vilket innebär att UAV:n förflyttar sig i riktning mot en punkt dit UGV:n är på väg. Detta är mer effektivt än att följa efter UGV:n under dess rörelse. När UAV:n kommit nära UGV:n, övergår regleringen till följning med hjälp av en PID-baserad (*Proportional, Integral, Derivative*) regulator som beräknar styrvinklar baserat på den relativa skillnaden i position, den senaste tidens historik och hur skillnaden i position förändras momentant. I denna fas börjar UAV:n också sjunka ned mot landningsområdet. När positionsskillnaden blir mindre än några decimeter övergår regleringen till en annan PID-regulator som gör mer försiktiga styruslag och UAV:n sjunker hela vägen ner till landning. Om positionsskillnaden istället börjar öka under landningsförsöket stiger UAV:n och styrningen återgår till den föregående fasen.



Figur 5.3: Landningspositioner i simulerad miljö. Till vänster visas resultatet då alla sensorer används för att estimerar den relativa positionen mellan UAV och UGV. Till höger visas resultatet då alla sensorer utom kameran används. Den heldragna rektangeln visar landningsområdets yttre gräns, den streckade linjen visar det område där UAV:n kan landa utan att ett av landningsbenen riskerar att hamna utanför landningsplattan, de blå ringarna markerar landningspositioner, och den streckade ellipsen markerar det område inom vilket 95% av landningspositionerna ryms.

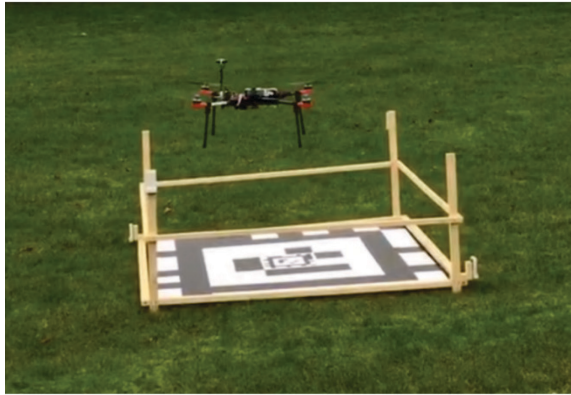
5.2.2.3 Simuleringsresultat

Under examensarbetet uppnåddes goda resultat i en generell simuleringsmiljö som även använder en identisk mjukvara för den autopilot som används i UAV:n. Figur 5.3 visar var i landningsområdet den simulerade UAV:n landar vid ett stort antal simuleringar. Centrum på UAV:n vid de olika landningarna illustreras med ringar. Som framgår av figuren landar den konsekvent inom det säkra området, vilket markeras av en streckad svart linje och som garanterar att inget av dess stödben hamnar utanför landningsplattan. Som jämförelse visas även landningspositioner då alla sensorer förutom kameran används. Detta är intressant för att undersöka vilken noggrannhet som kan uppnås i exempelvis mörker eller under dåliga siktförhållanden. Något sämre noggrannhet uppnås i detta fall och ett fåtal av landningspositionerna ligger utanför det säkra landningsområdet.

5.2.2.4 Försök i verklig miljö

Eftersom simuleringar bygger på modellantaganden och förenklingar behöver även försök i verklig miljö genomföras för att validera resultaten. Exempel på potentiellt viktiga skillnader mellan simulering och verklighet är:

- sensorsimulering, där framför allt IMU-mätningar skiljer sig åt mellan simulering och verklighet, delvis på grund av vibrationer i det verkliga fallet som inte modelleras i simuleringarna,



Figur 5.4: UAV på väg ned mot landningsområdet vid flygförsök (foto: FOI).

- vindens påverkan, där simuleringsmodellerna för turbulens och vindbyar är förenklade och
- dynamikmodeller för UAV, där UAV:n har inte samma massa, tröghetsmoment, motorkraft och aerodynamiska egenskaper som simuleringsmodellerna och den kommer i verkligheten därför att uppträda något annorlunda.

De algoritmer som utvecklades under examensarbetet har anpassats till den befintliga hårdvaran och inledande flygförsök har därefter genomförts. I dessa försök har landningsplattan stått stilla på marken för att undvika behovet av kontinuerlig kommunikation mellan de båda plattformarna. Vidare så har barometern exkluderats och parametrar för estimering av relativ position och reglering har även justerats. Goda resultat har uppnåtts även vid de fysiska flygförsöken. Av säkerhetsskäl, för att undvika kollisioner med den struktur där UWB-radiomodulerna är monterade, har landningarna dock avbrutits några decimeter över plattan. Figur 5.4 visar när UAV:n är på väg ned mot landning vid de genomförda initiala försöken.

5.2.3 Fortsatt arbete

Fortsatta flygförsök kommer att genomföras i närtid där syftet är att få underlag för finjustering av parametrar i estimerings- och regleralgoritmer, framförallt under olika vindförhållanden. Därefter kommer flygförsök att genomföras med landningsplattan monterad på en UGV som är i rörelse.

Ambitionen är även att ersätta PID-regulatorn mot reglering baserad på så kallad modellprediktiv reglering (*Model Predictive Control, MPC*). MPC är en regleringsmetod som, i varje tidssteg, modellerar det styrda systemet under en kort tid framåt och räknar ut den optimala styrningen. Detta skiljer sig från PID-regulatorn, som endast reagerar på aktuella mätningar av tillståndet. MPC

förväntas förbättra noggrannheten vid landning på en rörlig plattform. I det fortsatta arbetet kommer även möjligheterna att genomföra landningen i mörker att undersökas.

5.3 Förbättrad navigering genom dynamisk ruttanpassning

Ofta ses lösningen från positionering i navigeringssystemet som beroende enbart på sensorprestanda. En autonom farkost har dock möjlighet att själv planlägga sin egen rutt och den kan även i realtid anpassa sin rutt för att på så sätt öka noggrannheten i navigeringssystemet.

5.3.1 Bakgrund

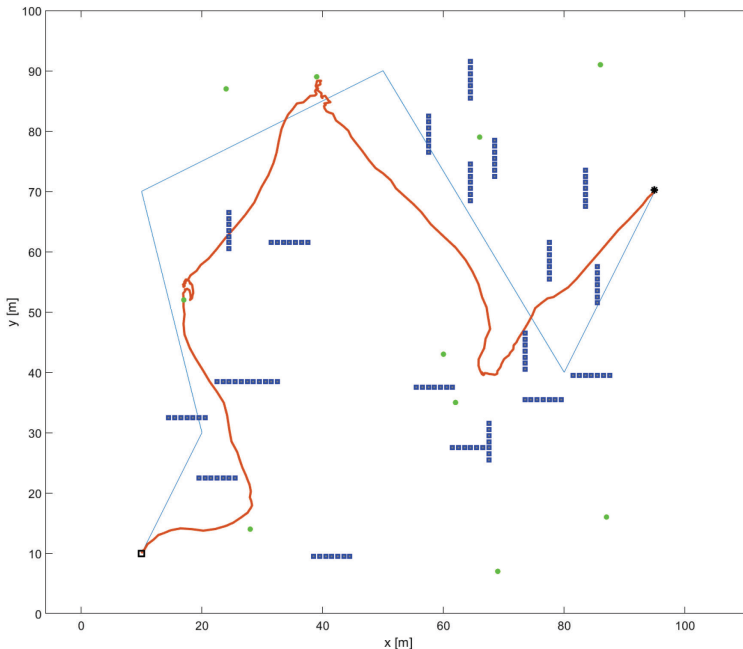
Ett PNT-system som består av en GNSS-mottagare och ett tröghetsnavigeringssystem kan för att erhålla en högre noggrannhet och robusthet stöttas med sensorer som på olika sätt mäter omgivningen, exempelvis i form av bildalstrande sensorer. Genom att anpassa farkostens rutt till en (för de bildalstrande sensorerna) informationsrikare omgivning kan PNT-systemets osäkerhet reduceras. I exempelvis [30] beskrivs hur detta kan genomföras vid kustnära navigering.

Anpassningen av rutt i syfte att öka positionsnoggrannheten kan genomföras på flera olika sätt beroende på vilka sensorer som används, exempelvis genom att:

- utföra speciella manövrer som underlättar för ett tröghetsnavigeringssystem att estimeras och korrigera för estimeringsfel,
- låta farkosten, i scenarion där farkostens GNSS-mottagare är utsatt för störning, välja en rutt så att skuggande geografi (exempelvis byggnader eller terräng) dämpar effekten från störaren,
- välja en rutt som förbättrar möjligheten att få en god geometri vid estimering av landmärken från fordon som är utrustade med bildalstrande sensorer.

5.3.2 Genomförande

Inom projektet genomfördes en inledande studie i form av ett examensarbete [31]. Studien utvärderade ruttoptimeringsalgoritmer med syntetiska simuleringsbaserade scenarier, se figur 5.5. Givet en uppsättning kända landmärken och skymmande barriärer i ett tvådimensionellt scenario och en initialt given färdplan utvärderades metoder för anpassning av rutten i syfte att reducera navigationssystemets osäkerhet. Genom att anpassa rutten blev fler landmärken synliga med fordonets sensorer, alternativt så kunde de observeras under längre perioder. I figur 5.5 visas hur en resulterande rutt kan se ut



Figur 5.5: Exempel på ett simulerat 2D-scenario som utvärderas i [31]. De gröna punkterna utgör kända landmärken medan de blå barriärerna skymmer sikten till landmärken men kan passeras. Den blå ruten är den ursprungliga planerade ruten medan den röda är resultatet efter att ruten optimerats för att reducera positionsosäkerheten.

efter denna anpassning. Den röda linjen visar den optimerade ruten medan den heldragna blå linjen visar den ursprungliga ruten. Resultaten uppvisade en förbättring av positionsnoggrannheten med i storleksordningen 20-25%.

Prestandaökningen är kraftigt scenariorberoende för den här typen av metoder. I scenarion där alternativet är att passera en informationsfattig ”öken eller öppet hav” jämfört med att följa ”trädlinjen eller kusten” kan avsevärda prestandavinst förväntas. Den använda metoden, som benämns modellprediktiv reglering (MPC), kan även kombineras med ytterligare bivillkor för att optimera fordonets rutt men som studien också belyste krävs förmodligen effektiva approximationer för att i realtid kunna hantera komplexa problem.

5.3.3 Kvarvarande forskningsutmaningar

Den primära forskningsutmaningen kopplat till algoritmutveckling som bör adresseras i det fortsatta arbetet är att modellera problemen så att både den uppgift som skall uppfyllas kan fångas upp samtidigt med den osäkerhet som finns i utfallet av planen rimligt långt fram i tiden. Detta kan eventuellt lösas genom att en probabilistisk modellprediktiv reglering implementeras, se exempelvis [32]. Modellen behöver även tillåta approximationer som begränsar

tillväxten i komplexiteten så att lösningen kan beräknas i realtid. Det grundläggande teoretiska optimeringsproblemet, om full hänsyn tas till osäkerhet, kan ha oändlig dimension och är därför ofta praktiskt olösligt. Målet är därför att utveckla algoritmer som baseras på approximationer som uppvisar en god avvägning mellan de olika delarna av uppgiften.

Styrningen (valet av rutt) behöver slutligen även utgöra en godtagbar kompromiss mellan att styra försiktigt när systemet är osäker på sin position, styra dit systemet "tror" att den ska (för att lösa uppdraget) och att styra för att bättre veta var farkosten är så att den med högre sannolikhet kommer dit den ska.

5.4 Stjärnnavigering

Stjärnhimlen har i många århundraden använts för att bestämma exempelvis fartygs position och automatisk stjärnnavigering med kameror är en beprövad teknik som finns implementerad i exempelvis mobiltelefoner. Stjärnnavigerings-system (*celestial navigation* eller *star trackers*) används även på satelliter och de kan med små och strömsnåla sensorer ge en hög orienteringsnoggrannhet även för små satelliter (s.k. *CubeSat's*).²³ Mönsterigenkänningsalgoritmer gör det möjligt att snabbt och effektivt få fram den riktning som en kamera pekar i. En grundläggande förutsättning är dock att flera stjärnor kan detekteras i en bild.

5.4.1 Bakgrund

För farkoster som flyger ovanför molnen har tekniken använts i mer än 50 år. Automatiserad stjärnnavigering som använde kameror i det visuella våglängdsbandet integrerades med tröghetsnavigeringssystem (s.k. *astro-inertial navigation*) på exempelvis ubåtsbaserade interkontinentala ballistiska robotar (*Intercontinental Ballistic Missile, ICBM*) och spaningsflygplanet SR-71 Blackbird [2]. Det är framförallt möjligheten att nå en extremt hög noggrannhet i orienterings-estimatet som gjort tekniken intressant. Det är intressant att utvärdera huruvida stjärnnavigering även kan utgöra ett komplement för positionering av obemannade farkoster. För att utgöra ett alternativ även för obemannade mark- eller ytfarkoster förutsätts dock att de kan användas i dagsljus och under molniga förhållanden.

5.4.2 Genomförande

Ett patent (US7349803) som delvis legat till grund för detta arbete pekar på att en kamera som är känslig i våglängdsbandet SWIR (*Short Wave Infra Red*) kan vara fördelaktig i vissa situationer i jämförelse med en visuell kamera.

²³ spinoff.nasa.gov/Spinoff2019/it_2.html

I patentet nämns två väsentliga fördelar med SWIR:

- för en given magnitud på stjärnornas styrka bedöms upp till tio gånger fler stjärnor kunna ses i ett SWIR-band i jämförelse med de kortare visuella våglängdsbanden,
- atmosfärsspridning från solen, och därmed bakgrundsinstrålningen i en bildalstrande sensor, blir väsentligt lägre med SWIR-sensorer.

I patentet föreslås att sensorer som är känsliga på våglängderna 1,6 μm (H-bandet), med en bandbredd på 0,25 μm , eller vid 2,2 μm (K-bandet), med en bandbredd på 0,2 μm , ska användas för att möjliggöra stjärnavigering dagtid. Bakgrundsstrålningen från solen kan vara lägre i K-bandet men de våglängderna täcks inte in av traditionella SWIR-kameror (som använder Indium Gallium Arsenide, InGaAs, detektorer). Därför fokuseras arbetet på våglängden 1,6 μm .

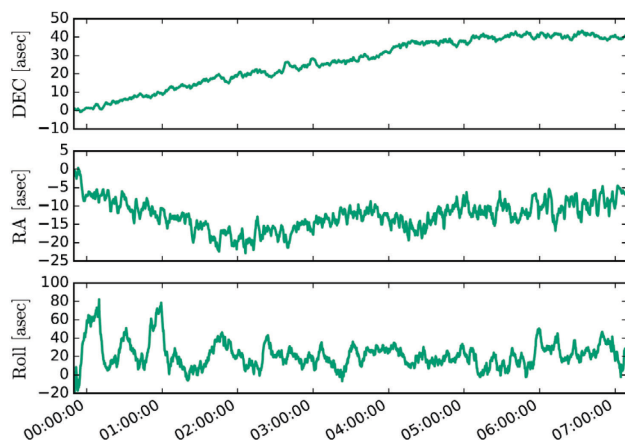
Arbetet har i huvudsak omfattat två delar: (i) att praktiskt testa prestanda och egenskaper hos dagens SWIR-kameror jämfört med visuella kameror kopplat till stjärndetektion och (ii) att använda insamlade data för positionsbestämning med hjälp av den öppna programvaran *Open Startracker*. Den senare delen genomfördes under 2019 som ett examensarbete [33].

Mätningar har genomförts med två olika SWIR-kameror och en visuell monokrom CMOS-kamera.²⁴ Kamerorna har vid varje mättillfälle ensats så att de tittat i samma riktning och synfältet har i möjligaste mån anpassats till att vara så lika som möjligt. Synfältet har varierats men det har typiskt legat i intervallet tre till fem grader då det bedömts vara rimligt i tänkta applikationer. Ett mindre synfält skulle dock ge mindre bakgrundsljus som strålar in i sensorn och potentiellt öka möjligheten att detektera stjärnor dagtid.

I [33] användes bilder som samlades in under mörker, bland annat eftersom det under dessa förhållanden är enkelt att registrera sekvenser med ett stort antal synliga stjärnor. Bilderna har bearbetats och anpassats till programvaran *Open Startracker*. Flera olika metoder har testats och jämförts. Resultaten visar att det är möjligt att erhålla en god orienteringsnoggrannhet nattetid och under relativt molnfria väderförhållanden. Figur 5.6 visar ett exempel på beräknat orienteringsfel för en mätsekvens insamlad med SWIR-sensorer. Någon fördel med SWIR-kameran har dock inte kunnat påvisas under dessa gynnsamma förhållanden och motsvarande resultat erhöles med den betydligt enklare visuella kameran.

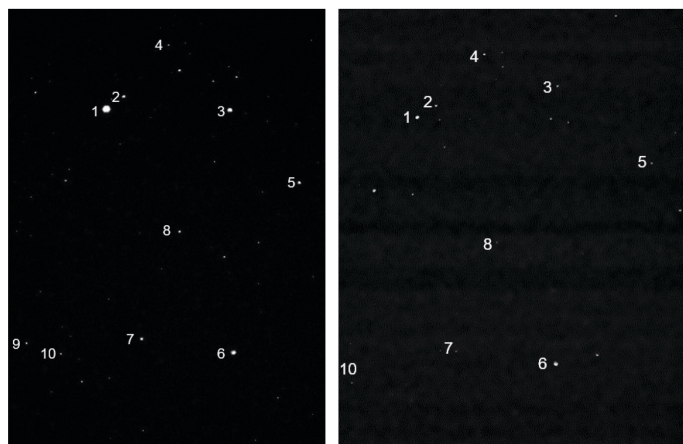
Figur 5.7 visar ett exempel på jämförande bilder under mörker där den vänstra bilden är tagen med kameran medan den högra bilden är tagen med en SWIR-sensor i våglängdsbandet 1,4–1,7 μm . Tio stjärnor har identifierats som är synliga i dessa bilder (se tabell 5.1) med hjälp av webapplikationen

²⁴ Raptor photonics OWL-640 och OWL-1280 (SWIR) och FLIR-BFS-PGE-31S4M (visuell kamera).



Figur 5.6: Beräknat orienteringsfel baserat på en sekvens av insamlade SWIR-bilder under gynnsamma väderförhållanden. Bilderna togs 2020-11-06 kl. 04:15:05. 1 bågsekund (asec) = $1/3600^\circ$. RA (Right Ascension) motsvarar longitud och DEC (Declination) motsvarar latitud. Roll beskriver kamerans vridning i koordinatsystemet.

Stellarium web.²⁵ Generellt kan noteras att mängden detekterade stjärnor vid mörker inte är större med den aktuella SWIR-kameran, snarare något lägre. Anledningen till detta kan bero på många faktorer. En effekt som skulle kunna bidra till ett högre brus i SWIR-sensorn, förutom kameraspecifika egenskaper är s.k. *night glow* som orsakas av flera olika fysikaliska reaktioner i atmosfärs lagret på 90-100 km höjd [34]. Detta fenomen är betydligt kraftigare vid SWIR-



Figur 5.7: Visuellt bild (vänster) av del av himlen och motsvarande bild i SWIR (höger).

²⁵ www.stellarium-web.org/

Tabell 5.1: Namn, spektraltyp, magnitud och avstånd för de tio starkaste stjärnorna.

#	Namn	Spektraltyp	Magnitud	Avstånd (ljusår)
1	Delta Aurigae	K0IIIb	3,88	126,03
2	HD 40083	K2III	6,28	307,12
3	Xi Aurigae	A2V	4,97	238,24
4	HD 40062	A5m	6,47	330,46
5	26 Camelopardalis	A4Vn	5,97	198,27
6	HD 36678	M0III	5,81	746,36
7	V538 Aurigae	K1	6,34	40,04
8	HD 38257	K0	6,72	554,69
9	HD 38007	G0	6,66	195,91
10	HD 37693	G0	7,25	101,61

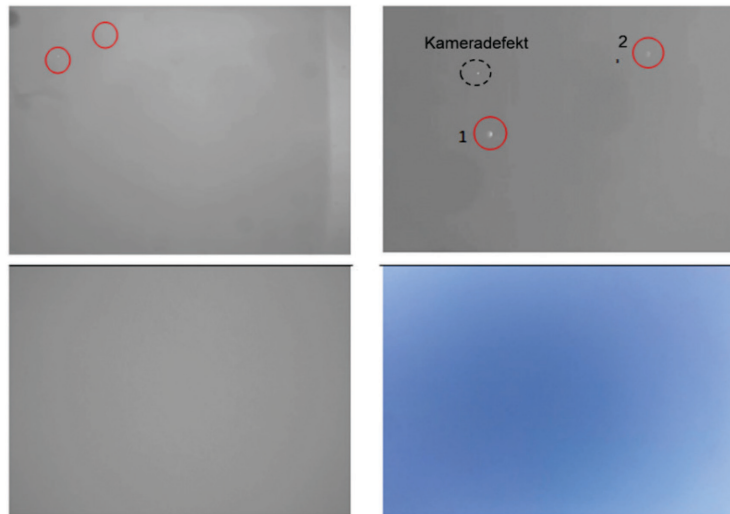
vågländer än vid de visuella våglängderna. En djupare analys relaterat till stjärnornas spektraltyp och hur de uppfattas i de olika våglängdsbanden skulle kunna ge en ökad förståelse för skillnaderna i intensitet i bilderna i figur 5.7.

En annan intressant frågeställning är om den något bättre transmissionen genom moln i SWIR-bandet ger en avgörande fördel. En subjektiv bedömning ger vid handen att stjärnor kan ses något bättre genom tunnare moln med SWIR-kameran men en djupare analys har ännu inte genomförts. Frågeställningen är dock komplex och transmissionen kommer huvudsakligen att bero på storleken hos partiklarna och mängden partiklar i molnet. Den stora fördelen med SWIR-sensorer är möjligheten att detektera stjärnor på dagen då solinstrålningen är högre och detektionsmöjligheten begränsas av bakgrundsljuset.

Figur 5.8 visar ett exempel på detektion av stjärnor under ljusa förhållanden. Den övre vänstra bilden visar två detekterade stjärnor (*CG Ursae Majoris* och *17 Ursae Majoris*) i bilden från en SWIR-kamera med ett optiskt bandpassfilter som ungefär motsvarar H-bandet. Den högra visar samma bild inzoomad. Den vita prickerna orsakas av en kameradefekt. Bilderna är inte filtrerade men de har registrerats med rekursiv medelvärdesbildning över tre bilder. De två stjärnorna kunde följas under hela passagen av kamerans synfält (cirka 25 minuter). Nere till vänster visas en bild från den visuella kameran. I den visuella kameran kunde inga stjärnor noteras under det aktuella tidsintervallet. Nere till höger visas som referens en bild tagen med en färgkamera (dock med ett större synfält).

5.4.3 Diskussion

Praktisk kunskap avseende mätningar av stjärnhimlen med SWIR-sensorer har erhållits genom arbetet. De begränsade mätningar och analyser som har genomförts indikerar att SWIR-sensorer bedöms ha potentialen att detektera fler



Figur 5.8: Övre vänstra bilden registrerad med SWIR-kamera 2020-11-06 klockan 07:39. Filter LP1400 som tillsammans med kamerans spektralområde ger ett våglängdsband ungefär motsvarande H-band. Till höger visas en inzoomad del av bilden. Nedre vänstra bilden är registrerad med den visuella (monokromatiska) kameran. Den nedre högra bilden visar himlen i samma riktning tagen med annan kamera (ej samma synfält).

stjärnor under ljusare förhållanden och möjligen genom lättare molntäcken i jämförelse med traditionella kameror.

5.4.4 Kvarvarande utmaningar

I syfte att erhålla en mer kvalitativ utvärdering av möjligheterna att med SWIR-sensorer erhålla hög orienteringsnoggrannhet under ogynnsamma väderförhållanden (dagtid och molntäcke) behöver följande delaktiviteter genomföras: (i) hårdvaruanpassningar av SWIR-sensorerna (smalare våglängdsfiltrering och optik med mindre synfält), (ii) modifierade detektionsalgoritmer anpassade specifikt för dagmätningar och (iii) långtidsmätningar av tillgänglighet som funktion av väderförhållanden.

I planeringen av kommande projekt har dock andra aktiviteter prioriterats högre och under 2021 kommer arbetet att pausas. Denna aktivitet bedöms utgöra en forskningsaktivitet med hög risk som förutsätter större forskningsresurser än vad som nu finns tillgängligt inom pågående projekt. Tekniken är dock fortsatt intressant. Den avgörande frågan är om en tillräckligt hög tillgänglighet kan nås. Framförallt är det intressant att utvärdera möjligheten att följa de starkaste objekten med enklare SWIR-sensorer.

6 Feldetektion och felhantering

Obemannade farkoster är beroende av automatiserade funktioner för att kunna fungera med olika grader av högnivåstyrning. Det automatiska kontrollsystemet ska ersätta en mänsklig operatör och behöver klara av de direkta operatörsuppgifterna i form av styrning av den obemannade farkosten, men även andra uppgifter som en operatör har som att hantera uppkomna fel i systemet. En central del i implementationen av autonomi utgörs därför av feldetektion, felidentifiering och hantering av felet på ett säkert sätt för systemet och omgivningen. Det engelska begrepp som används inom exempelvis flygsektorn för att beskriva detta är *failure detection, identification and recovery* (FDIR).

6.1 Syfte och mål

En förstudie har initierats för att skapa en grundläggande förståelse för de utmaningar och möjliga metoder som kan användas för att uppnå en tillförlitlig förmåga att upptäcka potentiellt systemkritiska fel och för att erhålla kunskap rörande de åtgärder som kan vidtas för att hantera dessa fel. Både detektionsmetoder och de åtgärder som kan och bör vidtas förväntas variera beroende på typ av obemannad farkost (mark-, sjö- eller luftfarkost), men begränsas även utifrån dess storlek. Det finns därmed även ett behov av att undersöka möjligheten att utveckla generella angreppssätt för att analysera obemannade farkostsystem och designa system som är säkra för sin omgivning och som kan fungera i tilltänkta miljöer. Behovet existerar för teleopererade obemannade farkoster, men behovet är framförallt kritiskt för autonoma farkoster. Avsikten är även att ge rekommendationer rörande prioriterade forskningsaktiviteter som bör initieras för att adressera kritiska frågeställningar.

6.2 Bakgrund

Höggradigt automatiserade system finns inom olika ingenjörsgrenar, där operatörerna succesivt har ersatts med automatiserade kontrollsystem. Ju mer komplexa systemen är, desto mer avancerad automatisk kontroll behöver implementeras. Exempel på områden med hög automationsgrad är processindustrin, kärnkraftverk, kraftförsörjning, självkörande bilar och lastfordon, obemannade mark-, sjö och luftfarkoster samt satellitsystem. För dessa säkerhetskritiska system har stora resurser allokerats för att utveckla metoder för feldetektion och felhantering och det är intressant att utnyttja de lärdomar som kan dras från dessa arbeten. Inom olika områden har olika metoder använts och många forskningsartiklar fokuserar på att lösa ett specifikt kontrollproblem med en specifik metod. Vilken metod som används varierar mellan ingenjörsområden och tillämpningar.

I allmänhet kan metoderna delas upp i tre typer, (i) kvantitativa modellbaserade metoder, (ii) kvalitativa metoder och sökstrategier samt (iii) metoder baserade på historiska data. Beroende på vilket system som beaktas uppstår olika frågeställningar och olika metoder är lämpliga att applicera. Till exempel kan systemet ha redundanta komponenter och detektera om de ger olika resultat, så kallad fysisk eller hårdvaruredundans. System kan också ha analytisk redundans, en beräkningsmodell av komponenten som visar om modellen och hårdvaran ger olika resultat. Ibland kan en kombination av båda metoderna användas.

6.3 Genomförande

I inledningen av förstudien har ett visst fokus lagts på att studera metoder för obemannade flygande farkoster. Metoderna som har utvecklats varierar beroende på farkostens storlek. I små och lätta farkoster används enbart analytisk redundans på grund av viktbegränsningar och ett exempel på detta finns i [35] där motorfel och propellerförlust för en multirotor UAV med åtta rotorblad (en s.k. *octorotor* UAV) identifieras med en statistisk klassificeringsmetod (*support vector machine*) som tränats med historiska data för denna UAV. En metod för att kompensera fel föreslås även, där omfördelning av motoreffekt automatiskt genomförs till de fungerande propellrarna.

I [36] ges en översikt av feldiagnos och felkontroll av en multirotor UAV med fyra rotorer (*quadrotor*). En icke-linjär metod för att detektera, isolera och uppskatta samtidiga sensorfel i accelerometer och gyroskop föreslås i artikeln. Felen identifieras genom design av komplementära estimatorer som var och en är känsliga för en typ av sensorfel.

Europeiska rymdorganisationen (ESA) har utvecklat ett ramverk, GAFE [37], för FDIR för rymdtillämpningar som innehåller metoder, strukturanalys och en simulator (implementerad i Simulink). Syftet med ramverket är att sätta upp ett systematiskt angreppssätt och få transparens i systemen för att undvika onödigt komplexitet för FDIR sent i utvecklingsprocessen. GAFE är generiskt och innehåller metodologi för kravställning, strategier för felhantering, en översikt på hög nivå av uppgifterna som behöver utföras för design av FDIR under utvecklingsprocessen och detaljerade procedurer för de viktigaste stegen. Ramverket bedöms initialt även kunna användas som en utgångspunkt för analys och utveckling av FDIR inom andra områden, exempelvis obemannade system.

För att ett autonomt system ska vara säkert krävs även att det har förmåga att upptäcka hinder och genomföra undanmanövrer för att undvika kollisioner. Det finns mycket forskning inom robotik och autonoma bilar där signaler från sensorer ska identifiera hinder som dyker upp och sedan ska systemet manövrera fordonet/roboten för att undvika kollision och återuppta ursprunglig funktion. I [38] ges en översikt över metoder som används för att undvika kollisioner för flygande obemannade system, både för individuella system och svärmar.

7 Samarbeten

Syftet med de genomförda nationella och internationella samarbetena har varit att uppnå en effektivare kompetensuppbyggnad inom delområden där sådana samarbeten kan ge en större utväxling av forskningsinsatserna, eller där viktig information kan fås som är svår att erhålla genom öppna källor.

7.1 Nationella samarbeten

Obemannade och autonoma system är ett brett område som innefattar ett stort antal teknikområden, där flera av dem även gränsar till andra FoT-områden. Då forskningsfinansieringen som är direkt kopplad till obemannade och autonoma system är begränsad är det av stor vikt att synkronisera arbetet med relaterade forskningsprojekt och säkerställa att projekten synkroniseras och korsbefruktar varandra.

7.1.1 FoT-verksamhet

Projektet har koordinerat eller direkt samarbetat med ett flertal andra FoT-verksamheter. Inom FoT Samverkansprogrammet har projektet ett nära samarbete med FMV-projektet Autonoma och obemannade system. Information inhämtas även från SMaRC (*Swedish Maritime Robotics Centre*).²⁶

Inom FoT Ledning och MSI har projektet inom aktiviteten *Manned-Unmanned Teaming* synkroniserat verksamheten med projektet LASSIE. GT-OAS har deltagit i uppbyggnaden av en simuleringsmiljö som ger möjligheten att utvärdera vilken effekt obemannade system kan ge i ett markstridsscenario samt att utvärdera gränssnitts- och ledningskoncept. Även gemensamma försök har genomförts (se kapitel 4).

Projektet har inom navigeringsområdet synkroniserat forskningen med den som genomförs i andra projekt, exempelvis inom FoT Vapen och skydd (Styrda vapen och robotteknik), FoT Ledning och MSI (Robust PNT), FoT Sensorer och signaturanpassning (AI för spaningssensorer) och FoT Telekrig (NAVWAR). Forskningen inom navigeringsområdet har många olika tillämpningar och genomförs inom flera olika projekt som även har olika inriktning på den forskning som bedrivs. Av denna anledning genomförs regelbundna interna workshops där syftet är att sprida information, identifiera möjliga synergier och samverkansmöjligheter samt eliminera risken för överlappande forskningsaktiviteter. Gemensamma workshops och demonstrationer planeras även genomföras för Försvarsmakten.

²⁶ www.smarc.se

7.1.2 Kunskapsöverföring genom studier och spel

Projektet har bidragit med kunskap till Försvarsmaktsstudien AI studie sjukvård²⁷ när det gäller kunskap om utvecklingen av teleopererade obemannade och autonoma farkoster och hur de kan användas för exempelvis evakuering av skadade eller transporter av blodprodukter. Projektet har även stöttat FömedC genom att delta i det inledande mötet inom NATO HFM ET-167 *Development of Autonomous Medical Systems for Tactical Evacuation*. Ett nytt FoT-projekt, Autonom CASEVAC, inom Försvarsmedicin har initierats av FömedC och nyligen påbörjats.

Den kunskap som genererats inom projektet har överförts till Försvarsmakten genom bland annat ett flertal spel och studier (såsom Förstudie obemannade marksystem²⁸) samt genom möten, seminarier och workshops för Försvarsmakten. Den rådande situationen rörande coronapandemin har dock hämmat möjligheterna att under 2020 genomföra planerade workshops och avrapporteringar.

7.2 Internationella samarbeten

Syftet med att genomföra internationella samarbeten är att uppnå en effektivare kompetensuppbyggnad inom delområden där sådana samarbeten kan förväntas ge en större utväxling av satsade resurser. Inom projektets ram genomförs först och främst samarbeten med Norge och Finland inom ramen för NORDEFECO. Samarbete genomförs inom två områden: (i) robusta navigeringssystem för obemannade och autonoma system och (ii) tekniker för svärmar av samverkande obemannade, autonoma system. Projektet har även deltagit i olika Natogrupper där deltagandet i vissa fall genomförs med stöd från flera olika FoT-projekt.

7.2.1 NORDEFECO

Projektet har på uppdrag av LEDS deltagit i två arbetsgrupper inom NORDEFECO, dels om svärmtekniker och dels om tekniker för robusta navigationssystem. Inom ramen för projektet genomförs även planering för att genomföra en gemensam nordisk workshop inom området obemannade och autonoma system.

7.2.1.1 Swarming WG

De möjliga framtida förmågor som kan realiseras med svärmar, samt de tekniska utmaningar som behöver lösas för att realisera operativt effektiva svärmar av

²⁷ LOG1920001S

²⁸ MARK181802FS

obemannade system, beskrevs i arbetets första fas som genomfördes under 2018 [39]. NORDEFCO-arbetsgruppen om svärmteknologier färdigställde därefter ett projektdefinitionsdokument i slutet av juni 2020. Det fortsatta arbetet inom arbetsgruppen påbörjas i januari 2021 med en inventering av pågående forskningsprojekt, existerande simuleringsmiljöer och definition av relevanta scenarier och tillämpningar. Ett av målen är att utveckla och dela en gemensam virtuell simuleringsmiljö och genomföra gemensamma demonstrationer.

7.2.1.2 Robust Navigation WG

Sverige, Norge och Finland deltar i en arbetsgrupp inom NORDEFCO (*Robust Navigation WG*) som är inriktad mot robusta navigeringssystem för obemannade farkoster. FOI leder arbetet inom denna arbetsgrupp. Arbetsgruppen är avsedd att fungera som en arena för nordiskt samarbete inom robusta navigeringssystem för obemannade farkoster. Den föreslagna långsiktiga inriktningen är att utveckla och utvärdera alternativa navigeringstekniker som kan stötta en GNSS-mottagare och ge önskad noggrannhet även i telestörda miljöer. En rapport publicerades 2019 som analyserade *state-of-the-art* inom området, identifierade gemensamma forskningsintresseområden och rekommenderade att ett gemensamt forskningsprojekt ska initieras [40]. Det bedöms finnas synergieffekter som kan nås genom det föreslagna forskningsprojektet och den första fasen av projektet påbörjas troligen under våren 2021.

Robust Navigation WG driver även arbetet med att planera och genomföra en nordisk workshop inom området *Autonomous and Unmanned Systems* (AUS WS). Avsikten är att samla forskningsutförare, industrier och myndigheter (upphandlingsorganisationer och försvarsmaktspersonal) från de nordiska länderna och sprida kunskap, utbyta erfarenheter och facilitera forskningssamarbeten. Denna workshop har dock skjutits på framtiden på grund av den pågående pandemin och den kommer genomföras tidigast i slutet av 2021.

7.2.2 NATO

Projektet har deltagit i fyra olika NATO-grupper, i vissa fall tillsammans med andra FoT-projekt:

- *Understanding the cost related implications of autonomy: a system of systems perspective (Specialist Team).*
- *Development of autonomous medical systems for tactical evacuation (Exploratory Team).*
- *Robotics and autonomous systems operational impact on land warfare (RASOIL) wargame.*
- *NATO PNT Open System Architecture & Standards to Ensure PNT in NAVWAR Environments (Exploratory Team).*

Utöver dessa fyra Natogrupper beskrivs kortfattat ytterligare en relaterad Natogrupp, *Human Systems Integration for Meaningful Human Control over AI-based systems*, där FOI har deltagit.

7.2.2.1 Understanding the cost related implications of autonomy: a system of systems perspective

Natogruppen SAS ST-146 genomförde sitt arbete inom ramen för *Systems Analysis and Studies Panel*. Arbetet bedrevs som ett s.k. *Specialist Team* med deltagare från tre länder (Storbritannien, Estland och Sverige) och arbetet slutfördes under våren 2020. Gruppens arbete syftade till att utveckla metoder för att analysera kostnaderna för autonomi genom ett system-av-system angreppssätt [41]. Både förändringarna i kostnad och i prestanda analyserades genom scenariobaserade analyser där befintliga system ersattes med obemannade system. Även effekterna av nödvändiga organisatoriska förändringar inkluderades i analyserna.

Gruppen genomförde en litteraturstudie, analyserade tidigare arbeten rörande kostnadsuppskattningar vid införande av autonoma system och utvecklade en metod för att göra kostnadsanalyser. En erfarenhet som kunde identifieras i den studerade litteraturen var att förväntningarna på kostnadsbesparingar sällan infrias och att införandet inte heller alltid leder till personalreduktion men att nya förmågor kan bli ett resultat. Gruppen föreslår en analysmetod som bygger på att såväl första som andra och tredje ordningens kostnader ska tas med i beräkningarna. Det är även kritiskt att eventuella förmågeglapp som kan uppstå vid införandet av automation identifieras tidigt då de kan vara starkt kostnadsdrivande.

7.2.2.2 Development of Autonomous Medical Systems for Tactical Evacuation

FOI deltog som stöd till FömedC vid det första möte som genomfördes inom förstudien HFM-ET-167 (*Development of Autonomous Medical Systems for Tactical Evacuation*). Gruppen leddes av US Army TATRC (*Telemedicine & Advanced Technology Research Center*) och representanter från de olika försvarsmaktsgrenarna i USA deltog. Även Tyskland, Frankrike, Storbritannien och Nederländerna deltog i arbetet.

Arbetet fokuserade runt följande fem målsättningar (se även [6]):

- Etablera gemensamma NATO-koncept för hur kommande obemannade multirollsplattformar även ska kunna utnyttjas för medicinska ändamål.
- Etablera en NATO-gemensam roadmap för forsknings- och utvecklingsinsatser riktade mot robotiserade, obemannade och autonoma

förmågor som kan stödja omhändertagandet av skadade (*combat casualty care*) samt evakueringen av skadade (*tactical evacuation*).

- Utveckla metoder för att implementera s.k. *safe ride standards* för kommande obemannade plattformar som används vid evakuering av skadade.
- Kartlägga och välja ut interoperabilitetsstandarder.
- Definiera uppdragsplaneringsförmågor som förutsätts för att effektivt koordinera taktisk vård (*tactical care*) och evakuering med obemannade system.

Det fortsatta arbetet i denna arbetsgrupp finansierades efter det inledande mötet genom AI-studie sjukvård. Arbetet kommer nu att fortsätta inom ramen för en RTG (*Research and Technology Group*) men deltagandet finansieras i fortsättningen av det nystartade FoT-projektet Autonomous CASEVAC.

7.2.2.3 NATO PNT Open System Architecture & Standards to Ensure PNT in NAVWAR Environments

Försvarsmakten förväntas inom en tioårsperiod införa flera olika typer av obemannade farkoster men antalet farkoster av de olika typerna förväntas bli begränsade. I [1] beskrivs att det i syfte att reducera kostnaden och underhållskomplexiteten är önskvärt att varje farkosttyp inte förses med specialutvecklade PNT-system. Ett modulärt PNT-system som baseras på öppen standardiserad arkitektur kan möjliggöra att ett PNT-system kan användas på olika typer av farkoster, som kan ha skillnader i kravbild när det gäller storlek, vikt, strömförbrukning, kostnad och prestanda. Genom att designa algoritmer och hårdvaruarkitektur så att en *plug-and-play* funktionalitet möjliggörs, där sensorer relativt enkelt kan ersättas med uppgraderade versioner eller tas bort eller läggas till, kan potentiellt stora vinster erhållas. Det möjliggör exempelvis att samma system används på ett flertal olika farkoster samtidigt som det även kan möjliggöra enklare livstidsuppgraderingar av ett PNT-systems algoritmer eller sensorer. Den här typen av PNT-system är givetvis lika intressant för bemannade plattformar.

Två intressanta frågeställningar identifierades i [1]:

- Är *plug-and-play* multisensorfusionsalgoritmer, där samma sensorfusionsalgoritm används trots att exempelvis tröghetssensorerna kan variera mellan olika plattformar, applicerbart för ett framtida plattformsgemensamt PNT-system?
- Hur bör Försvarsmakten krävställa framtida PNT-system för att erhålla system med en öppen arkitektur och standardiserade gränssnitt?

Inom ramen för SET ET-120 (*NATO PNT Open System Architecture & Standards to Ensure PNT in NAVWAR Environments*) tas nu ett förslag till projekt fram där avsikten är att utveckla en standardiserad öppen arkitektur. Den

föreslagna aktiviteten inkluderar även en demonstration med PNT-systemet installerat ombord på ett markfordon, där olika nationer kommer att utvärdera möjligheterna att enkelt integrera sensorer, algoritmer eller delsystem.

Som en liten nation är det inte realistiskt att själva designa och kravställa ovan beskrivna funktionalitet då den kan öka kostnaderna avsevärt. Därför bedöms det vara av stor vikt att delta i den Natogrupp som studerar dessa frågeställningar. På det inledande möte som genomfördes i november 2020 deltog ca 50 deltagare vilket indikerar att intresset för detta arbete är stort även internationellt.

7.2.2.4 RASOIL Wargaming

Att bedöma den operativa effekten som kan uppnås med obemannade och autonoma system i olika domäner är intressant för inriktning av projektets fortsatta verksamhet men det är även av direkt intresse för Försvarsmakten. En ny Natoaktivitet initierades nyligen där avsikten är att genom spel (*wargaming*) analysera den operativa effekten vid markstrid. Aktiviteten är benämnd RASOIL (*Robotic and autonomous systems operative impact on land warfare*) och den genomförs inom ramen för SCI-331 (*Autonomy Leadership Team*). En förberedande workshop arrangerades av Finska Försvarsmaktens forskningsanstalt i Riihimäki i februari 2020. FOI avser delta genom med resurser från flera FoT-projekt och avsikten är att delta i förberedelserna genom att utveckla spelkort och även delta med tekniska experter under själva spelen.

7.2.2.5 Human Systems Integration for Meaningful Human Control over AI-based systems

FOI deltar på uppdrag av FMV inom området *human factors* även i Natogruppen HFM-RTG-330 (*Human Systems Integration for Meaningful Human Control over AI-based systems*) som har ambitionen att utveckla riktlinjer för meningsfull mänsklig kontroll inom olika systemutvecklingsfaser [42]. Områden som gruppen avser belysa är bland annat riktlinjer för systemutveckling och utvärdering, användargränssnitt, organisatoriska aspekter, möjligheter till mätning av meningsfull mänsklig kontroll, validering och verifiering, samt träning av människa-maskin team för meningsfull mänsklig kontroll.

8 Resultat och rekommendationer

Obemannade farkoster förväntas få en stor påverkan på hur den framtida striden förväntas genomföras, både när det gäller hur egna förband och motståndarens förband kommer att uppträda. Det är därmed av stor vikt att kunskap kontinuerligt byggs upp för att förstå teknikutvecklingen, i vilken grad den kan möjliggöra en ökad operativ effekt samt vilka sårbarheter som finns. Identifierade sårbarheter kan även utnyttjas av egna förband för att försvåra motståndarens användning av obemannade farkoster.

Obemannade och autonoma farkoster innefattar ett stort antal olika forskningsområden. Projektet fokuserar på gemensamma tekniker för dessa och har studerat fyra övergripande frågeställningar, där dessa även innefattar ett flertal delfrågeställningar. Projektet har genererat en god kunskapsbas inom området och bedömningen är även att kunskapsnivån inom Försvarsmakten och FMV har ökat som en följd av projektets verksamhet. Forskningen har resulterat i en relevant kunskapsutveckling som kommit både Försvarsmakten och FMV till del men den behöver också omsättas i Försvarsmaktens utvecklingsverksamhet. Den enskilt viktigaste rekommendationen är att Försvarsmakten bör fokusera insatserna mot att öka takten i utvecklingen av operativt effektiva användningskoncept. Det kan ske genom att:

- fortsatta studier initieras där nyttan med obemannade system undersöks i fasta kontexter, exempelvis inom ramen för stridsskolornas utvecklingsenheter samt vid organisationsenheter med funktionsansvar,
- genomföra metodutveckling med stöd av spel och simuleringar,
- genomföra explorativa materielförsök med existerande obemannade farkoster eller speciellt framtagna prototypfarkoster, i syfte att bygga kunskap om i vilka situationer obemannade system kan göra nytta redan idag men främst på kort och medellång sikt,
- utvärdera behovet och möjligheten att genomföra operationell experimentering (OPEX) i en svensk kontext.

Forskningsinsatserna som adresserar de i FoT-planen beskrivna kritiska teknikområdena motsvarar inte de identifierade behoven utan det finns ett behov av att bredda och fördjupa kunskapsuppbyggnaden ytterligare. Specifika forsknings- och utvecklingsbehov beskrivs i [3,4]. Viktiga forskningsområden bedöms även framöver motiveras av behoven av ökad autonomi och automatisering (inom ett flertal funktioner), robusta kommunikations- och navigeringssystem samt användargränssnitt för effektiv ledning av, och samverkan mellan, obemannade och bemannade system. Juridiska och etiska frågeställningar kan komma att leda till begränsningar i användningen av autonoma system och en fortsatt kunskapsuppbyggnad inom området behövs.

En ökad förståelse för möjligheterna och begränsningarna inom dessa områden är central då de kan sätta avgörande begränsningar för vilka nya förmågor som kan realiseras och hur dessa områden bör kravställas. En god kunskap inom dessa områden är nödvändig för att möjliggöra ett högkvalitativt stöd i Försvarsmaktens fortsatta förmågeutveckling.

I FoT-projektet *Obemannade farkoster och autonoma system – teknik och organisation (OFAS-TO)* som påbörjas 2021 kommer de högst prioriterade av dessa frågeställningar studeras. Överföring av kunskap till Försvarsmakten och FMV kommer även fortsättningsvis att utgöra en prioriterad verksamhet. Det kommer att genomföras i form av användarcentrerade rapporter och workshops, seminarier, försök, demonstrationer och genom deltagande i studier och spel.

Referenser

- [1] J. Rantakokko, J. Rydell, P. Strömbäck, F. Marsten-Eklöf, A. Lennartsson och M. Hagström, *Autonomi och obemannade system - Förslag till inriktning av delområdet Robust navigering*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--4523--SE, december 2017.
- [2] J. Rantakokko, *Tekniköversikt autonoma och obemannade system - Del 1: Historik*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--4680--SE, december 2018.
- [3] J. Rantakokko, F. Näsström, J. Nygårds, R. Woltjer och K. Bengtsson, *Tekniköversikt autonoma och obemannade system - Del 2: Markstriden*, Totalförsvarets Forskningsinstitut, FOI-R--4901--SE, november 2019.
- [4] J. Rantakokko, K. Bengtsson, C. Svensson, R. Lennartsson och M. Skarstind, *Tekniköversikt autonoma och obemannade system - Del 3: Sjöstriden*, Totalförsvarets Forskningsinstitut, FOI-R--5088--SE, december 2020.
- [5] J. Rantakokko, F. Näsström och T. Mårtensson, *Nuläge och förväntad utveckling inom området stridstekniska och taktiska RPAS*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI Memo 6685, mars 2019.
- [6] Y. Robinson (red.) och M. Garcia Lozano (red.) *et al, AI och framtidens försvarsmedicin*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--5045--SE, november 2020.
- [7] A. Williams (red.) och P. Scharre (red.), *Autonomous systems - Issues for defence policymakers*, Technical report, NATO Allied Command Transformation, 2015.
- [8] J. Appelgren, T. Beran, A. Musco Eklund och M. Hagström, *Autonoma vapensystem – tekniska, legala och etiska aspekter*, FOI Memo 6953, december 2019.
- [9] A. Musco Eklund, *Meaningful human control of autonomous weapon systems - Definitions and key elements in the light of international humanitarian law and international human rights law*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--4928--SE, februari 2020.
- [10] GGE on LAWS, *Guiding Principles*, Annex IV in Report of the 2019 session of the Group of Governmental Experts on Emerging Technologies in the Area of Lethal Autonomous Weapons System, Genève, Schweiz, 25 september 2019. (<https://undocs.org/en/CCW/GGE.1/2019/3>)
- [11] *Focus on Ethical implications for a Regulation of LAWS*, iPrav, augusti 2018. (www.ipraw.org/wp-content/uploads/2018/08/2018-08-17_iPRAW_Focus-On-Report-4.pdf)
- [12] International Committee of the Red Cross (ICRC), *Autonomous weapons: Decisions to kill and destroy are a human responsibility*, April 2016. (www.icrc.org/en/document/statement-icrc-lethal-autonomous-weapons-systems)

- [13] Försvarets Materielverk, *Handbok för programvara i säkerhetskritiska tillämpningar: H ProgSäk*, M7762-001041 H PROGSÄK 2018, FMV, Stockholm, 2018.
- [14] Försvarmakten, *Försvarmaktens Handbok Systemsäkerhet (H SystSäk 2011)*, M7739-352022 H SystSäk 2011 del 1 och M7739-352023 del 2, Försvarmakten, Stockholm, 2011.
- [15] *DO-178C, Software Considerations in Airborne Systems and Equipment Certification*, RTCA SC-205, EUROCAE WG-12, January 2012.
- [16] IEC 61508, *Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-related Systems. Part 1: General requirements*, ICS 13.110; 25.040; 29.020 ISBN 978-2-88910-524-3
- [17] Försvarmakten, *Tillväxt för ett starkare försvar. Slutredovisning av Försvarmaktens Perspektivstudie 2016-2018*, FM2015-13192:15, 2018.
- [18] T. Beck, M. Hagström, T. Iikkanen, T. Kaurila, A. Pettersen och P. Sandgren, *Distributed autonomous force components (unmanning of systems)*, Study Group Unmanning of Systems, NORDEFECO, 2017.
- [19] K. Bengtsson och R. Woltjer, *Autonomi och obemannade system - Inriktning av forskning inom delområdet Manned-Unmanned Teaming (MUM-T)*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--4522--SE, december 2017.
- [20] *Human-Machine Teaming. Joint Concept Note 1/18*, Ministry of Defence, Development, Concepts and Doctrine Centre (DCDC), Storbritannien, 2018.
- [21] K. Bengtsson och O. Jansson, *Förutsättningar för human-autonomy-teaming*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-D--0854--SE, 2018.
- [22] K. Bengtsson, J. Nordlöf, J. Nygårds och R. Woltjer, *Avrapportering av iakttagelser vid övningsverksamhet*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI Memo H2040, 2019.
- [23] O. Jansson och K. Bengtsson, *Funktionsgeneralisering MUM-T*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-D--0929--SE, 2020.
- [24] J. Pettersson, *Exploring interaction with unmanned systems: A case study regarding interaction with an autonomous unmanned vehicle*, Linköping University, Department of Computer and Information Science, LIU-IDA/KOGVET-G--20/011—SE, 2020.
- [25] B. Johansson, P. Svenmarck, P.-A. Oskarsson, R. Woltjer, R. Forsgren, P. Glendor och J. Allvar, *Simuleringsmiljö och scenariobeskrivningar för framtidsstudier av autonoma eller intelligenta enheter*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--4866--SE, 2019.
- [26] B. Johansson, P.-A. Oskarsson, K. Bengtsson, P. Svenmarck och A. Fredriksson-Hägg, *Ledning av autonoma och sammansatta system för mekaniserad strid*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--XXXX--SE, december 2020.
- [27] A. Schulte, D. Donath, och D. S. Lange, "Design patterns for human-cognitive agent teaming," *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*

- (EPCE 2016) *Lecture Notes in Computer Science (LNCS)*, vol. 9736, 231–243, 2016.
- [28] J. Rantakokko, E. Axell, J. Nygårds och N. Stenberg, *Tekniker för navigering i urbana och störda GNSS-miljöer – Slutrapport*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--4907--SE, december 2019.
 - [29] A. Andersson Jagesten och A. Källström, *Autonomous landing of an unmanned aerial vehicle on an unmanned ground vehicle in a GNSS-denied scenario*, Linköping University, LiTH-ISY-EX-20/5327-SE, juni 2020.
 - [30] N. Roy, W. Burgard, D. Fox och S. Thrun, "Coastal navigation-mobile robot navigation with uncertainty in dynamic environments," *In Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 1, pp. 35-40, Detroit, MI, 1999.
 - [31] D. Sandmark, *Navigation strategies for improved positioning of autonomous vehicles*, Linköping University, LiTH-ISY-EX--19/5255--SE, augusti 2019.
 - [32] A. Mesbah, "Stochastic model predictive control: An overview and perspectives for future research," *IEEE Control Systems Magazine*, 2016.
 - [33] K. Gudmundson, *Ground based attitude determination using a SWIR star tracker*, Linköping University, LiTH-ISY-EX--19/5236--SE, juni 2019.
 - [34] D. Bergström och T. Svensson, *Sensorer i SWIR, en studie om fenomenologiska förutsättningar och sensorteknisk potential för ökad mörkerförmåga*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--3486--SE, september 2012.
 - [35] B. Lussioer, M. Saied, I. Fantoni, H. Shraim och C. Francis, "Fault diagnosis and fault-tolerant control of an octorotor UAV using motor speed measurements," *IFAC PapersOnLine*, vol. 50, no. 1, sid. 5263-5268, 2017.
 - [36] R. C. Avram, *Fault diagnosis and fault-tolerant control of quadrorotor UAVs*, Wright State University, 2016.
 - [37] *Generic AOCS/GNC Techniques & Design Framework for FDIR (GAFE)*. Hämtat från European Space Agency: <http://gafe.estec.esa.int> (18 11 2020)
 - [38] J.N. Yasin, S.A. Mohamed, M.-H. Hagbayan, J. Heikkonen, H. Tenhunen och J. Plosila, "Unmanned aerial vehicles (UAVs): Collision avoidance systems and approaches," *IEEE Access*, vol. 8, sid. 105139-105155, 2020.
 - [39] P. Jyrkönen, M. Miettinen, A. Pettersen och M. Hagström, *Study report on unmanning of systems – Swarming technologies*, NORDEFECO Working Group Swarming, 2018.
 - [40] J. Rantakokko, J. Nygårds, A. Pettersen, O. K. Hagen och T. Saarelainen, *Study report on unmanning of systems - Robust navigation*, NORDEFECO Working Group Robust Navigation, april 2019.
 - [41] G. Court, M. Parr, J. Murumets, M. Hagström, S. Allik och T. Jefferis, *Understanding the cost related implications of autonomy - A system of systems perspective*, NATO STO Systems Analysis and Studies Panel, SAS ST-146, april 2020.

- [42] R. Woltjer, *Verksamhetsredovisning i IPT Meaningful Human Control, delrapport 2020*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI Memo 7369, november 2020.

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